



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖZENEKLİ YAPILARDA
YAPI VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN
ISI İLETİM KATSAYISINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Numan YÜKSEL

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖZENEKLİ YAPILARDA
YAPI VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN
ISI İLETİM KATSAYISINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Numan YÜKSEL

Prof. Dr. Atakan AVCI
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖZENEKLİ YAPILARDA
YAPI VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN
ISI İLETİM KATSAYISINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Numan YÜKSEL

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez/...../2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Atakan AVCI Prof. Dr. Muhiddin CAN Prof. Dr. Yusuf ULCAY
Danışman

Prof. Dr. Abdulvahap YİĞİT

Doç. Dr. Murat HOŞÖZ

ÖZET

Değişik alanlarda enerji kullanımı sürekli artmakta ve enerji giderleri yükselmektedir. Bu açıdan, enerjinin etkin ve verimli kullanımı gerekmektedir. Karşılaşılan birçok ısı sistemde, enerjinin etkin ve verimli kullanımında ısı yalıtımı önemli rol oynamaktadır. Yalıtımın geniş bir uygulama alanı bulunmakta ve bu uygulamalarda yalıtım amacıyla kullanılan maddelerin en önemli kısmını gözenekli yalıtım maddeleri oluşturmaktadır. Yalıtım maddelerinin önemli özelliklerinden biri, efektif ısı iletkenlik olup bunun düşük değerlerde olması istenir. Bunun için, efektif ısı iletimine etki eden parametrelerin bilinmesi ve istenen değeri sağlayacak şekilde malzeme tasarımı gerekir. Aynı zamanda, büyük ekonomik değeri olduğundan bu alan üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında, gözenekli yalıtım malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin modellenmesi ve ölçümü detaylı olarak araştırıldı. Bu amaçla, önce literatürdeki kuramsal ve deneysel çalışmalar detaylı olarak incelendi. Bu kuramsal çalışmalarda elde edilen bağıntılar, literatürde tespit edilen ve farklı uygulamaları kapsayan bazı deneysel sonuçlar dikkate alınarak analiz edildi. Bu bağıntılar, kabul edilebilirliği, uygulanabilirlik aralığı, kullanım kolaylığı ile değişik parametrelerin etkileri açısından değerlendirildi. Belirli yapılarda ve belirli gözeneklilik aralığında, belirli bir hata toleransı ile kullanılacak modelleri seçmenin daha uygun olacağı sonucuna varıldı. Özellikle gözenekliliği yüksek yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenliğine etki eden taşınım, difüzyon ve ışınım etkilerini dikkate alan bir matematik model geliştirildi. Bu model, literatürden elde edilen ve bu çalışmada ölçülen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında, gözenekli yalıtım malzemelerinde taşınım, difüzyon ve ışınımın efektif ısı iletkenliğe etkisi deneysel olarak incelendi. Deneyler, biri standart test cihazında ve diğeri ise yalıtım uygulaması yapılan deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu amaçla, cam yünü, EPS ve dokumasız kumaş türü malzemelerle emisivitesi düşük ve iletken alüminyum ve bakır malzemeler kullanılarak farklı yapı ve işletme şartlarında çalışıldı. Deneysel sonuçlardan, alüminyum ve bakır ile desteklenmiş gözenekli yalıtım malzemelerinde 20-30 °C ortalama sıcaklığının üzerinde efektif ısı iletkenlik daha hızlı artarken daha düşük sıcaklıklarda hızlı azalma gözlemlendi. Yapıya bağlı olarak, 5 °C ve altı sıcaklıklarda alüminyum ve bakır ile desteklenmemiş gözenekli yalıtım malzemelerine göre efektif ısı iletkenliklerde üçte bir oranına kadar azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan, ışınımın önemli bir mekanizma olduğu ve standart davranışın dışında etkiler oluşturabildiği görülmüştür.

Deneysel çalışmanın yalıtım uygulamalı test düzeneğinde, alüminyum destekli ve desteksiz iki su tenekesinin aynı şartlarda ısınma ve soğuma davranışı incelendi. Farklı işletme şartlarında yapılan deneylerden elde edilen sonuçların standart deney tesisatından elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği belirlendi. Sonuçta, uygulamada bilinmeyen ancak 20 °C sıcaklıkları altında çalışılan sistemlerde yalıtım malzemesinin efektif ısı iletkenliği önemli ölçüde düşüren bir teknik geliştirilmiştir. Bu sonuç,

akademik açıdan önemli bir çalışma alanı ortaya çıkarırken endüstriyel olarak da faydalı ürün ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: efektif ısı iletkenlik, matematik model, gözenekli malzeme, ışınım, ısı transferi, gözenekli yalıtım malzemesi.

ABSTRACT

The use of energy in the different fields is increasing continually and the expenses of energy are also increasing. From this point of view, the efficient and effective use of energy is necessary. The heat insulation plays important role on the efficient and effective use of energy in many thermal systems encountered. Insulation has a wide range of application field and a porous insulation material constitutes the most important part of materials used with the aim of insulation in these applications. The effective thermal conductivity is one of the important properties of insulation materials and it is desired to be at low values. For this purpose, the parameters affecting the effective thermal conductivity should be known and materials should be designed to provide for the required value. Also, intensive studies on this field are carried out due to major economic value.

In the first chapter of this study, the modeling and measurement of the effective thermal conductivity of porous insulation materials has been examined in detail. For this purpose, the theoretical and experimental studies in the literature have been firstly reviewed. The relations obtained from these theoretical studies have been analyzed by considering some experimental results including different applications which were determined in literature. These relations have been evaluated in terms of acceptability, applicability range, simplicity of usage and the effects of different parameters. It is concluded that choosing of models which can be used with a certain error tolerance in specific structures and specific porosity intervals would be more suitable. The mathematical model considering the effects of convection, diffusion and radiation affecting the effective thermal conductivity of especially high porous insulation materials has been developed. This model is compared with the experimental results obtained from literature and those are measured in this study.

In the second chapter of this study, the effect of convection, diffusion and radiation in porous insulation materials on the effective thermal conductivity has been experimentally investigated. The experiments have been performed on the standard test apparatus and the other experiment mechanism in which an insulation application is done. For this purpose, it has been studied in different structure and operating conditions by using low emissivity and conductive aluminum and copper materials with glass wool, EPS and nonwoven fabric type materials. From experimental results, it is observed that a rapid decrease on porous insulation materials reinforced with aluminum and copper is observed on the low temperatures. However, the effective thermal conductivity is rapidly increased over the average temperature of 20-30 °C. As related to the structure, a decrease of one to three in the effective thermal conductivities is observed at 5 °C and below temperatures as to porous insulation materials unreinforced with aluminum and copper. From these results, it is seen that the radiation is a important mechanism and it can form the effects except for standard behavior.

On test mechanism of experimental study with insulation application, the heating and cooling behavior of two water tinplates has been investigated on the same conditions. It is determined that the results obtained from experiments performed on the different operating conditions show parallelism by the results obtained from a standard experiment apparatus. Consequently, in systems working under the temperatures of 20 °C which is unknown in practice, a technique is developed which is significantly decreasing the effective thermal conductivity of porous material. While this result reveals an important study field from academic view, it also invents a useful industrial product.

Keywords: effective thermal conductivity, mathematical model, porous material, radiation, heat transfer, porous insulation material.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xx
GİRİŞ.....	1
1. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
1.1. Bileşenlerin ve Hacim Oranlarının Etkisi.....	4
1.2. Gözenekliliğin Etkisi.....	9
1.3. Sıcaklığın Etkisi.....	11
1.4. Şekil Faktörünün ve Konumun Etkisi.....	14
1.5. Dolgu Parçacık Boyutunun Etkisi.....	18
1.6. Nem İçeriğinin Etkisi.....	19
1.7. Buharlaşmanın ve Yoğuşmanın Etkisi.....	20
1.8. Işınımın Etkisi.....	21
1.9. Ara Yüzeyin ve Temas Alanının Etkisi.....	23
1.10. Diğer Parametreler.....	24
1.11. Literatür Sonuçları: Gözenekli Malzemelerde Değişik Parametrelerin Efektif Isıl iletkenliğe Etkileri	31
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
2.1. Efektif Isıl İletkenlik Modelleri.....	35
2.1.1. Seri ve paralel model.....	36
2.1.2. Geometrik ortalama modeli.....	37
2.1.3. Maxwell modeli.....	39
2.1.4. Nielsen modeli.....	42
2.1.5. Halpin-Tsai model.....	43
2.1.6. Levy modeli.....	44
2.1.7. Efektif ortam teorisi (EMT) modeli.....	44
2.1.8. Krischer'in yaklaşımı.....	46
2.1.9. Russell modeli.....	48
2.1.10. Diğer modeller.....	49
2.2. Geliştirilen Matematik Model.....	49
2.2.1. Durgun ortamların ısı iletkenliği.....	53
2.2.2. Doğal taşınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik.....	53
2.2.3. Difüzyon ile gerçekleşen ısı iletkenlik.....	56
2.2.4. Işınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik.....	60
2.3. Deney Tesisatı ve Ölçüm Cihazları.....	63
2.3.1. Ölçüm yöntemi ve standardı.....	63
2.3.2. Mevcut muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı.....	68

2.3.3. Mevcut muhafazalı sıcak plaka tesisatında hata analizi.....	72
2.3.4. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazı	73
2.3.5. Efektif ısı iletkenliğinin deneysel ölçümleri.....	76
2.3.6. Malzemelerin hazırlanması.....	78
2.3.7. Isınma ve soğuma deney tesisatında ölçümler.....	81
2.3.8. SPSS ile deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	86
2.3.8.1. İstatistiksel analiz ve yöntemleri.....	86
2.3.8.2. Tek değişkenli varyans analizi (ANOVA).....	88
2.3.8.3. SPSS 1.7 programı ile analiz.....	90
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	92
3.1. Efektif Isıl İletkenlik Modellerinin Değerlendirmesi.....	93
3.2. Geliştirilen Matematik Modelin Değerlendirmesi.....	100
3.2.1. Cam yününün efektif ısı iletkenliğini tahmin etme.....	100
3.2.2. İletken dokuma yapı iletkenliğini tahmin etme.....	101
3.2.3. Heterojen nonwoven malzemelerin efektif ısı iletkenliğini tahmin etme.....	104
3.3. Mevcut Sıcak Plaka Tesisatı.....	112
3.4. EP500 Isıl İletkenlik Cihazında Ölçülen Efektif Isıl İletkenlik.....	120
3.4.1. Takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenlikleri.....	120
3.4.1.1. Takviyesiz EPS (strafor) numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	120
3.4.1.2. Takviyesiz camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliği.....	121
3.4.1.3. Takviyesiz dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	124
3.4.2. Takviyenin efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	124
3.4.2.1. Takviyeli üçlü strafor numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	125
3.4.2.2. Takviyeli ikili camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	127
3.4.2.3. Takviyeli üçlü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	128
3.4.2.4. Takviyeli dörtlü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	129
3.4.2.5. Takviyeli beşli camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	131
3.4.2.6. Takviyeli üçlü dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliği.....	132
3.4.3. Tabaka ve takviye sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	133
3.4.3.1. Takviyeli ikili ve üçlü camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması.....	133
3.4.3.2. Takviyeli üçlü ve dörtlü camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması.....	135
3.4.3.3. Takviyeli dörtlü ve beşli camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması.....	136
3.4.3.4. Takviyeli camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması.....	138

3.4.4. Takviye sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	139
3.4.4.1. Dörtlü camyünü numunesinde takviye sayısının etkisi.....	139
3.4.4.2. Beşli camyünü numunesinde takviye sayısının etkisi.....	141
3.4.5. Takviye konumunun efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	145
3.4.6. Tabaka sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	149
3.4.7. Takviye tipinin efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi.....	153
3.4.8. Takviyeli numunelerde malzeme tipinin efektif ısı iletkenliğe etkisi.....	158
3.5. Isınma ve Soğuma Deneyleri.....	161
3.5.1. “Tek folyolu iki tabakalı” camyününde ısınma ve soğuma.....	161
3.5.2. Ortam içerisinde “iki folyolu üç tabakalı” camyününde ısınma.....	165
3.5.3. Ortam içerisinde “iki folyolu üç tabakalı” camyününde soğuma.....	173
3.5.4. Buzdolabında “iki folyolu üç tabakalı” camyününde soğuma.....	176
3.6. EP500 Isıl İletkenlik Sonuçlarının SPSS 1.7 ile Analizi	182
3.6.1. Sıcaklık için yapılan analizler.....	183
3.6.2. Sıcaklık farkı için yapılan analizler.....	187
SONUÇ.....	190
KAYNAKLAR.....	195
EKLER.....	210
ÖZGEÇMİŞ.....	229
TEŞEKKÜR.....	230

KISALTMALAR DİZİNİ

Al	- alüminyum
Altta	- soğuk yüzeye yakınlığı
ANOVA	- tek yönlü varyans analizi
ASTM	- Amerikan test ve malzemeler derneği
Beşli	- beş adet tabakanın üst üste konulmasıyla oluşturulan yapı malzemesi
C/P	- karbon/fenolik
C177	- muhafazalı sıcak plaka cihazıyla sürekli hal ısı akışı ölçümleri ve ısı taşıma özellikleri için standart test metodu (ASTM)
C518	- ısı akışı ölçüm cihazı ile sürekli hal ısı geçiş özellikleri için standart test metodu (ASTM)
DIN 52612	- ısı yalıtım malzemelerini test etme - muhafazalı sıcak plaka cihazıyla ısı iletkenliğinin belirlenmesi - bölüm 1: test prosedürü ve değerlendirme – bölüm 2: bina uygulamaları için ölçülen değerlerin dönüşümü – bölüm 3: bina uygulamasında kullanılan lamine malzemelerin ısı direnci
Dörtlü	- dört adet tabakanın üst üste konulmasıyla oluşturulan yapı malzemesi
EMT	- efektif ortam teori
E1225-87	- muhafazalı-karşılaştırmalı-boylamsal ısı akışı tekniği ile katıların ısı iletkenlik standart test metodu (ASTM)
EN 1946-2	- yapı malzemeleri ve ürünlerinin ısı performansı - ısı aktarma özelliklerini ölçen laboratuvarların değerlendirilmesi için özel kriterler - bölüm 2: muhafazalı sıcak tabla metodu ile yapılan ölçümler (TS)
EN 12664	- yapı malzemeleri ve mamulleri - ısı direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akışı ölçerinin kullanıldığı metotlarla tayini - ısı direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller (TS)
EN 12939	- yapı malzemelerinin ve mamullerinin ısı performansı-muhafazalı sıcak plaka cihazı ve ısı akışı sayacı metotları ile ısı direncin tayini-yüksek ve orta ısı dirençli kalın mamuller (TS 415)
EN 12667	- yapı malzemeleri ve mamullerinin ısı performansı-muhafazalı sıcak plaka ve ısı akışı sayacı metotlarıyla ısı direncin tayini-yüksek ve orta ısı dirençli mamuller (TS)
EPS	- genişletilmiş polistren yalıtım malzemesi
EP500	- ısı iletkenlik ölçüm cihazının modeli
GA, Gİ, GE	- istatistikte gruplar arası, gruplar içi, etkileşim (varyans kaynakları)
G-C-G	- cam/seramik/cam tabakalar kombinasyonu
HFK	- hata kaynakları fonksiyonu
IRMM-440	- reçine kaplı fiber levha malzeme, referans malzeme

İkili	- iki adet tabakanın üst üste konulmasıyla oluşturulan yapı malzemesi
JIS	- Japon endüstriyel standartları
JIS A1412	- Japon standartlarından veya ASTM C518
JTCCM	- yapı malzemeleri için Japon test merkezi
KE	- kinetik enerji
LDPE/LLDPE-	düşük yoğunluklu polietilen / liner düşük yoğunluklu polietilen
MS	- istatistikte kareler ortalaması
PE	- potansiyel enerji
Pr	- Prandtl sayısı
Ra	- Rayleigh sayısı
Re	- Reynolds sayısı
R141b	- soğutucu gaz
Sd	- serbestlik derecesi
S-N-K	- Student Newman Keul testi
SPSS	- sosyal bilimler için istatistiksel paket programı
SRM 1451	- lifli-cam kapsayan bir malzeme, referans malzeme
SRM 1453	- genişletilmiş polistren levha, referans malzeme
Tekli	- bir adet tabakadan oluşan yapı malzemesi
TS ISO 8302	- ısı yalıtımı - kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini - muhafazalı sıcak plaka cihazı
Üçlü	- üç adet tabakanın üst üste konulmasıyla oluşturulan yapı malzemesi, (üçlü dokumasız kumaş numunesi aslında 21 adet tabakadan oluşmakta)
Üstte	- sıcak yüzeye yakınlığı

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Cam yünü, strafor ve dokumasız filtre kumaş malzemelerinin takviyesiz ve takviyeli kalınlıkları ve kütleleri.....	78
Çizelge 2.2	İstatistik testlerde elde edilen p değerlerine göre verilen kararlar ve önemlilik düzeyi.....	88
Çizelge 2.3	İki faktörlü ANOVA analiz denklemleri.....	89
Çizelge 3.1	Bazı modeller için tahmini parametrelerin aralıkları.....	95
Çizelge 3.2	Yaygın modellerin deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	98
Çizelge 3.3	Matris numunede bulunan iletken malzemenin ve suyun özellikleri....	102
Çizelge 3.4	Matris numunenin boyutları.....	103
Çizelge 3.5	Cam seramik numunesinin boyutları ve özellikleri.....	105
Çizelge 3.6	Cam seramik numunede bulunan malzemenin ve havanın özellikleri...	105
Çizelge 3.7	Literatürdeki bazı çalışmalara matematik modelin uygulanması.....	108
Çizelge 3.8	Literatürdeki düşük gözenekli veya k_d/k_s oranı yüksek malzemelere matematik modelin uygulaması.....	109
Çizelge 3.9	Literatürde kalınlığı ve/veya sıcaklığı belirsiz malzemelere matematik modelin uygulaması.....	110
Çizelge 3.10	Ortalama numune sıcaklığı 17 ve 31,5 °C olan Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	164
Çizelge 3.11	Ortalama numune sıcaklığı 17 ve 20 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	167
Çizelge 3.12	Ortalama numune sıcaklığı 18,5 ve 16 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	170
Çizelge 3.13	Ortalama numune sıcaklığı 12 ve 17 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	172
Çizelge 3.14	Ortalama numune sıcaklığı 13,5 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	173
Çizelge 3.15	Ortalama numune sıcaklığı 33 ve 37 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	176
Çizelge 3.16	Ortalama numune sıcaklığı 13 ve 5 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısıl iletkenliğin değişimi.....	179

Çizelge 3.17	Ortalama numune sıcaklığı 0 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğin değişimi.....	182
Çizelge 3.18	Alüminyum folyo takviye edilmeyen üçlü EPS numunesi için ANOVA.....	183
Çizelge.3.19	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi için ANOVA.....	184
Çizelge.3.20	Takviyesiz üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık sonuçları.....	184
Çizelge.3.21	Takviyesiz üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık güven aralığı.....	185
Çizelge.3.22	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık sonuçları.....	186
Çizelge.3.23	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık güven aralığı.....	186
Çizelge.3.24	Takviyesiz üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık farkı sonuçları.....	187
Çizelge.3.25	Takviyesiz üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık farkı güven aralığı.....	188
Çizelge.3.26	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık farkı sonuçları.....	188
Çizelge.3.27	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık farkı güven aralığı.....	189
Çizelge.4.1	Basit ve temel bileşenleri içeren efektif ısı iletkenlik modelleri.....	210
Çizelge.4.2	Ekstra parametre içeren efektif ısı iletkenlik modelleri.....	213
Çizelge.4.3	Bir bileşen bilgisi isteyen efektif ısı iletkenlik modelleri.....	216
Çizelge.4.4	Diğer ısı transferi mekanizmalarını içeren efektif ısı iletkenlik modelleri.....	218
Çizelge.4.5	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde altkümelerin faktörleri.....	219
Çizelge.4.6	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde Levene testi-hata varyanslarının eşitliği.....	219
Çizelge.4.7	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde tanımlayıcı veriler.....	220
Çizelge.4.8	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde altkümeler etkisini test etme.....	221
Çizelge.4.9	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık için tahmini sınır ortalamaları.....	221
Çizelge.4.10	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için tahmini sınır ortalamaları.....	221
Çizelge.4.11	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık*sıcaklık farkı etkileşimi için tahmini sınır ortalamaları.....	222
Çizelge.4.12	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık için S-N-K testi sonuçları.....	223

Çizelge.4.13	Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için S-N-K testi sonuçları.....	223
Çizelge.4.14	Takviyeli üçlü EPS numunesinde altkümelerin faktörleri.....	224
Çizelge.4.15	Takviyeli üçlü EPS numunesinde Levene testi-hata varyanslarının eşitliği.....	224
Çizelge.4.16	Takviyeli üçlü EPS numunesinde tanımlayıcı veriler.....	225
Çizelge.4.17	Takviyeli üçlü EPS numunesinde altkümeler etkisini test etme.....	226
Çizelge.4.18	Takviyeli üçlü EPS numunesinde genel ortalama.....	226
Çizelge.4.19	Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık için tahmini sınır ortalamaları.....	226
Çizelge.4.20	Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için tahmini sınır ortalamaları.....	227
Çizelge.4.21	Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık*sıcaklık farkı etkileşimi için tahmini sınır ortalamaları.....	227
Çizelge.4.22	Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık için S-N-K testi sonuçları.....	228
Çizelge.4.23	Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için S-N-K testi sonuçları.....	228

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Efektif ısı iletkenliği etkileyen parametreler.....	32
Şekil 2.1	Gözenekli ortamda matematik model ortamı.....	51
Şekil 2.2	Koruyucu ısıtıcı ısı sıcak levha cihazının şeması.....	65
Şekil 2.3	Mevcut muhafazalı sıcak plakalı deney tesisatı.....	69
Şekil 2.4	Isıl çiftler ile birlikte soğutucu ve ısıtıcı plakalar.....	70
Şekil 2.5	Soğutucu ve ısıtıcı plakalara yerleştirilen ısı çiftler.....	70
Şekil 2.6	Plaklar ile 12 farklı noktadan ortalama kalınlık tespiti.....	71
Şekil 2.7	EP500 muhafazalı sıcak plaka ısı iletkenlik ölçüm cihazı.....	74
Şekil 2.8	EP500 kontrol programı test hazırlık aşama menüsü.....	75
Şekil 2.9	Farklı kalınlıklara sahip numuneler.....	81
Şekil 2.10	5 litrelik yağ tenekelerinin takviyesiz ve takviyeli cam yünü ile tasarımı.....	82
Şekil 2.11	Takviyesiz ve takviyeli cam yünü ile kaplanan 5 litrelik yağ tenekeleri.....	82
Şekil 2.12	K tipi termoelemanların bağlandığı 12 kanallı veri toplayıcının görünüşü.....	83
Şekil 2.13	(a) ortama ve (b) buzdolabına yerleştirilen 5 litrelik yağ tenekelerinin ısınma ve soğuma süresince sıcaklıklarının kaydı.....	84
Şekil 2.14	SPSS1.7 analiz programı ve değişkenler.....	91
Şekil 3.1	İki boyutlu düzlem dokunmuş iletken ağlardan oluşan matris numune.....	102
Şekil 3.2	Farklı kalınlığa sahip camyünü numuneler için, ortalama sıcaklıkla efektif ısı iletkenliğin değişimi.....	113
Şekil 3.3	Naylon takviyeli ve takviyesiz “ikili camyünü numunede” efektif ısı iletkenliğin elde edilmesi.....	113
Şekil 3.4	Naylon takviyeli ve takviyesiz “üçlü camyünü numunede” efektif ısı iletkenliğin elde edilmesi.....	114
Şekil 3.5	Tekli ve ikili camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.6	İkili ve üçlü camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması.....	115
Şekil 3.7	Üçlü ve dörtlü camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması.....	116
Şekil 3.8	Naylon takviyeli ve takviyesiz “ikili camyünü numunenin” alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması.....	117

Şekil 3.9	Naylon takviyeli ve takviyesiz “üçlü camyünü numunenin” alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması.....117
Şekil 3.10	Ortalama sıcaklıklar için (a) kalınlıkla efektif ısı iletkenliğinin ve (b) kalınlıkla sıcaklık farkının değişimi.....119
Şekil 3.11	Takviyesiz üçlü strafor numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....121
Şekil 3.12	Al folyo takviyesiz tekli, ikili, üçlü ve beşli camyünü numunelerinin 10 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....122
Şekil 3.13	Takviyesiz üç farklı (tekli, ikili ve üçlü) camyünü numunesinin farklı sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....122
Şekil 3.14	Takviyesiz üçlü strafor ve üçlü camyünü numunelerinin farklı sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....123
Şekil 3.15	Takviyesiz üçlü dokumasız (nonwoven) filtre ile takviyesiz üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....124
Şekil 3.16	İki Al folyo takviyeli üçlü strafor numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....125
Şekil 3.17	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü strafor numunelerinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....126
Şekil 3.18	Al folyo takviyeli ikili camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....127
Şekil 3.19	İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi....129
Şekil 3.20	Üç Al folyo takviyeli dördü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi....130
Şekil 3.21	Dört Al folyo takviyeli beşli cam yünü numunesinin efektif ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi (10 K sıcaklık farkı).....131
Şekil 3.22	İki Al folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....132
Şekil 3.23	Al folyolu ikili camyünü ve iki Al folyolu üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....134
Şekil 3.24	İki Al folyolu üçlü camyünü ile üç Al folyolu dördü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....135
Şekil 3.25	Üç Al folyolu dördü camyünü ile dört Al folyolu beşli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....137

Şekil 3.26	Takviyeli camyünü numunelerinin 10 K sıcaklık farkında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....	138
Şekil 3.27	Üç Al folyolu ve iki Al folyolu (ortası takviyesiz) dördlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırılması.....	139
Şekil 3.28	İki Al folyolu (ortası takviyesiz) dördlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	140
Şekil 3.29	Tek ve iki alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin farklı konumlandırılmış olarak efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	141
Şekil 3.30	İki ve üç alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin farklı konumlandırılmış olarak efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	143
Şekil 3.31	Beşlicam yünü tabakalı numunelerde üç ve dört alüminyum folyo takviyesine göre efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması (10 K sıcaklık farkı).....	144
Şekil 3.32	Farklı konumlandırılmış bir alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....	146
Şekil 3.33	Farklı konumlandırılmış iki alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması.....	147
Şekil 3.34	Farklı konumlandırılmış üç alüminyum folyolu beşli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması (10 K sıcaklık farkı).....	148
Şekil 3.35	İki alüminyum folyo ile takviyelenen hem üçlü camyünü numunesinin hem de dördlü camyünü numunesinin (ortası takviyesiz) efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla karşılaştırılması.....	150
Şekil 3.36	İki alüminyum folyo ile takviyelenen hem dördlü camyünü numunesinin hem de beşli camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	151
Şekil 3.37	Üç alüminyum folyo takviyeli dördlü cam yünü ile beşlicamyünü numunelerin (farklı konumlu takviyelerle) efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	152
Şekil 3.38	Farklı takviye (ince folyo, kağıt, naylon) cinslerinin üçlü camyünü numunesinde efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	153
Şekil 3.39	İki alüminyum levha takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	154

Şekil 3.40	İki paslanmaz çelik takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırılması.....155
Şekil 3.41	İki paslanmaz çelik takviyeli üçlü camyünü ile iki alüminyum takviyeli üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....156
Şekil 3.42	İki alüminyum folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş ile iki bakır folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....157
Şekil 3.43	İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü, strafor ve dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla karşılaştırılması.....158
Şekil 3.44	İki Al folyo takviyeli dördü camyünü (ortası takviyesiz) ve üçlü strafor numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....159
Şekil 3.45	İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü ile üçlü dokumasız filtre numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması.....161
Şekil 3.46	Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması.....162
Şekil 3.47	Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması.....163
Şekil 3.48	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (1).....165
Şekil 3.49	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (2).....166
Şekil 3.50	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (3).....168
Şekil 3.51	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki buzun ortam sıcaklığında ısınması.....169
Şekil 3.52	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki “antifrizli” suların ortam sıcaklığında ısınması (1).....171
Şekil 3.53	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki “antifrizli” suların ortam sıcaklığında ısınması (2).....172
Şekil 3.54	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması (1).....174
Şekil 3.55	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması (2).....175
Şekil 3.56	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (1).....177
Şekil 3.57	İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (2).....178

- Şekil 3.58 İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki antifirizli suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (1).....180
- Şekil 3.59 İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki antifirizli suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (2).....181

SİMGELER DİZİNİ

- A - yüzey alanı (m^2)
 A_i - istatistikte i. faktörün etkisi
 a_{su} - su içeriği (izafi nem/100)
 B - ısı iletkenlikler arası ilişkiyi veren parametre
 B_j - istatistikte j. faktörün etkisi
 a, b - Halpin-Tsai modelde ölçüm verileri
 b/a - kanat tabanının adıma(hatveye) oranı
 C - dağılılı fazın oranlarına bağlı parametre
 C_i - (0,1,2,...24) indis aralığında bileşene göre değişebilen parametreler
 C_s, C_d - efektif malzemede sürekli ve dağılılı ortam parametreleri
 c_p, c_v - özgül ısı (J/kgK)
 c_d - sıkıştırma faktörü
 c_D - direnç katsayısı
 D_o - referans sıcaklıktaki difüzyon katsayısı (m^2/s)
 D_{sb} - su buharı difüzyon katsayısı
 D_{hd} - hidrolik çap (m)
 d - ortalama çap
 d_b - boşluk boyutu
 d_d - dolgu lif çapı (m)
 d_t - tel çapı
 d_y, d_z - y ve z yönlerinde lif çapı
 E_m - birim yüzeyden saniyede ışıma miktarı
 e - boyutsuz ve belirli şeklin düğüm uzunluğu
 ε - gözeneklilik (%)
 ε_{ag} - açık gözeneklilik (%)
 ε_{kpl} - kapalı gözeneklilik (%)
 F - dağılılım faktörü/oranı veya ampriksel parametre
 F_i - istatistikte F oranı
 $F_{y,-b}$ - buhar taşınımına karşı direnç faktörü
 F_r - Rahman-Chen yapısal dağılılım faktörü
 F_o - dolgunun optik özelliklerinin bir fonksiyonu
 f - sürtünme katsayısı

- $f(\alpha)$ - k_d/k_s iletkenlikler oranına bağlı fonksiyon
 f_A, f_i - istatistikte her bir faktörün kendi içinde sayısı
 G - ısı iletkenliklere bağlı parametre
 g - yerçekimi ivmesi ($9,80665 \text{ m/s}^2$)
 g - istatistikte gruptaki veri sayısı
 H - yükseklik
 h/a - kanadın yüksekliğinin adıma (hatveye) oranı
 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - x, y, z vektörel yönleri
 j - ayarlanabilen ampirik parametre
 K_e - toplam ısı transfer katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 k - ısı iletkenlik (W/mK)
 k_{argon} - argonun ısı iletkenliği (W/mK)
 k_e - efektif ısı iletkenlik (W/mK)
 k_{ey} - esas yığın kısmın ısı iletkenliği (W/mK)
 k_k - katı ortamın ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{su} - suyun ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{gk} - gözenek ısı iletkenliği (W/mK)
 $k_{g,kpl}$ - kapalı gözenek ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{dif} - difüzyonla ısı iletkenlik (W/mK)
 k_i - i. bileşenin ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{il} - iletimle gerçekleşen ısı iletkenlik (W/mK)
 $k_{(prl.)}$ - ısı akışı yönüne paralel düzenlenmiş ısı iletkenlik (W/mK)
 $k_{(seri)}$ - ısı akışına dik düzenlenmiş ısı iletkenlik (W/mK)
 k_E - genelleştirilmiş Einstein katsayısı
 k_h - havanın ısı iletkenliği (W/mK)
 $k_{y.-b.}$ - yoğuşma ve buharlaşma fazının ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{en} - enine ısı iletkenlik (W/mK)
 k_{by} - boyuna ısı iletkenlik (W/mK)
 k_0 - efektif ortamın maksimum ısı iletkenliği (W/mK)
 $[k]$ - ısı iletkenliklere bağlı boyutsuz ısı iletkenlik
 $k(T)$ - sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik (W/mK)
 k_g - gazın efektif ısı iletkenliği (W/mK)
 $k_{ış}$ - ışı nım efektif ısı iletkenliği (W/mK)

- $k_{eş}$ - yerel eşdeğer ısı iletkenlik (W/mK)
 $k_{ıslak}$ - gözenekli ortamdaki doymuş ıslak ısı iletkenliği (W/mK)
 k_{kuru} - kuru gözenekli ortamın ısı iletkenliği (W/mK)
 k_u - gözenekli ortamın birleşik efektif ısı iletkenliği
 $k_{eş,ış}$ - eşdeğer ışımla gerçekleşen efektif ısı iletkenliği (W/mK)
 $k_{eş,d}$ - eşdeğer difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik (W/mK)
 $k_{eş,t}$ - eşdeğer taşınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik (W/mK)
 k_x - x düzlem boyunca ısı iletkenlik
 k_y - y düzlemi boyunca ısı iletkenlik
 k_z - efektif enine ısı iletkenlik
 k_h - havanın ısı iletkenliği
 k_g - gazın ısı iletkenliği
 $k_{sürekli}$ - sürekli ortamın ısı iletkenliği
 $k_{dağılı}$ - dağılı fazın ısı iletkenliği
 k_T - teğetsel ısı iletkenlik (W/mK)
 k_R - radyal ısı iletkenlik (W/mK)
 $k_e()$ - (k_i, v_i, f) veya (k_i, v_i) tanımında parametrelere bağlı matematiksel fonksiyon
 L - lif uzunluğu veya lifin yarı uzunluğu (m)
 l - birim hücrenin yarı uzunluğu (m)
 L_o - buharlaşma gizli ısısı
 L_y - yalıtım kalınlığı (m)
 L_d - soğuk yüzeyden sıcak yüzeye mesafe (m)
 L_m - ayrılmış iki yüzey arası mesafe (m)
 M_A, M_B - A ve B maddelerinin moleküler ağırlığı (g/mol)
 M_s - mesh sayısı ($M_y = M_z$)
 \dot{m} - kütle geçişi
 m_1, m_2 - bağıntı parametreleri
 N - istatistikte verilerin sayısının toplamı
 N_n - metal folyoların sayısı
 n - lif ve polimer geometrilerine bağlı parametre
 n_d - laminate'deki kafes tabakalarının sayısı
 n_k - istatistikte o faktör grubu altındaki veri sayısı
 \bar{n} - gözenekli ortamın kırılma indeksi

- \bar{n}_d - dolgunun optik özelliklerinin bir fonksiyonu
 P - basınç
 P_3 - ışıınımda sabit
 p - istatistikte bir anlamlılık ölçüsü yada F'in olasılığı
 P_{doy} - doyma basıncı
 Q - ısı enerjisi (W)
 q - ısı akısı (W/m^2)
 $R_{\text{ü}}$ - universal gaz sabiti olup 8,314510 J/molK.
 R - boşluğun çapı veya küresel boşluğun yarı çapı (m)
 r_c - temas alan yarıçapı (m)
 $T_{\text{ış}}$ - yerel ışıınım sıcaklığı (K)
 S - doyma (%)
 sd - istatistikte serbestlik derecesi
 $s_{\text{ç}}$ - saçılma kesit yüzeyi
 $s_{\text{ğ}}$ - soğurma kesit yüzeyi
 s_{gr} - ortamın birim hacmi başına geri saçılım kesit yüzeyi
 s_p - istatistikte parametre değeri
 T_o - T_1 ve T_2 'nin ortalama sıcaklığı (K)
 T - sıcaklık (K)
 $T_a, T_{\text{ü}}$ - alt ve üst sıcaklık (K)
 $T_{\text{ç}}$ - çevre sıcaklığı (K)
 T_1, T_2 - ilk ve son sıcaklıklar (K)
 T_f - sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklar farkının yarısı
 t - süre (s)
 U - toplam iç enerji (W)
 V_A, V_B - A ve B maddelerinin molar hacmi (cm^3/mol)
 V - hacim oranı (%)
 V_d - dolgu yada dağılılı fazın hacim oranı (%)
 V_{ds} - dağılılı ve sürekli bileşenin hacim oranı (%)
 V_{d0} - sıkıştırmadan önceki başlangıç hacim oranı (%)
 V_s - sürekli fazın hacim oranı (%)
 V_{su} - suyun hacim oranı (%)
 V_{sv} - sıvı fazın hacim oranı (%)

$V_{sv,d}$	- dolgu fazda çözülmemiş sıvı miktarı (%)
V_{lif}	- lif fazın hacim oranı (%)
$V_{gk,n}$	- nemli gözenek hacim oranı (%)
V_i	- i. bileşenin hacim oranı (%)
V_M	- dolgu fazının maksimum paketleme oranı (%)
v	- gözenekli ortamdan geçen hız (m/s)
Y_{ijk}	- istatistikte ijk 'ye göre ölçülen değer
y	- sayısal değerleri bir tanımlama
W	- genişlik
w	- şekil faktörü veya gözenek, şekil, düzen ve yayılıma bağlı ampirik parametre veya fraktal boyut

Altsimgeler

a	- alt kısım
ag	- açık gözenek
$\ç$	- çevre
d	- dolgu yada dağılı
dif	- difüzyon
dr	- direnç
e	- efektif
$eş,d$	- eşdeğer difüzyon
$eş,t$	- eşdeğer taşınım
ex	- üs
ey	- esas yığın
g	- gaz
gk	- gözenek
h	- hava
$ış$	- ışınım
il	- iletim
i	- bileşen
k	- katı
kd	- kaldırma kuvvetleri
ky	- kayıp

kpl	- kapalı
M	- dolgu fazının maksimum paketleme oranı
n	- nem
s	- sürekli ortam
sğ	- soğuk
sk	- sıcak
sv	- sıvı
su	- su
s1,s2,s3	- kübik birim hücrenin yüzeyleri
t	- toplam
ü	- üst kısım
y	- yerel

Yunan Harfleri

α	- k_d/k_s iletkenlikler oranı
α_s	- sürekli ortamın ısı yayılımı
β	- indirgenmiş ısı parametre (faz dağılımının bağıl eğilimi)
$\beta_{ış}$	- ışıyım sönüm katsayısı
β	- indirgenmiş ısı parametrenin farklı formu
ΔP	- gözenekli ortamdaki basınç kaybı
Δx	- gözenekli ortamın (numune) kalınlığı
ΔT	- gözenekli ortamın sıcaklık farkı
γ	- akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)
δ	- lifin yarı kalınlığı veya birim hücrenin kalınlığı (m)
δ/L	- lif yarı kalınlığının lifin yarı uzunluğuna oranı
ϵ	- yayılım (emisivite) katsayısı
ϵ_1, ϵ_2	- L_y ile ayrılmış iki yüzeyin yayılımları
ϵ	- istatistikte hata
η_i^2	-istatistikte etki büyüklüğü
θ	- dağılı faz ve ısı akısı arasındaki eğim açısı
$\lambda_{ış}$	- boyutsuz ışıyım katkısı
λ_g	- boyutsuz gaz fazı iletkenliği

- λ_{il} - boyutsuz iletimle ısı iletkenlik
 λ_e - esas yığının indirgenmiş efektif ısı iletkenliği
 $\mu_{B(c.)}$ - B maddesinin dinamik viskozitesi (centipoises)
 ξ - ölçüm verilerine bağlı parametre
 ρ - yoğunluk (kg/m^3)
 ρ_o - akışın ortalama yoğunluğu (kg/m^3)
 ρ_e - gözenekli ortamın yoğunluğu (kg/m^3)
 ρ_d - dolgu lif yoğunluğu (kg/m^3)
 ρ_e/ρ_d - gözenekli ortamın yoğunluğunun dolgu lif yoğunluğuna oranı
 σ - Stefan-Boltzmann sabiti ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
 τ - tortusite
 v - ampirik katsayı
 X - gelişigüzel düzenlenmiş kürelere ait parametre faktörü
 X_{su} - su içeriği (%)
 $X_{su,0}$ - başlangıç su içeriği (%)
 $X_{ış}$ - efektif ışınım uzunluğu (m)
 x - istatistikte değişken ya da açığa ve şekil faktörüne bağlı üssel parametre
 $\partial x, \partial y, \partial z$ - x,y,z yönlerindeki diferansiyel
 μ - dinamik viskozite (Ns/m^2 , Pas, centipoises)

GİRİŞ

Doğada ve birçok mühendislik uygulamalarında gözenekli yapılar ile karşılaşmaktadır. Gözenekli malzemelerin yaygın kullanıldığı alanlardan biri, ısı yalıtım uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda yalıtım malzemesinin en önemli özelliklerinden biri, efektif ısı iletim katsayısıdır. Gözenekli ortamın efektif ısı iletkenliği, değişik mühendislik problemlerinin çözümünde etkili bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin yalıtım işlemlerinde, paketlenmiş katalitik reaktörlerde, kurutma işlemlerinde, soğutma içeren işlemlerde ve diğer işlemlerde etkisi görülmektedir. Dolayısıyla efektif ısı iletkenlik, malzemeler için belirlenmesi gereken önemli bir özelliktir. Efektif ve optimum ısı dizayn için, özellikle yalıtım performansı açısından malzemelerin efektif ısı iletkenlik ve ısı yayılım gibi ısı transferi özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Efektif ısı iletim katsayısı deneysel ölçümlerle ve matematik modellerle tespit edilebilen bir özelliktir. Deneysel ölçümlerin maliyetli olması yanında malzemeye bağlı olarak ölçme zorlukları da bulunmaktadır. Gerek maliyet ve gerekse uygulama kolaylığı açısından efektif ısı iletkenliği verecek modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda çok sayıda matematik model çalışmaları yapılmaktadır. Herhangi bir modelin doğruluğu ise, ele alınan malzemedeki fiziksel özelliklerin doğruluğuna, yapılan kabullere, dikkate alınan parametrelere ve tanımlanan uygulama sınırlarına bağlıdır. Efektif ısı iletkenliğinin hesaplanmasında ilave parametrelerin ve faktörlerin tanımının iyi yapılması gerekmektedir. Literatürdeki birçok efektif ısı iletkenlik modelleri, esas olarak birkaç temel modele dayandırılmaktadır. Hatta bu modeller, farklı formlarda sunulmaktadır. Literatürde yer alan modeller arasında seri, paralel, geometrik ortalama modeller, farklı formları ile Maxwell, Efektif Ortam modelleri v.b sayılabilir. Bu modeller genellikle, kompozit malzeme bileşimini ve yapısını dikkate almaktadır. Bu temel modeller dışında, ilave tanımlı ampirik bağıntılar içeren modeller yer almaktadır. Bu tür modeller ise, yapıdaki bileşenlerin veya gözeneklerin şekil, boyut, düzen, sıcaklık, temas etkisi veya faktörü gibi ilave parametrelerden bazılarını dikkate almaktadır. Bunlarla beraber temel ısı transferi mekanizmalarını ele alınan modeller de yer almaktadır. Birçok

modellemede olduğu gibi efektif ısı iletkenliğin tahmininde de, basitlik, doğruluk ve kapsam genişliği birlikte elde edilememektedir. Bu yüzden, her bir efektif ısı iletkenlik modelinin her gözenekli malzemede hassas tahmin yapması beklenmemelidir. Bu nedenle ısı iletkenlik modellerinin seçiminde, her biri ayrı ayrı tartışılmalı ve ele alınmalıdır. Tahminler, mevcut deneyler ile karşılaştırılarak farklılıklar ortaya çıkarılmalıdır. Bu amaçla tez çalışmasında, efektif ısı iletkenliğin tahmini için kullanılabilir matematik modeller basitten genele doğru incelendi ve sınıflandırmaya tabi tutuldu. Ayrıca bu modeller, literatürde tespit edilen ve farklı uygulamaları kapsayan bazı deneysel sonuçlar dikkate alınarak analiz edildi. Sonuçlar tablo halinde verildi ve modeller, uygulanabilirlik aralığı, kullanım kolaylığı ile değişik parametrelerin etkileri açısından değerlendirildi.

Genel olarak mevcut modeller, katı ve gözenekli ortamların ısı iletkenliklerini ele alır. Ancak, efektif ısı iletkenlik, temel ısı transferi mekanizmalarından etkilenmektedir. Dolayısıyla modelde iletim yanında, taşınım ve ışınım temel mekanizmalarını da dikkate almak gerekmektedir. Bazı modeller, bu mekanizmaları da değişik formlarda dikkate almaktadır. Bu çalışmada temel mekanizmaların dikkate alan ve gözenekli yalıtım malzemelerinde kullanılabilir matematik model geliştirildi ve literatürden alınan bazı deneysel verilerle karşılaştırıldı.

Gözenekli yalıtım malzemelerinde, temel ısı transferi mekanizmalarından ışınımın etkisi yeterince açık değildir. Bazı çalışmalardan yüksek sıcaklık uygulamalarında düşük emisivite ve yüksek iletkenlikte malzemelerle (altın, gümüş gibi) efektif ısı iletkenliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, çevre sıcaklıkları civarındaki sıcaklıklarda ışınım, taşınım ve difüzyon etkisini anlamak için deneysel olarak çalışıldı. Bu amaçla, gözenekli yalıtım malzemeleri (özellikle cam yünü, strafor malzemeleri gibi) farklı malzemeler ile (başta alüminyum ve bakır folyo olmak üzere) takviye edildi. Farklı malzemeler ile takviye edilmiş ikili, üçlü, dörtlü ve beşli tabakalı numunelerin efektif ısı iletkenlikleri incelendi. Efektif ısı iletkenliğe, farklı parametrelerin etkisi (madde cinsi, sıcaklık, sıcaklık farkı, ilave takviye gibi) deneysel olarak belirlendi. Bu parametrelerin önemi ortaya koyuldu. Son aşamada, uygulamalı bir deney seti yapılarak takviyeli ve takviyesiz durumda yalıtım etkisi gözlenerek

deneysel sonuçlar karşılaştırıldı. Elde edilen deneysel ve matematik model sonuçları ayrıntılı olarak verildi. Gözenekli yalıtım malzemelerinde ışınımın önemli bir mekanizma olduğu ve bu mekanizmanın amaca uygun kullanımı ile farklı özellikte tasarımlar yapılabileceği sonucuna varıldı.

Tezin araştırma sonuçları kısmında, modeller incelendi ve deneysel ölçüm sonuçları verildi. Bunun için, modeller literatürden alınan deneysel veriler ile incelendi ve yeniden değerlendirildi. Daha sonra çizelgelerde sunularak beraber yorumlandı. Mevcut modelleri, belirli yapılarda ve belirli gözeneklilik aralığında seçmek gerektiği sonucuna varıldı. Ayrıca, geliştirilen matematik model de literatürdeki deneysel veriler ile irdelendi ve farklılıkları belirlendi. Bu çalışmanın devamında farklı takviyelerde farklı gözenekli malzemelerin, farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin ölçüm sonuçları verildi. Bu sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırıldı ve sıcaklık, sıcaklık farkı, takviye ve malzeme etkileri ele alındı. Bu ölçülen efektif ısı iletkenlik verileri, SPSS 1.7 istatistik programı ile analiz edildi. Sıcaklık, sıcaklık farkı ve malzeme açısından değerlendirildi. Son aşamada, üçlü takviyeli numunelerin takviyesiz numunelere göre soğuma ve ısınma süreleri deneysel olarak incelendi. Bu takviyeli numunelerin efektif ısı özellikleri, analitik ifade ile tespit edildi. Yapılan deneylerden, sonuçlardaki farklılıkların takviyelenmiş yansıtıcı malzemeden kaynaklandığı ortaya çıktı. Sonuç olarak, daha iyi bir yalıtım özelliğine sahip takviyeli numuneler elde edildi.

1. KAYNAK ÖZETLERİ

Efektif ısı iletim katsayısının tespiti, 100 yıl önce Maxwell'in öncü çalışmasından bu yana teorisyenlerin dikkatini çekmiştir. Yaptıkları çalışmalarda, efektif ısı iletkenliğinin belirlenmesinde modellerin, simülasyonların, korelasyonların ve deneysel ölçümlerin kullanıldığı görüldü. Bu modeller, deneysel verilerle karşılaştırıldığında gerek içerdiği parametre sayısı gerekse kullanım sınırları açısından genel uygulamaya imkân vermemektedir. Bu, yalıtım, tekstil, kompozit, seramik gibi birçok uygulama alanında yer almasından da kaynaklanmaktadır. Buradan, gözenekli yapılarıdaki efektif ısı iletkenliğinin belirlenmesi kadar parametrelerin etkisinin de iyi tespit edilmesinin gerektiği görüldü.

Bu çalışmada, gözenekli ortamlardaki efektif ısı iletim katsayısı üzerine parametrelerin etkisi incelendi. Çalışmalar arasında gözenek, gözenekliliğin, katkı maddelerinin, gözenekleri dolduran gazların veya farklı fazların, ısı iletimi, hava geçirgenliği gibi termo-fiziksel davranışlar üzerine etkileri görüldü. Ayrıca, bu termo-fiziksel özelliklerin lif çapına, yoğunluğa, kalınlığa, sıcaklığa, sıcaklık farkına, gaz akışına bağlılığı araştırıldı. Bu bölüm, efektif ısı iletkenliğine etki eden parametreler açısından ele alınmış olup oluşturulan matematik modele ve deneysel çalışmaya katkı sağlayacağı görüldü.

1.1. Bileşenlerin ve Hacim Oranlarının Etkisi

Gözenekli malzemelerde yapıyı oluşturan maddelerin ve hacim oranlarının efektif ısı iletkenliğine etkisi, incelenen konulardan biridir. Oluşturulan kuramsal yaklaşımların çoğu bu temele dayanmaktadır. Bileşenlerin hacim oranları ve iletkenlikleri, başlıca parametreler olarak verilmektedir. Alpay ve ark. (1986) tarafından, farklı iplik sayıları, iplik yoğunlukları, dokuma özellikleri ve farklı malzemedeki dokunmuş numuneler incelenmiştir. Ölçümlerde, ısı transferinin kumaş örtüşme faktörünün artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Kumaş boyunca iletimle ısı

transferinin, malzemenin (fiberlerin) ısı iletkenliğine kuvvetli olarak bağı olduğu bulunmuştur. Tseng ve ark. (1997) tarafından, poliüretan köpüklerin ısı iletkenliği teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Poliüretan köpüğün ısı iletkenliği, köpük hücrelerinde gazların boşaltılması ile %70' a kadar azalmaktadır. Bu azalmanın, gaz bileşeninden kaynaklandığı görülmüştür. Bigaud ve ark. (2001), sonlu elemanlar metoduyla tekstil malzemelerini tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu modellemişlerdir. Lif hacminin, enine ısı iletkenliklerde %60'a kadar düşük bir artışa, sonra hızlı bir artışa neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Boyuna ısı iletkenliklerde ise doğrusal bir artış gözlemişlerdir. Gonzo (2002), sistemdeki kürelerin hacim dağılım oranının (>0,9 yüksek yoğunluklu ortam) artışı ile efektif ısı iletkenliğinin arttığını bildirmiştir. Farklı boyut dağılıma sahip gelişigüzel toplu parçacıklar (dikdörtgen, küp gibi düzensiz kristaller) ise, hem kuru hem de kısmen veya tamamen buharlaştırılmış ortamda Kohout ve ark. (2004) tarafından incelenmiştir. Katı faz hacim oranı sabit iken sıvı faz hacim oranı arttıkça $k_e/k_{katı}$ doğrusal olarak artmıştır. Burada sıvı faz hacim oranı 0-1,0 aralığında ve $k_{gaz}=0,01$ W/mK olarak alınmıştır. Aynı sıvı faz hacim oranı için katı faz hacim oranı arttıkça $k_e/k_{katı}$ artmıştır. Burada katı faz hacim oranı 0,50-0,70 aralığında ve $k_{gaz}=0,01$ W/mK olarak alınmıştır. Kuru halde üç boyuta sahip cam boncuklar ile iki hal için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiş ve aynı $k_{dağılı}/k_{sürekli}$ oranı için dağılı faz hacim oranı arttıkça ısı iletkenliğinin arttığı bulunmuştur. Woo ve Goo (2004) tarafından, karbon-fenolikli saten dokuma malzemesinin ısı iletkenliği belirlenmiştir. Toplam lif hacim oranının, efektif ısı iletkenlikleri (hem k_x 'in hem de k_z 'in) arttırdığı tespit edilmiştir.

Bileşenlerin ısı iletkenliğinin, efektif ısı iletkenliğe etkisi de incelenmiştir. Gonzo (2002), kürelerin kütle hacim oranı sabit (orta yoğunluklu:0,15-0,85) iken iki farklı bileşenden birinin ısı iletkenliğinin (0,0306-0,0369) ve sıcaklığının (100-140-160-200 °C) artmasıyla efektif ısı iletkenliğinin azalacağını vurgulamıştır. Fakat diğer bileşenin ısı iletkenliğinin (0,293-0,36) artmasıyla, efektif ısı iletkenliğinin artacağı belirtilmiştir. Carson ve ark. (2003) tarafından, sürekli fazın yüksek iletkenlikli olduğu çalışmada efektif ısı iletkenlik daha yüksek bulunmuştur. Kohout ve ark. (2004), sürekli fazın iletkenliğinin efektif ısı iletkenliğe etkisini incelemişlerdir. Dağılı fazın hacim oranı ve iletkenliği aynı olan bir ortamda, sürekli fazın iletkenliği 0,01'den 0,1'e

değişirse efektif ısı iletkenliğin arttığını bulmuşlardır. Bu etkinin, dağılı faz hacim oranı düşük iken çok daha fazla olduğu bulunmuştur. Carson ve ark. (2005) ise, 4 farklı ısı iletkenlik oranı ele almışlardır. Bu oran arttıkça, seri ve paralel modellerin aralığının genişlediği ve ısı iletkenliği tanımlamada belirsizliğinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Farklı tip malzemelerde de, efektif ısı iletkenliğin içerik miktarından etkilendiği görülmüştür. Tavman (1998) tarafından, matriks içi dağılı haldeki kalay tozuyla doldurulmuş yüksek yoğunluklu poliüretan kompozitlerde (izotropik) kalay konsantrasyonunun artışıyla ısı iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. Ancak, bu artış %10 konsantrasyona kadar oldukça yavaş iken %10'dan sonra oldukça hızlı bulunmuştur. $k_{dolgu}/k_{matriks}$ yeterince yüksekse, ısı iletkenliğin sadece dolgu içeriğinin konsantrasyonuna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Tichá ve ark. (2005) tarafından, kapalı gözenekli mikroyapıya sahip Zirconia malzemesinde bu etki incelenmiştir. Bu malzemenin ısı iletkenliğinin yttria malzeme içeriğine ve uygun oksijen konsantrasyon içeriğine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Sürekli bir ortam içinde gelişgüzel dağılı şekilli parçacıklar olan çok gözenekli iki fazlı sistemler, Singh (2004) tarafından incelenmiştir. Katı fazın hacim oranı arttıkça ısı iletkenliğin arttığı bulunmuştur. Ayrıca, alüminyum/su ve alüminyum/hava numuneleri katı fazın hacim oranı sabit iken karşılaştırılmıştır. Su içerikli örneğin efektif ısı iletkenliği arttığı görülmüştür. Aynı zamanda Singh ve Kasana (2004) yaptıkları çalışmada, sıvı fazın hacim oranının azalmasıyla ısı iletkenliğin arttığı sonucuna varılmıştır. Bileşenlerin ısı iletkenliklerine ısı iletkenliğin kuvvetli olarak bağlı olduğu, Singh ve ark.'nın (2005) çalışmasında da bulunmuştur. Cam gibi $Se_{100-x}In_x$ ($x=0,5,10,15$ ve 20) örnek alaşımlar, Singh ve ark. (2005) tarafından incelendiğinde indiyum konsantrasyonun %10'a kadar artışıyla ısı iletkenliğin arttığı ve %10'da maksimuma ulaştığı bulunmuştur. Ancak %10 sonrası, konsantrasyonun artmasıyla ısı iletkenliğin lineer olarak azaldığı görülmüştür. Ara yüzey kabuklara sahip nano akışkanların efektif ısı iletkenliği ise, Xue ve Xu (2005) tarafından incelenmiştir. Hem Al_2O_3 hem de CuO hacim oranı artışıyla ısı iletkenliğin arttığı vurgulanmıştır.

Gemci (1996) tarafından, lif takviyeli kompozit malzemelerde ısı iletim katsayısı üzerine yapılan çalışmada, lif takviyesinin cinsinin, hacimsel yüzdesinin ısı iletkenlik üzerinde etkili olduğu bulunmuştur. Sablani ve Rahman (2003) ise çeşitli sebzeleri ve meyveleri (elma, armut, mısır unu, kuru üzüm, patates, yumurta albumini, sakaroz, nişasta, havuç ve pirinç) kullanarak çalışma yapmıştır. Aynı nem içeriğinde ürün farklılığının, efektif ısı iletkenliği değiştirdiği bulunmuştur. Katı, sıvı, gaz fazların etkilerini içeren bir model ile bu fazların ısı iletkenlikleri Hu, ve ark. (2001) tarafından incelendiğinde direkt olarak etkilediği bulunmuştur. Barea ve ark. (2005) tarafından verilen modele göre sürekli fazın iletkenliği ve boşluklardaki argon gazının iletkenliği arttıkça ısı iletkenliğin artacağı bulunan bir sonuçtur. Ayrıca, Zhang ve Fang (2006) tarafından parafin/genişletilmiş grafit kompozitin ısı transferinin genişletilmiş grafit ile arttığı vurgulanmıştır. Diğer yandan, Ying ve ark.(2004) tarafından faz değişim malzeme kullanım oranıyla tekstil kompozit malzemenin ısı iletim katsayısının düştüğü tespit edilmiştir.

Tekstil takviyeli malzemelerin efektif ısı iletkenliğini modelleme ile ilgili Bigaud ve ark. (2001) çalışma yapmışlardır. Bu tekstil takviyeli malzemeler, düzenli elemanlardan oluşan ve izotropik olmayan (değişik halli) heterojen ortam olarak ele alınmıştır. Burada, tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu modelleme sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonunda, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelleme, efektif ısı özellik üzerine farklı malzeme yüzeylerinde karşılaşılan sınır veya periyodik şartların ve sıcaklığın etkisini ele almaktadır. Modelleme, iplik içindeki ince tellerin bükümünü de ele alarak geliştirilmiştir. Sonuçlarda aynı sıcaklıkta boylamsal ısı iletkenliğe göre enine ısı iletkenlik düşük bulunmuştur. Aynı lif hacmi için k_x ve k_y düzlem iletkenlikleri enine ısı iletkenliğe göre yüksek elde edilmiştir. Üç boyutlu malzeme için, efektif iletkenlik modelinin çok fazla saptığı tespit edilmiştir.

Gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliği için Gonzo (2002) tarafından tahmini korelasyonlar geliştirilmiştir. Seyrelik dağılımlı kürelerin ısı iletkenliği için en iyi bilinen Maxwell'in çözümüne ve Chiew ve Glandt tarafından geliştirilen Maxwell'in geliştirilmiş form denklemi verilmiştir. Bu denklemlere dayanarak efektif ısı iletkenlik için iki genel korelasyon önerilmiştir. Bunlardan biri orta yoğunluk dağılımlarına (0,15

$\leq V \leq 0,85$) ve diğeri yoğun malzemelere ($V > 0,9$) uygulanmıştır. Her iki korelasyon denklemi, faz iletkenlik oran değerlerinin geniş bir aralığını kapsamaktadır. Deneysel sonuçları ile karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu bulunmuştur.

Gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliği üzerine malzeme yapısının etkisi, Carson ve ark. (2003) tarafından sonlu elemanlar simülasyonları kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca sonlu eleman simülasyon modelleri ile sürekli hal ısı iletkenlik ölçüm cihazını simüle etmiştir. İlave boyutun etkisini, ilave şeklin etkisini, sürekli/dağılı fazların bağlı etkisini ve ilaveler arasındaki temasın büyüklüğünün etkisini incelemek amacıyla dört simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda taşınım veya ışınım ile temas direnci ve ısı transferi ihmal edilmiştir. İlave şeklin etkisini araştırmak amacıyla, daireler içeren ve benzer kare ve dikdörtgen ilaveler içeren sonlu eleman gridlerde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sürekli/dağılı fazların bağlı etkilerini incelemek amacıyla aynı bileşen dağılımlarına sahip iki sonlu eleman grid üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlaveler arasında temasın büyüklüğünün etkisini araştırmak amacıyla, Maxwell tipi ve Kirkpatrick tipi yapılar arasındaki farklılık incelenmiştir. Bileşenlerin ısı iletkenlik oranları ve hacim oranlarına ilaveten sürekli ve dağılı fazların tanımı ve ilaveler (dâhil edilenler) arasındaki temasın derecesi, etkili değişkenler olarak verilmiştir. Efektif ısı iletkenliğinin tahmini yapılırken dış gözenekliğe sahip malzemelerin, iç gözenekliğe sahip malzemelerden ayrı düşünülmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bütün gözenekli malzemeler için sadece bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranları ile gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin fonksiyonu olan bir model beklemenin gerçekçi olmayacağı belirtilmiştir. Eğer ilave bir parametre efektif ısı iletkenlik modeline dâhil edilirse bu, ilaveler arası temasın büyüklüğü ile ilişkili olması gerektiği ifade edilmiştir. Çünkü bu değişken, özel şekil ve boyuttan daha çok etkili olduğu görülmüştür. Seri, paralel, Maxwell-Eucken ve Maxwell-Hamilton modelleri, çalışmada verilmiştir.

1.2. Gözenekliliğin Etkisi

Benzer olarak, gözeneklilik ile ilgili yapılan çalışmalardan, gözeneklilik artışının ısı iletim katsayısını azalttığı söylenebilir. Literatürden elde edilen sonuçlar, ısı iletkenliğinin gözeneklilikle ters orantılı olduğunu göstermiştir. Ghodoossi (1988), gözeneklilik derecesinin ısı iletkenliğe etkisini incelemiştir. Bu durum hem deneysel hem teorik olarak ele alınmış ve gözenekli cismin ısı iletim katsayısı için analitik ifadeler bulunmuştur. Bu çalışmada, tuğla ve beton gibi gözenekli malzemeler üzerine çalışılmıştır. Gonzo (2002) tarafından, malzemedeki kürelerin dağılım yoğunluklarına göre modellenmesi verilmiştir. Seyreltik dağılımlı küreler için en iyi bilinen Maxwell çözümü, farklı yoğunluklu malzemeler için geliştirilerek uygulanmıştır. Carson ve ark. (2003) tarafından, efektif ısı iletkenliğinin tahmininde dış gözenekliliğe ve iç gözenekliliğe sahip malzemeler olarak ayrı düşünülmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Farklı malzemelerde yapılan çalışmalarda da gözenekliliğin önemli bir etkiye sahip olduğu ve genelde ısı iletkenliği azalttığı görüldü. Hu ve ark. (2001) tarafından, hem kuru hem de neme doymuş halde iken gözeneklilik artışının etkisi incelenmiştir. Isı iletkenlik değişiminin çok yavaş azaldığı görülmüştür. Bu değişim, basınç-doyma ilişkisine (Leverret-Lewis bağıntısına) dayanarak oluşturulan model ile tespit edilmiştir. Ayrıca, Pabst ve Gregorová (2006) ısı iletkenliğinin gözenekliliğe bağlılığını 2. dereceden basit bir ilişki ile ispat etmişlerdir. Gıdalar üzerine Sablani ve Rahman (2003) tarafından yapılan çalışmada, elmanın ısı iletkenliğinin pirince göre (gözeneklilik nedeniyle) daha az olduğu saptanmıştır. 0-0,65 aralıkta geniş gözeneklilik ve ortalama gözenek boyutları için Carson ve ark.'da (2004) aynı sonuca ulaşılmıştır. Bu etki, Carson ve ark.(2005), donmuş ve donmamış gıdalarda da incelemiştir.

Farklı olarak, Cernuschi ve ark. (2004) tarafından katı zirconia malzemelerin ısı iletkenliği incelenmiştir. Gözenekliliğin artmasıyla, ısı iletkenliğinin azaldığı ortaya konmuştur. Diğer yandan, katı zirconia malzemesinin ısı iletkenliğine mikro çatlakların etkisini ele almışlardır. Çatlak gözenekliğinin azalması (daralma) ısı iletkenliğinin artmasına neden olduğu bulunmuştur. Sinterlenmemiş ve sinterlenmiş gözenekli

ortamlarda Jiang ve ark. (2004), deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadan, gözeneklilik arttıkça efektif ısı iletkenliğinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Sinterleme sonucu, gözenekliliğin değiştiği ifade edilmiştir. Jang ve Matsubara (2005) ise, zirconia alt tabakalarda yer alan mikron ve nano boyutlu gözenekli $ZrO_2-4mol\%Y_2O_3$ kaplama tabakaların ısı iletkenlik ölçümlerini gerçekleştirmiştir. %8-28 gözeneklilik aralığında yapılan incelemede, gözeneklilik artışının ısı iletkenliği azalttığı görülmüştür. Barea ve ark.(2005), $\approx 30-42 \mu m$ küresel çapta gözeneklere sahip mullite (%35-60) malzemelerde, Maqsood ve Kamran (2005) 5 tip gözenekli (%8-17) kumtaşlarında ısı iletkenliği çalışmışlardır ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca Maqsood ve Kamran (2005) gözenekliliğin, gözenek dolgusundan ve açık yoğunluktan daha büyük bir katkısı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Tichá ve ark. (2005), kapalı gözenekli mikroyapıya sahip izotropik malzemelerde gözenekliliğin artışıyla bağlı ısı iletkenliğinin exponansiyel olarak azaldığını ifade etmiştir. Gözenekli nano yapılarda ise, gözeneklilik artışının ısı iletim katsayısını azalttığı Lysenko ve Volz (2000) tarafından gözlenmiştir. Munagavalasa ve Pillai (2006) tarafından, gözenekli lifler ve çevresindeki boşluklardan oluşan iki fazlı sistemi incelemiştir. Efektif ısı iletkenliğinin, boşluk bölgesinin yapısına ve gözenekliliğine bağlı olarak reçine absorpsiyon oranındaki artış ile ne arttığı ne de azaldığı görülmüştür. Lifler arasındaki boşluğun artışıyla efektif ısı iletkenliğinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Ghodoossi (1988), model gözenekli cisimler tasarlanmış ve gözeneklerin kuru veya nemli hava ile dolu oldukları hallerde ısı iletim katsayısı için analitik ifadeler elde etmiştir. Nemin gözenekli cismin ısı iletim katsayısı üzerine etkisi, nem ile birlikte yükselmiştir. Tuğlada hava boşluklarındaki ısı geçişi, hava ile dolu kapalı hacimde tek boyutlu ısı geçişi olarak ele alınmıştır. Bu, hem kuru hem de yaş gözenekli cisimler için tasarlanmıştır. Fakat katı madde ve saf hava bileşenlerine ek olarak su ve su buharı hava bileşeni ilave edilmiştir. Teorik olarak analizi yapılarak sıcaklık profili ve ısı geçişi ifadeleri Rayleigh (Ra) sayısına göre bulunmuştur. Gözenekli malzeme ve hava boşlukları için elde edilen bağıntılar ile tuğla modelinin efektif ısı iletim katsayısı, gözeneklilik derecesine bağlı olarak hesaplanmıştır ve eğrileri çizilmiştir. Kuru tuğla modelinde ise sıcaklık profili elde edilmiştir. Tuğlanın katı kısımlarında doğrusal bir sıcaklık profili mevcutsa da aynı durum hava boşluklarında Ra Rayleigh sayısının

değerine göre değişmiştir. Son olarak, tuğlanın soğumasında gözeneklilik derecesinin etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, yaş gözenekli cismin ısı iletim katsayısı, $k_{su} > k_{hava}$ olduğundan büyüyecektir. Kuru tuğla da olsa, içinde bir miktar gizli nem içerecektir. Eğer havadaki nem oranından düşük ise, dengeleninceye kadar nemlenecektir.

1.3. Sıcaklığın Etkisi

Malzemelerde ortalama sıcaklığın önemli olduğu görüldü. Genelde yüksek gözenekliliklerde incelendiğinde ısı iletim katsayısının arttığı görülmüştür. Tseng ve ark. (1997) tarafından, poliüretan köpüklerde 20-300 K sıcaklıkları arasında deneysel çalışma yapılmıştır. Sonuçta sıcaklığın artması ile iletkenliğin arttığını, ancak oda sıcaklıklarında azaldığını gözlemişlerdir. Olay kuramsal olarak ta incelenmiştir. Bigaud ve ark.'a (2001) göre, bazı tekstil takviyeli kompozitlerde sıcaklık artışının iletkenliği arttırdığı görülmüştür. Bigaud ve ark. (2001) tarafından, efektif ısıl özellik üzerine farklı malzeme yüzeylerinde karşılaşılan sınır veya periyodik şartların ve sıcaklığın etkisini ele almışlardır. Tekstil takviyeli malzemelerin efektif ısıl iletkenliği, sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiştir. Sıcaklıkla, efektif ısıl iletkenliğin arttığı görülmüştür. Zarr ve Filliben (2002) tarafından, 4 ısıl yalıtım malzemesinin (lifli cam ve genişletilmiş polistrene referans malzemeler) ortalama sıcaklığının azalmasıyla (oda sıcaklığına göre) laboratuvarlar arasındaki bağıl sapmaları arttırdığı gözlenmiştir. Thomann ve ark.'nın (2004) çalışmasında, karbon lifli kumaşlarda sıcaklığın ısıl iletkenliği bir miktar azalttığı (kristalizasyon sıcaklığına kadar) ve üstünde ise değiştirmedeği görülmüştür.

Sıcaklığın, farklı malzemelerde farklı etkiye sahip olduğu görülmüştür. Tavman (1998) tarafından kalay tozu ile doldurulmuş yüksek yoğunluklu poliüretan kompozitler, 0-70 °C sıcaklıkları arasında deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçta farklı parçacık konsantrasyonları da dahil olmak üzere sıcaklık artışı ile iletkenliğin azaldığını göstermiştir. Yüksek konsantrasyonlarda ise ısıl iletkenlik değişimi daha hızlı gerçekleşmiştir. Cernuschi ve ark. (2004) tarafından katı zirconia malzemesinde sıcaklık (150-1250 °C aralıkta) artışının ısıl iletkenliği azalttığı bildirilmiştir. Ancak 3. tekrarda

$T > 800$ durumunda artmıştır. Maqsood ve Kamran (2005) tarafından 5 tip gözenekli kumtaşın (%8-17) iletkenliği 280-330 °C sıcaklıklarda incelenmiştir. İletkenliğin sıcaklık artışı ile arttırdığı görülmüştür. Fakat bir örnekte, 310 K ile azalmıştır. Barea ve ark. (2005) tarafından $\approx 30-42$ μm küresel çapta gözeneklere sahip mullite (%35-60) malzemenin iletkenliği ele alınmıştır. Sonuçta sıcaklık artışıyla (ortam sıcaklığından 1000 C'ye kadar) $\geq \%45$ 'e kadar yaklaşık sıcaklıkla sabit kaldığı görülmüştür. Ancak yoğun yapıda azaldığı tespit edilmiştir. Özel bir çalışmada (Barea ve ark. 2005), sürekli fazın ısı iletim katsayısı azalan bir madde olduğundan düşük gözeneklilik için azaldığı gözlenmiştir.

Hamdami ve ark. (2003) tarafından, yüksek gözenekli malzemelerde -35 ile 25 °C arası sıcaklıklarda kuru ve nemli halde sıcaklık artışı incelenmiştir. Kuru halde sıcaklık artışı ile iletkenlikte artma nemli halde ise azalma gözlenmiştir. Sablani ve Rahman (2003) tarafından, sebze ve meyvelerde (elma, armut, mısır unu, kuru üzüm, patates, yumurta albumini, sakaroz, nişasta, havuç ve pirinç) -42 ile 130 °C sıcaklık aralığında ısı iletkenlikleri araştırılmıştır. Aynı nem içeriğinde sıcaklığın azalması ile arttığı görülmüştür.

20 K ve 300 K sıcaklık aralığında poliüretan köpüğün ısı iletkenliği, Tseng ve ark. (1997) tarafından teorik ve deneysel olarak araştırıldı. Ayrıca, ışınlama ısı transferi katkıları içeren bir analitik model, poliüretan köpüklerin tahmini için kullanılmaktadır. Model, normal ve indirgenmiş basınçlar altında poliüretan köpüklerin ısı iletkenliğini mutlak olarak tahmin edebilmek için kuruldu. Poliüretan köpüğün ısı iletkenliği, köpük hücrelerinde gazların boşaltılması ile %70' a kadar azalmaktadır. Işınlama ısı transferi, oda sıcaklığında yaklaşık %10-20 için hesaplamaya dahil edilerek kurulmuştur. Boşluk alanı ve katı duvarların etkilerini düşünen Russell modeli, bir gözenekli ortamın efektif ısı iletkenlik hesaplaması için önerilmektedir. Burada ışınımın katkısı, ışınlama ısı iletkenlik ile bağımsız olarak hesaplanmıştır. JIS standart A1412 dayalı olarak bir deney seti, çeşitli sıcaklık ve basınç şartlarında köpüklerin ısı iletkenliğini ölçmek için kuruldu. Deney seti, sürekli silindiriksel metodunu kullanmaktadır. Sistem, vakum odası, vakum pompası, iki aşamalı soğutucusu, bir dijital kaydetici, bir sıcaklık ölçer ve bir bilgisayar yer alan test bölgesinden meydana gelmektedir. Elde edilen sonuçlara

göre yüksek sıcaklık bölgesindeki fark, ya hücreler içinde gaz bileşiminin belirsizliğine, saf katı iletkenliğe yâda poliüretan köpüğün ışınım özelliklerine yorumlanmaktadır. Bununla birlikte kapalı hücrelerdeki gaz iletimi nedeniyle gazı tahliye etme, gaz poliüretan köpüğün ısıl performansını çok geliştirmektedir. Işınım ile ısı transferinin düşük sıcaklık bölgesinde önemli olmadığı fakat oda sıcaklık bölgesinde yaklaşık %10-20 olduğu ifade edilmektedir. Oda sıcaklığında bunun ısıl performansını arttırmak için, poliüretan köpüklere muhtemelen R141b ve CO₂ gazlarının yüksek bir yüzde oranı ile üflenilmesi önerilmiştir. Saf poliüretan katının ısıl iletkenlik verileri, poliüretan köpüklerin ısıl iletkenliğinin daha kesin teorik tahminleri için gereklidir.

Zarr ve Filliben (2002), lifli cam ve genişletilmiş polistren referans malzemeleri kullanarak muhafazalı sıcak plakanın etkisini ele almışlardır. Bu çalışmada, dört yalıtım referans malzemesinin ısıl iletkenlik ölçümleri sunulmaktadır. Ölçümler, Kanadaki, Fransa'daki, Japonya'daki, Birleşik Krallıktaki ve Amerika'daki muhafazalı sıcak plaka laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Her bir referans malzemenin, 297,15 K sabit sıcaklıktaki 5 bağımsız ölçümünü ve 280 K, 290 K, 300 K, 310 K ve 320 K sıcaklıktaki tek noktadan ölçümünü ele almışlardır. Buradan, laboratuvar-malzeme etkileşiminin varlığı tespit edilmiştir. Hem yerin hem malzemenin değişmesiyle, laboratuardan laboratuara farklılıklar elde edilmiştir. Tekrar verilerindeki değişim (laboratuvar hem içinde hem arasında) incelendi ve bunu oluşturan nedenler araştırıldı. Ayrıca, 280 ve 320 K arası sıcaklık verilerinin analizleri yapıldı. Bu analizlerin, (297,15 K sabit sıcaklıktaki tekrar verilerinde elde edilen) laboratuvar malzeme etkileşimi sonuçlarını desteklediği görülmüştür. Birçok sıcaklıkta yapılan ölçüm sonuçlarından, 297,15 K sıcaklıktan sonra laboratuvarlar arasında bir artış farkı bulunmuştur. Kanadaki, Fransa'daki, Japonya'daki, Birleşik Krallıktaki ve Amerika'daki muhafazalı sıcak plaka laboratuvarlar, 4 bölgesel/ulusal referans malzemenin ısıl iletkenlik sonuçları açısından ele alınmıştır. Bu malzemeler, SRM 1451 (lifli-cam kapsayan bir malzeme), IRMM-440 (reçine kaplı fiber levha malzemesi), JTCCM'e "aday" mineral oksit levha ve SRM 1453 (genişletilmiş polistren levha) referans malzemeleridir. İki temel faktörlerin etkileri (laboratuvar ve malzeme) yanında sıcaklıkta değerlendirilmiştir. SRM 1453 malzemesi dışındaki malzemelerin efektif ısıl iletkenlikleri, her biri için laboratuardan laboratuara farklılık göstermiştir. Beklendiği üzere, malzemenin malzemeye bir

farklılık vardır. SRM 1451 malzemesi, en yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. IRMM-440, en düşük ısı iletkenliğe sahip malzemedir. Malzemedeki farklılık, laboratuardan laboratuara olan farklılıktan daha büyüktür. 297,15 K sıcaklıktaki tekrar verilerinin ikisi, anormal olarak tanımlandı. Bu verilerin davranışı, laboratuvarların fiziki sebeplerinin belirlenmesinden sonra anlaşıldı ve bu veriler dışarıda bırakıldı. Ardından laboratuvardaki farklılıklar incelendi ve ulusal standart laboratuvarlar için %1,5'lük minimum bir mühendislik farklılığı kabul edilmiştir. Diğer çalışmalarda %1,5'den daha az farklılıklar mühendislik açısından önemsiz düşünülmektedir. Bu ölçüm farklılıklarının, numune yüzeyine ilave sıcaklık sensörleri yerleştirilmesi durumunda, değişebileceği ifade edilmiştir.

Thomann ve ark. (2004), dört kat kumaş yığınlarının kalınlığı boyunca sıcaklık profilini deneysel olarak hem ısıtma hem kalıplama esnasında incelemiştir. Karbon ve poli lifli takviyeli ipliklerin birleştirilmemiş dokuma kumaşları, baskı biçimlendirmeye tabi tutulmuştur. Bileşik ısı transferi ve katılma modeli ile tanımlanmaktadır. Isı üretim terimini içeren enerji dönüşüm ısı denklemleri, sonlu farklar metodu ile çözülmüştür. Ayrıca, katılma ilerleyişi sırasındaki yoğunluk ve ısı iletkenlik gibi değişken malzeme parametreleri hesaplanarak çözülmüştür. Önerilen model, deney verileri ile uyumlu sıcaklık profillerini vermektedir. Üstelik bu bileşik ısı transferi ve katılma modeli, boşluk içeriğini tahmin edebilmektedir. Çeşitli işlemlerde ve iplik yapılarındaki boşluk içeriği değişiminin simülasyonu, bu modelle sağlanabilmektedir.

1.4. Şekil Faktörünün ve Konumun Etkisi

Gözeneklerin şekli ve malzeme içindeki durumu da ısı iletkenliğe kısmen etki eden faktörler olarak görüldü. Değişik malzemeler ve şekiller için yapılan çalışmalarda, genelde şekil faktörünün etkisinin sınırlı ve küçük olduğu anlaşıldı. Carson ve ark.'a (2003) göre, gözenek/tanecikler arasındaki temas büyüklüğü ve bileşenler, gözeneklerin/taneciklerin boyutundan/şeklinden daha önemli faktörlerdir. Daire ve kare ilaveler ile yapılan efektif ısı iletkenlik sonuçlarında, iki şekil arasında maksimum sapma %2,6'dır. Dikdörtgen ilaveler kullanıldığında daire ilavelere göre farklılıkları standart sapmadan büyük (gözenekliliğin 0,15 dışında) bulunmuştur. Ancak zayıf bir

bağlılığın olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca efektif ısı iletkenliğinin tahmininde dış gözenekliğe sahip malzemeler, iç gözenekliğe sahip malzemelerden ayrı düşünülmesi gerektiği belirtilmiştir. Carson ve ark.(2005) şekil etkisinin önemsiz olduğunu vurgulamıştır. Ancak, lifli tekstil malzemelerin lif yapısının önemli olduğu görülmüştür (Alpay ve ark 1986). Liflerin bükülü olması veya büküm derecesi, enine ve boyuna (malzemeye) yerleştirerek incelenmiştir. Malzemenin örtüşme özelliğini etkileyen iplik bükümünün, giysiden transfer edilen ısıyı değiştirdiği bulunmuştur. Bigaud ve ark. (2001) ise, tekstil takviyeli malzemelerin enine ve boyuna iletkenliklerini aynı lif hacmi için ölçmüşlerdir. Enine ölçümlerde, daha düşük iletkenlik elde edilmiştir. Bunların dışında, gözenek dağılımları, yapıları, ıslanma gibi etkilerde ele alınmıştır. Tekstil ürünlerinin yüzey gözenekliliği, hava geçirgenliği, iplik düzgünlüğü, çapı gibi faktörlerle iletkenlik ilişkileri incelenmiştir. Benzer olarak Park ve ark. (2004), bükülü ve ince tel iplik tipi karbon kumaşlar ile takviye edilmiş malzemelerin enine ve boyuna ısı iletkenliklerini 1100 °C'de incelemiştir. Bükülü tip malzemelerin boyuna ısı iletkenliği, ince telli malzemelerin ısı iletkenliğinden % 7 daha düşük bulunmuştur. Ancak bükülü malzemelerin enine ısı iletkenliği, ince telli malzemelerin ısı iletkenliğiyle aynı olduğu görülmüştür. Thomann ve ark. (2004) ise, enine ısı iletkenliği boyuna ısı iletkenliğe göre daha düşük bulmuştur. Karbon lifli ve poli lifli karıştırılmış ipliklere sahip dokuma kumaşlardan oluşan dört katlı kumaş yığınlarının, enine ve boyuna ısı iletkenlikleri ölçülmüştür. Woo ve Goo (2004), saten dokuma kumaşların iletkenliklerini teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Bu kumaşların, enine ve boyuna iletkenlikleri, lif oranları ve rejime ulaşma süreleri incelenmiştir. Deneysel olarak, k_x ortalama iletkenliği, k_z yönündeki ortalama iletkenlikten düşük bulunmuştur. Ayrıca, Seo ve ark.'nın (2005) teorik ve deneysel yaptıkları çalışmada büküm derecesi bir açıyla tanımlanmış ve oluşturulan model de deneysel olarak test edilmiştir.

Gözeneklerin şekli ve malzeme içindeki durumu da ısı iletkenliğine kısmen etki eden faktörler olarak görüldü. Değişik malzemeler ve şekiller için yapılan çalışmalarda genelde şekil faktörünün etkisinin sınırlı ve küçük olduğu anlaşıldı. Carson ve ark. (2003, 2005) ve Singh ve Kasana (2004) şekil etkisinin önemsiz olduğunu belirtirken, Kohout ve ark.(2004) küp ve küre arasındaki farkın belirgin olduğunu vurgulamıştır.

Singh ve Kasana (2004), bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve gözenekliliği dışındaki faktörlerin efektif ısı iletkenlik üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kohout ve ark. (2004) ise, farklı boyut dağılıma sahip gelişigüzel toplu küresel parçacık/düzensiz kristal (dikdörtgen, küp) topluluklarının efektif ısı iletkenliği hot-wire metoduyla ölçülmüştür. Kuru haldeki küre ve küp arasında farkın belirgin olduğunu bulmuşlardır. Kürelerin efektif ısı iletkenliği daha büyük bulunmuştur. Carson ve ark.'a (2005) tarafından, iç ve dış gözenekliliğe sahip malzemelerin iletkenlik sınırları incelendiğinde, farklı oldukları bulunmuştur. Bu yüzden, tanecikli tip (dış gözenekli) ve köpük tipi (iç gözenekli) gözenekli ortamlar olarak ayırmıştır. Brucker ve Majdalani (2005) tarafından değişik şekillerin (düzlem plaka, silindir, koni, küre, spheroid, disk, küp tetragonal) ve yerleştirme açılarının etkilerini incelemişler. Pabst ve Gregorová (2006) tarafından, ısı iletkenlik bağıntısı gözenek tipi ve açık/kapalı olup olmaması açısından verilmiştir.

Çeşitli giysi numunelerinin/dokuma kumaşlarının hava geçirgenliği ve ısı transferi özellikleri, Alpay ve ark. (1986) tarafından analiz edilmiştir. Farklı iplik sayıları, iplik yoğunlukları, dokuma özellikleri ve farklı malzemeden dokunmuş numuneler incelenmiştir. Isı transfer ölçüm aygıtında, elektrik ısı kaynağı, ısı kaynağına karşı gergin yerleştirilmiş kumaş örneği, kumaşın diğer yüzeyinde dairesel bakır plaka ve bakır plakaya (merkezde 1 ve çevresinde 3 adet) sabitli termoelemanlar yer almaktadır. Isı transferi, kumaş örtüşme faktörünün artması ile çok yavaş olarak azalmakta buna karşın hava geçirgenliği hızlı olarak azalmaktadır. Bunun nedeni olarak, ısı transferinin sadece sıcak havanın taşınımıyla ısı transferine bağlı olmadığı, aynı zamanda tekstil malzemesinden ve hava moleküllerinden oluşan giysi boyunca ısı transferine de bağlı olduğu anlaşılmıştır. Kumaş boyunca iletimle ısı transferinin, liflerin ısı iletkenliğine kuvvetli olarak bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, kumaşın örtüşme özelliğini etkileyen parametre ipliğin bükümüdür. İplik bükümü, örtüşme faktörü, kumaş boyunca havanın ve fiberin iletkenliği, ısı transferi açısından önemli parametrelerdir.

Park ve ark. (2004) tarafından, bükülü iplik tipi ve ince tel iplik tipi karbon kumaşlar ile takviye edilmiş fenolik malzemelerin ısı özellikleri 1100 °C'de

karşılaştırılmıştır. Isıl yayılım katsayısı ve ısı iletkenlik, boylam ve enine olarak ölçülmüştür. Boylam ısı iletkenlik, bükülü tip malzemelerde ince tel malzemelerden % 7 daha düşük bulunmuştur. Sonuç olarak, bükülü iplik tip karbon kumaşların malzemelerin ısı özelliklerinin gelişmesinde önemli katkı sağladığı görülmüştür.

Woo ve Goo (2004) tarafından, karbon-fenolikli saten dokuma malzemesinin ısı iletkenliği belirlenmiştir. Saten dokumanın birim hücresi tanımlanarak, 3 boyutlu sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Mikro yapısal parametrelerin (lif hacim oranı gibi) ve sınır şartlarının etkisi (sıcaklık, ısı akısı) araştırılmıştır. Ayrıca, dokumanın ısı iletkenlikleri deneysel veriler ile ölçülmüş ve model sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerde efektif ısı iletkenlik, sürekli halde ısı iletkenliği bilinen referans malzeme ve ölçülecek numune arasındaki sıcaklık farklılığı karşılaştırarak elde edilmektedir. Test numunesinin ve referans malzemenin sıcaklık farkları incelendiğinde, sürekli hale z-yönünde 80 dk'da x-yönünde 60 dk'da ulaşıldığı görülmüştür. Deneysel verilerde, k_{xx} ortalama ısı iletkenliği k_z yönündeki ortalama iletkenlikten düşük bulunmuştur. Deneysel veriler ile sonlu elemanların sonuçları, k_x ve k_z yönlerindeki iletkenlikler açısından incelenmiştir. Bu iletkenliklerdeki fark, x yönünde %16,1 iken z yönünde %4,44 olarak bulunmuştur. Ayrıca, birim hücreye sıcaklık ve ısı akısı sınır şartları uygulanarak efektif ısı iletkenlikler üzerine sınır şartlarının etkisi incelenmiştir. Sınır yakın bölgede etkili olurken tabakaların sayısı arttıkça giderek bu etkiler önemsiz olmaktadır. Toplam lif hacim oranının artışı, efektif ısı iletkenlikler üzerinde hem k_x 'in hem de k_z 'in artmasına neden olmaktadır. Numunedeki bileşenin kaymasına (üst tabakanın alt tabakaya doğru değişim) göre k_z ısı iletkenliği incelendiğinde, %1,65'lik önemsiz bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Efektif ısı iletkenlikler üzerinde dalgalı olmanın etkisi incelenmiştir. Dalgalı olma oranının artmasıyla k_x efektif ısı iletkenlik çok yavaş azalırken, k_z efektif ısı iletkenlik hızlı şekilde artmaktadır. Sonuç olarak, hem bileşenin kaymasının etkisi hem de sınır şartlarının etkisi önemsiz bulunmuştur. Ancak lif hacim oranının artması efektif ısı iletkenlikleri arttırmıştır.

Seo ve ark. (2005), bir ısı-elektrik analogi metodunu kullanarak bükülü iplik tipindeki karbon/fenolikli malzemelerin ısı iletkenliklerini çalışmışlardır. Bu metod, ısı potansiyel ve elektrik potansiyel dağılımı arasındaki benzerliğe dayandırılmıştır.

Dokuma kumaş malzemesinin ısı iletkenliğini modellemek için bazı varsayımlar yapılmıştır. a) Lif ve matris arasında ısı temas direnci ihmal edildi. b) Isı akışı, düzlem (x) ve enine (z) yönlerinde gerçekleştiği varsayıldı. c) Birim hücre ısı iletkenliği, laminate'inki ile aynıdır. d) İplik fiber yığını, tek yönlü kompozit olarak davranmaktadır. İnce tabakalı bir malzemenin birim hücresi, 7 iletim elemanına bölünmüştür. Ardından, seri ve paralel halde eşdeğer ısı dirençler oluşturularak malzemenin ısı iletkenliği tahmin edilmiştir. İletkenlikler oluşturulurken büküm durumları açıyla ifade edilmiştir. Modelin, bükülü iplik kumaş takviyeli kompozitin ısı iletkenliğini iyi bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür. Bükülü iplikli karbon/fenolikli numunenin ısı iletkenlikleri, referans bir numuneye göre karşılaştırmalı bir sürekli hal metodu (ASTM E1225-87) ile ölçülmüştür. Bu referans numune, saten dokumaya sahip karbon/epoksi malzemedir. Sunulan modelin geçerliliğini test için, kumaş malzemenin efektif ısı iletkenlikleri hem enine hem de düzlem yönlerde hesaplanmıştır. Lif hacim oranının artmasıyla, kumaş malzemenin hem enine efektif ısı iletkenliği hem de düzlem efektif ısı iletkenliği artmıştır. Düzlem efektif ısı iletkenliği, numune boyunca bulunan ipliğin etkisi altındadır. Bu, iplik enine ısı iletkenliğinin boyuna ısı iletkenlikten daha düşük olması nedeniyle önemli olmaktadır. Ayrıca deney sonuçlarıyla sunulan model, enine/düzlem efektif ısı iletkenlikleri karşılaştırılmış ve uyumlu bulunmuştur. Tahmini modelin, deney sonuçlarının biraz üzerinde tahmin ettiği belirtilmiştir. Bu, ısı akışının tek bir yönde olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, her bir eleman arasında ısı kaybının olmadığı ve lif ve matris arasında sıfır temas direncinin olduğu kabul edilmiştir.

1.5. Dolgu Parçacık Boyutunun Etkisi

Gözenekli yapılarda, tane boyutları veya çok yapı lı gözenekli yapılarda büyük tane oranlarının etkisi incelendi. Tseng ve ark. (1997) tarafından poliüretan köpük malzemelerde düşük basınçlarda gözenek boyutunun etkisi, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Gazın ortalama serbest yolu altında kalan gözenek boyutlarında, efektif ısı iletkenliğe etkisi önemsiz bulunmuştur. Üzerinde ise, ısı iletkenlik gözenek boyutuyla azalmıştır. Carson ve ark. (2003), teorik gözenekli malzemelerde gözenek boyutunun (yarıçap/grid genişliği) artışıyla efektif ısı iletkenlikte hafif bir azalma olduğunu gözlemişlerdir. Carson ve ark. (2004), geniş bir gözeneklilikte ortalama

gözenek büyüklüğünün etkisinin fazla olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. ANOVA testleri ile ısı iletkenlikte ortalama gözenek boyutunun çok küçük bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu bağıllık %2-5'den azdır. Verilen gözeneklilikte, bağıl gözenek boyutu artarsa bağıl ısı iletkenlik azalmıştır.

Malzemedeki parçacık boyutunun efektif ısı iletkenliğe etkisi, gözenekliliğin dolaylı etkisini göstermiştir. Tichá ve ark.'a (2005) göre 100nm'den daha küçük tane boyutlarda, duyulur bir etki mevcuttur ve ısı iletkenliği azaltmıştır. Ancak kapalı gözenekli mikroyapıya sahip izotropik malzemeler için bağıl ısı iletkenlik tanımlandığında tane boyutunun etkisi dikkate alınmamıştır. Xue ve Xu (2005) tarafından, ara yüzey kabuklara sahip nano akışkanların efektif ısı iletkenliği incelenmiştir. Sonuçta aynı hacim oranında Al_2O_3 /su için nano parçacık boyutu arttıkça efektif ısı iletkenlik azalmıştır. Benzer olarak Gupta ve ark.'da (2003) parçacık boyut dağılımının etkisini ele almıştır. Tekli dağılıma sahip (tek bileşen) sistemlerle karşılaştırıldığında parçacık boyutunun azalmasıyla efektif ısı iletkenliğinin azaldığı ortaya çıkmıştır. En büyük parçacık boyutunun sistem içeriğinde azalmasıyla da efektif ısı iletkenlikte azalmıştır.

1.6. Nem İçeriğinin Etkisi

Açık gözenekli malzemelerde, efektif ısı iletkenliğe nemin etkisinin önemli olduğu görüldü. Bu malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin, nem artışı ile arttığı gözlenmiştir. Hamdami ve ark. (2003) tarafından, 0,59-0,94 gözenekliliğe ve %0-60 nem içeriğine sahip yüksek gözenekli malzemelerin (sünger) efektif ısı iletkenliği ölçülmüştür. Sonuçta, nem içeriği arttıkça (aynı sıcaklıkta) efektif ısı iletkenliğinin arttığı görülmüştür. Çok düşük nem içeriklerinde ve yüksek gözeneklilik değerlerinde ölçülen ısı iletkenlik, seri modele paralel modelden daha yakın olduğu belirtilmiştir.

Nem içeriği, efektif ısı iletkenliği arttırıcı ve azaltıcı etki olarak görülmüştür. Dos Santos (2000) tarafından, gözenekli seramik malzemelerde ısı iletkenlik üzerinde nemin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça, malzemedeki nemin sıvı

halden gaz hale dönüşmesiyle ısı iletkenliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu, su miktarı ve gözeneklilik arasındaki ilişkiyle açıklanmıştır. Hu ve ark. (2001) ise, nem'e doymuş halin ısı iletkenliğini daha yüksek bulmuştur. Bu, aynı gözeneklilikte nem'e doymuş hal ile kuru hal karşılaştırıldığında ortaya çıkmıştır. Ayrıca, aynı gözeneklilikte nem'e doymuşluk artınca ısı iletkenlik artarken düşük nemli ortamlarda ise sıvı fazın ısı köprüsü nedeniyle çok hızlı arttığı gözlenmiştir. Vargas ve McCarthy (2002) tarafından akışkanların varlığındaki tanecikli ortamda ısı iletimi incelenmiştir. Aynı gözeneklilikte %10'a kadar sıvı doygunluğu artınca ısı iletkenlikte artış gerçekleşmiştir. Ancak daha sonra sabit değere ulaşmıştır. Benzer olarak Sablani ve Rahman (2003), 0.04-0.98 nem aralığındaki çeşitli gıdaların nem içeriği arttıkça ısı iletkenliğin arttığını bulmuştur. Burada, nem hacimsel su içeriğidir. Farklı açıdan ele alan Lysenko ve Volz (2000), gözenekli silikon nano yapılarda en düşük gözeneklilik ve/veya en yüksek oksidasyon derecesi (nemli havada oluşabilir) ile en büyük ısı iletkenliğe ulaşmıştır.

1.7. Buharlaşmanın ve Yoğuşmanın Etkisi

Çalışmalarda, gözenekler içindeki nemin yoğuşması ve sıvının buharlaşması da incelenmiştir. Genelde, düşük sıcaklık ve küçük gözeneklerde ihmal edildiği anlaşılmaktadır. Literatürdeki deney ve gözlemler, bu olayın ısı iletkenliğe etkisinin büyük olduğunu göstermiştir. Tseng ve ark. (1997) tarafından, poliüretan köpük malzemede 20-300 K sıcaklıkları arasında kuramsal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Birçok çalışmada bu etki ihmal edilirken, Tseng ve ark.(1997) göre iletimde %10-20 civarında artışa neden olduğu belirtilmiştir. Burada, yoğuşmada teorik değerlerden düşük, buharlaşmada yüksek iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte Hamdami ve ark. (2003) tarafından, 0,59-0,94 gözenekliliğe ve %0-60 nem içeriğine sahip yüksek gözenekli malzemelerin (sünger) efektif ısı iletkenliği sırasında gözlenmiştir. -35 °C ve 25 °C sıcaklık aralığında incelenmiştir. Yüksek sıcaklık tarafında suyun buharlaşması, sıcaklık gradyanı ile (buhar basınç gradyanına göre) gözenek boşluğunda yayılması ve düşük sıcaklık tarafında yoğuşması dikkate alınmıştır. Bu yüzden, gizli ısı taşınımının etkisi düşünülerek gözeneklerdeki efektif ısı iletkenlik belirlenmiştir.

1.8. Işınımın Etkisi

Literatürde ışınım ile ısı transferini hem ihmal eden hem de ilave eden çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazısı incelendiğinde, Carson ve ark.'nın (2003) iki boyutlu sonlu elemanlar simülasyonlarında taşınım veya ışınım ile temas direnci ihmal edilmiştir. Vargas ve McCarthy (2002) ve Cernuschi ve ark. (2004), düşük sıcaklıklar ve sıcaklık farkı küçük olduğunda ışınım etkisi ihmal edilmiştir. Fakat son dönemlerde, iletim yanında ışınımın temel özelliklerini anlamada önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu çerçevede Tseng ve ark. (1997), ışınımın katkısını teorik modele dahil etmiştir. Ayrıca, poliüretan köpük malzemesinin 20 K ile 300 K sıcaklık aralığında deneysel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Işınım ile ısı transferinin ısı iletkenlik üzerinde düşük sıcaklıklarda önemsiz, oda sıcaklığı bölgesinde %10-20 etkisi olduğu bulunmuştur. Yüksek sıcaklıklardaki lif ısı yalıtımı için, Petrov (1997) birleştirilmiş ışınım ve iletimle ısı transferini tanımlamıştır. Bu tanımlamada üç farklı yaklaşımı analiz etmiş ve karşılaştırmıştır. Bununla birlikte Grohe (2004), difüzyon olayını da düşünmüştür. Tekstil olmayan kenevir ve keten lifleriyle bağlı yalıtım malzemesinin ısı iletkenlikleri için su emilim ve difüzyon işlemine bağlı ısı iletimini de ele almıştır. Dikkati çeken bir çalışma da, Spinnler ve ark. (2004) tarafından yapılmıştır. Emisivite ve yansıtıcının önemi, deneysel ve teorik çalışma ile belirlenmiştir. Özel olarak tasarlanmış çok tabakalı ısı yalıtım sistemlerinin efektif ısı iletkenlikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, ışınım perdesindeki emisivitesinin azalmasıyla efektif ısı iletkenliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, ışınım perdelerinin efektif ısı iletkenlik eğrilerinin eğimlerinin azalmasına neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Han ve ark.'a (2005) göre boşluğun 20 nm'den az olduğunda ısı ışınım önemli hale gelmiştir. Bu, beklenmedik yüksek enerji tüketimini açıklamıştır. Işınım ile ısı transferi nedeniyle, Peletskii ve Shur (2007) ve Wulf ve ark. (2007), sıcaklıkla efektif ısı iletkenliğinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Fakat Lim ve ark. (2007) tarafından yüksek sıcaklıklı çok tabakalı gözenekli yalıtımdaki tek fazlı ısı transferi analiz edilmiş ve metalik folyoların yüzeyinden ısı ışınımının katkısının bağıl olarak düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Wu ve ark.'a (2007) göre gözenekli polimer malzemeler içerisinde lif emisivitesinin artmasıyla ısı enerjide küçük miktar azalma gözlenmiştir. Bu etki, Zerroung ve ark. (2007) tarafından incelendiğinde, ısı ışınımının gözenek boyutunun ve kırılmış hücre boyutunun

büyüklüğüne bağlı olduğu görülmüştür. Wu ve ark. (2007), Zverev ve ark. (2008) ve Marques ve ark. (2009) çalışmalarında ısı enerji taşınımını incelemişlerdir. Buradan, birleştirilmiş ışınlama ve iletimle ısı transferinin teorik modelini sunmuşlar ve uygulamışlardır. Michels ve ark. (2008) tarafından, yansıtıcı ısı yalıtımlar kullanılmışlardır. Bu malzemelerin, çatılardaki ısı akısı azalmasına etkisi teorik ve deneysel olarak çalışılmıştır. Benzer olarak, Safavisohe ve ark. (2009) tarafından yansıtıcı malzemelerin kullanımı araştırılmıştır. Sonuçlar, sınırların iç yansıtıcılığının tabakanın ısı cevabında en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Zhang ve ark. (2008) ile Zhao ve ark. (2009), çalışmalarında (27–700 °C) sıcaklık ve (10^{-2} – 10^5 Pa) basınç aralığında lifli yalıtımın efektif ısı iletkenliklerini sunmuşlardır. Burada araştırılan şartlar altında, ışınlama ısı transferi ve gaz iletimi baskın ısı transfer mekanizmaları olarak alınmıştır. Tseng ve Chu (2009), Zerroung ve ark.'nın (2007) çalışmasındaki gibi gözenek boyutu ve kırılmış hücre boyutu önemli olduğunda, ısı ışınlamının önemli hale geldiğini bulmuştur. Yoon ve Soon (2009), çok düşük efektif ısı iletkenliğe ve çok küçük kalınlığa sahip çok tabakalı vakum yalıtımlı chip üzerine çalışmışlardır. Burada, iletim yanında çok ince boşlukta ışınlama ısı transferini incelemişlerdir. Yüksel ve ark. (2010), alüminyum folyo takviyeli tabakalı camyünü numunelerinin ısı iletkenlikleri araştırılmış ve ışınlam nedeniyle arttığı sonucuna ulaşmıştır. Çalışmalarda, ışınlam etkisi malzemenin emmisivitesi, gözenekliliği, gözenek boyutu ile orantılı ele alınmıştır.

Farklı olarak Issa ve ark. (2004), cerrahi amaçlarla kullanılan dokumasız (nonwoven), tabakalı ve polietilen yapılı giysilerde ışınlam etkisini araştırmıştır. Dış yüzeyde değişik hava hızları kullanılmış ve sonuçta polietilen dışındaki giysilerin gama ve beta ışınlarından etkilendiği görülmüştür. Barea ve ark. (2005), ≈ 30 -42 μm küresel çapta gözeneklere sahip mullite (%35-60) malzemesinin efektif ısı iletkenliğini ölçerek gözenek boyutuyla ışınlamın etkisinin arttığı tespit edilmiştir.

Spinnler ve ark. (2004), özellikle yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerine sahip çok tabakalı ısı yalıtım sistemlerinin efektif ısı iletkenliklerini tanımlamak için teorik ve deneysel çalışma yapmışlardır. Deney tesisatı, 1000 °C sıcaklığa kadar yalıtım sistemlerinin ısı transferini ölçmek için tasarlanmıştır. Bu tasarımda, yeni bir

muhafazalı sıcak plaka aygıtı ortaya koyulmuştur. Teorik model ise, absorbe etme, yayma ve dağıtma özelliklerine sahip gözenekli malzemeler boyunca birleştirilmiş iletimle ve ışınlama ile ısı transferine dayandırılmıştır. Bu model, birçok takviye perdesi ile ayrılmış malzemelerden oluşan yalıtım malzemelerdeki sıcaklık dağılımını ve ısı transferini tahmin etmekte kullanılmıştır. Birkaç çok tabakalı ısı yalıtım sistemi için elde edilen deneysel sonuçlar, teorik modeller ile karşılaştırılmıştır. Yalıtımın efektif ısı iletkenliğini azaltmada takviye perdelerinin verimliliği değerlendirilmiştir. Dört farklı mikro gözenekli malzeme arasında, altın ve paslanmaz çelik gibi ışınlama perdeleri kullanılmıştır. Düşük emisivite perdeleri ve optik olarak ince boşluklara sahip tabakalı bir sistemin efektif ısı iletkenliği azalmıştır. İlave perdeler, efektif ısı iletkenliğe olan etkiyi sınırlandırmıştır.

1.9. Ara Yüzeyin ve Temas Alanının Etkisi

Literatürden, sürekli fazın gözenek sınırlarındaki temas yüzeylerinin büyüklüğünün iletim açısından önemli olduğu anlaşılmıştır. Diğer yandan, gözenekli yapılarda akış uygulamalarında sürekli faz ve akışkan temas yüzeyinin büyüklüğünün iletimi artırdığı görülmüştür. Bu açıdan, temasın önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. İlk olarak, Okazaki ve ark. (1981) tarafından çakıl taşı ısı iletkenliğindeki değişimler belirlenmiş ve çakıl taşı boyutunun değişimleri ele alınmıştır. Burada, çakıl taşı yatakların efektif ısı iletkenliğini tanımlamakta bir model kullanılmıştır. Ayrıca, Carson ve ark. (2003, 2005) ise deneysel ve kuramsal çalışmalarında temas yüzeyinin önemine vurgu yapmışlardır. Carson ve ark.'nın (2003) çalışmasında gözenek/tanecikler arasındaki temas büyüklüğünün, gözeneklerin/taneciklerin boyutundan/şeklinden daha önemli olduğu belirtilmiştir. Burada, bir efektif ısı iletkenlik modelinin sadece bileşenlerin hacim oranları ve ısı iletkenlikleri ifade edemeyeceğini ve bu yüzden gözenek veya tanecikler arasındaki temasın büyüklüğü ile ilişkili ilave parametrenin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kuramsal çalışmada, Maxwell (temasın olmadığı) ve Kirkpatrick (ilaveler arası temasın büyüklüğünü içerir) yapıları arasındaki farklılığın %40'a kadar çıktığı görülmüştür. Farklı bir malzeme olarak, kumaşlarda bu etkinin incelendiği görüldü. Park ve ark. (2004) tarafından, bükülü ve ince tel iplik tipi karbon kumaşlar ile takviye edilmiş fenolik malzemelerin ısı iletkenlikleri ölçülmüştür.

Sonuçta, boyuna ısı iletkenliğin bükülü tip malzemede daha yüksek oluşu, bu etki ile açıklanmıştır. Bükülü tip malzemenin ara yüzey özellikleri, ince tel kompozitin ara yüzey özelliklerden daha büyüktür. Gelişmiş arayüzey özelliği, bükülü tip malzemelerde lif çıkıntısının köprü etkisi olarak verilmiştir. Carson ve ark. (2005), iç ve dış gözenekli malzemeler olarak ayırmıştır. Dış gözenekli malzemelerde (tanecikli tip), efektif ısı iletkenliğin ısı temas büyüklüğünden (şekil ve düzenleme nedeniyle) etkilendiği vurgulanmıştır. Ancak, iç gözenekli malzemelerde (köpük tipi) ısı akışının yoğunlaşan faz boyunca olduğu ve bu yüzden bu büyüklükten etkilenmediği belirtilmiştir.

Ara yüzeyin ve temas alanının, efektif ısı iletkenliğin artmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, Vargas ve McCarthy'e (2002) göre akışkan-tanecikli ortamdaki efektif ısı iletkenliğinin parçacıkların teması nedeniyle güçlü şekilde etkilendiği görülmüştür. Diğer yandan, Xue ve Xu (2005) tarafından ara yüzey kabuklara sahip nano akışkanların efektif ısı iletkenliği incelenmiştir. Ara yüzey özelliğinin artışının, efektif ısı iletkenliği dolaylı olarak arttırdığı bulunmuştur.

1.10. Diğer Parametreler

Gözeneklilikle ilgili olarak daha farklı faktörlerin etkisinden söz edilebilir. Burada incelenen çalışmalarda gözeneklerdeki basıncın, yığındaki yükün ve basıncın, gözeneklerdeki gazın boşlatılmasının veya üflenmesinin, ısı işlemenin, sıvı fazın duruş açısının, küre yığının, tabaka dönme hızının, laboratuvar-malzeme etkileşiminin, nano-meso gözeneklilik farkının, örtüşme faktörünün efektif ısı iletkenlik üzerine etkileri ele alınmaktadır. Bunlardan basınç ve yükün etkisi önemlidir. Gözenek içindeki gazın basıncının azalması iletkenliği düşürmekte malzemeye gelen yükün artması iletkenliği artırmaktadır. Ancak yüksek yüklerde etki oranı azalmaktadır. Poliüretan köpük hücrelerinde gazların boşaltılmasıyla %70'a kadar efektif ısı iletkenliğin azaldığı Tseng ve ark. (1997) tarafından bulunmuştur. Bu, 20 K ile 300 K sıcaklık aralığında teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Köpüğe farklı gaz üflenmesi ile malzemenin ısı performansı arttığı vurgulanmıştır. Ghodoossi (1988), tuğlalardaki hava boşlukları içindeki taşınım etkisini kuramsal yaklaşımlarla incelemiştir. Büyük gözeneklerde, taşınımın önemli olduğunu sonucuna varmıştır. Düşük yoğunluklu lifli yalıtım

malzemelerinin ısı iletkenliğini ise Matiašovský ve Koronthályová (2000) incelemiştir. Işınım etkisini dışında farklı sınır şartlarının etkisini gözlemlemiştir. Perspex malzemesinin termofiziksel özellikleri, kalınlığa bağılılığı olarak Boháč ve ark. (2000) tarafından incelenmiştir. Bunların dışında, farklı laboratuvar çalışmasının etkileri de Zarr ve Filliben (2002) tarafından incelenmiştir. Dört farklı numune, dört farklı laboratuvar, 297.15 K'de 5 tekrarlı ölçümler ve 280K'den 320 K'e kadar sıcaklıklarda tek-nokta ölçümler ile aynı malzemede incelenmiştir. Çalışmada, operatör ve çevre etkisi düşünülmemiştir. Malzemedeki malzemeye ısı iletkenlik farklılığı, laboratuvar laboratuvara olan farklılıktan daha büyük bulunmuştur. Laboratuvar-malzeme etkileşimi olduğu belirtilmiştir. Sokolovskya (2005) ise, kumaşların efektif ısı iletkenliklerinin ölçüm metodunu incelemiştir. Burada, kumaş kalınlığının ve gözenekliliğinin getirdiği problemler ortaya konmuştur. Shin ve ark. (2005) tarafından, kumaşlara faz değişim malzemeli kapsüller ilave edilerek termofiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu ilavenin kumaşın termofiziksel özelliklerine, hava geçirgenliğine, nem geçirgenliğine, nem geri kazanımına ve mekanik özelliklerine etkisi ele alınmıştır.

Heterojen dokumasız (nonwoven) malzemelerin ısı yalıtım özellikleri, Mohammadi (1998) tarafından farklı formlarda ve 450 °C sıcaklığa kadar ele alınmış ve modellenmiştir. Kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin birçoğu, tekstil lifleri veya kumaşları formundadır. Kumaş yapılarında kullanılanlarının birçoğu ise nonwoven kumaşlardır. Ve özellikle needle-punched nonwoven kumaşlardır. Geleneksel nonwoven yalıtımların sıcaklık aralığı 150 °C'den daha az değerlerdedir. Bu çalışmada, yaklaşık 450 °C'e kadar sıcaklık aralığında bulunan nonwoven kumaş yapıları araştırılmıştır. Yaklaşık 450 °C sıcaklıkta kullanımı amacıyla bir ısı bariyer/yalıtıcı kumaşın değerlendirmesini yapmaktadır. Kumaş yapıları, çok tabakalı farklı sayılarda cam/seramik yapılardan oluşmaktadır. Ayrıca cam/seramik yapılar, farklı sayıdaki barlar'dan oluşan needle'ler kullanılarak karıştırılmaktadır. Her bir numunenin değerlendirilmesinde, efektif ısı iletkenlikler ve deneysel ve teorik hava geçirgenlikler belirlendi. Her bir numunenin efektif ısı iletkenliği, muhafazalı sıcak plaka metoduyla ölçülmektedir. Ayrıca, istatistiksel analiz yapılarak hava geçirgenliği ile efektif ısı iletkenlik arasında ilişki kurulmaktadır. Ayrıca modeller, kumaş gözenek boyutunu, kumaş ağırlığını, cam/seramik ağların kalınlığını, needle'daki barların sayısını ve kumaş

yapısını içermektedir. Ayrıca, bu parametrelere göre değerlendirilmektedir. Deneysel ve teorik hava geçirgenlikleri arasında %40-60 arasında farklılık vardır. Modeller, hem teorik hem de deneysel hava geçirgenliklerin efektif ısı iletkenliği tahmin etmede kullanılabileceğini göstermektedir. Efektif ısı iletkenlik modelleri, ışınımı, karışımı katarken doğal konveksiyonla olan ısı iletkenliği içermemektedir. Bu tezde verilen modeller, heterojen nonwoven malzemelerin ısı özellikleri için ortam boyunca geçen yedi mekanizmanın toplamı olarak model tanımlanmıştır. Burada doğal/zorlanmış taşınım, katı fiberler boyunca iletim, ara fiber boşluklarında hav boyunca iletim ve ışınım ısı transfer mekanizmaları ele alınmıştır. Gözenekler içinde doğal taşınım, ağ içindeki mikro ağırlıklı fiberlerin kullanımı nedeniyle ihmal edilmektedir. Işınım ise farklı araştırmacılar tarafından çalışılmış olup yedi parametreye bağlı türetilmiştir. Bu parametreler, lifleri hacim oranı, ortalama lif çapı, ortalama sıcaklık, liflerin emmisivitesi, yatağın kalınlığı, boyutsuz tabaka kalınlığı, Boltzmanın sabiti, liflerin geliş güzel düzeni, gözenek çapı ve ortalama serbest yoldur. Gazların ısı iletkenliği, gaz yoğunluğu, özgül ısı, ortalama moleküler hız, gaz moleküllerin ortalama free yolu, ve sayısal bir sabit ile bazı araştırmacılar ile açıklanmaktadır. Burada yer alan Bhattacharya (1980) tarafından geliştirilen model, efektif ısı iletkenliğine yalıtım kalınlığının ve ortalama sıcaklığının etkisini göstermiştir. Bhattacharya denklemleri, Larkin tarafından çözülmüştür. Taşınım ve ışınımın yokluğundaki ortamın iletkenliği, Fricke'nin yaklaşımı ile tahmin edilmiştir. Ayrıca Viskanta'nin modeli, yalıtım kalınlığını, lif çapını içeren çok tabakalı yalıtımlarda eş zamanlı ışınım ve katı iletimi bir analitik model geliştirmiştir (Viskanta 1965). Yukarıda verilen bu modeller dışında birkaç modelden de bahsedilmektedir. Kinetik teoriden hareketle metalik olmayan katıların efektif ısı iletkenliği, Chung ve Kaviancy tarafından kafes ısı kapasitesi, hıza ve fotonun ortalama serbest yolu ile verilmiştir (Chung ve Kaviancy 2000). Gesele ve ark.'nın önerisi ise, gözenek ağ gelişigüzelliği ve gözenek boyutu olarak verilen morfoloji ve boyutu içeren basit bir ilişkidir. Fakat bu, düşük gözeneklilikte tam olarak doğru tahmin vermemektedir.

Liang ve Qu (1999), yüksek sıcaklıktaki sıcaklık farkının etkisini ve gaz-katı malzemenin efektif ısı iletkenliğini çalışmışlardır. Yüksek sıcaklıkta ve büyük sıcaklık farkına sahip bu malzemenin efektif ısı iletkenliği, ortalama sıcaklıktaki birim hücrenin

yerel eşdeğer ısı iletkenliği ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, silindirik ve küresel hava boşluklarına sahip gözenekli malzemeler için yapılmıştır. Küresel hava boşluklarına sahip malzeme için, model deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Yerel eşdeğer ısı iletkenliğinin, hesaplama değerinden farklı ve yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu eşdeğer ısı iletkenlik, boşluk çapının 5mm'nin ve gözenekliliğinin %78'in altında iken efektif ısı iletkenliği vermektedir. Bu şartlarda, sıcaklık farkının önemsiz olduğu ifade edilmiştir. Ancak, gözeneklilik % 80'den fazla ve boşluk çapı 5 mm'den büyük ise, sıcaklık farkının etkisi ortaya çıkarılmıştır.

Matiašovský ve Koronthályová (2000), yatay muhafazalı sıcak plaka cihazında hava geçirebilir bir yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini incelemişlerdir. Hafif lifli yalıtım malzemelerinin açık ısı iletkenliğinin, yoğun ışınlama ile ısı transferi ihtiva ettiği belirtilmiştir. Ayrıca, belirli şartlar altında doğal taşınımın önemli rol oynadığı ifade edilmiştir. Efektif ısı iletkenlik, gaz içi iletim, katılardaki iletim ve ışınlama ile olan ısı iletkenlik toplamı olarak değerlendirilmiştir. Sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği ise, lineer ilişki ile ifade edilmiştir. Doğal taşınım, yatay gözenekli malzemelerde en üst sınır sıcaklığı en alt sınır sıcaklığından daha yüksek olduğunda belirlenmiştir. Ayrıca, düşük yoğunluklu mineral yünün açık ısı iletkenliği ölçümlerinden 40'dan daha düşük Rayleigh değerlerinde gözlenmiştir. Deneysel ölçümlerde, doğal taşınımın etkisi geçirebilir sınır şartları ile ortaya konmuştur. İki deneysel ölçüm yapılmıştır. İlk ölçümlerde, mineral yünün efektif ısı iletkenliği, küçük yüzey sıcaklık farklarında (3.74-4.34 °C) değişebilir ortalama sıcaklıklar için belirlenmiştir. Buradan, gerçek deney şartlarında uzun dalga boylu ışınlama nedeniyle ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığını değerlendirilmiştir. İkinci ölçümler, eş zamanlı olarak aynı ortalama numune sıcaklığında (20 °C) ve değişebilir yüzey sıcaklık farklarında (5-60 °C) yapılmıştır. ısı iletkenliğinin, yüzey sıcaklık farklarına ve numunenin ortalama sıcaklığına bağlı olduğu teyitlenmiştir. Ortalama sıcaklıkla efektif ısı iletkenliğinin artışı, uzun dalga boylu ışınlama ile açıklanmıştır (doğal taşınımsız). Doğal taşınımın etkisi, Nusselt ve yeni Rayleigh sayısı arasındaki ilişki ile ifade edilmiştir. Düşük yoğunluklu lifli yalıtım malzemelerde, malzemenin açık ısı iletkenliği sınır şartları ile olduğu gibi malzemenin sıcaklığı ile de değişmektedir.

Barta (2000), lifli malzemelerin efektif ısı iletkenliği için bir bağıntı üretmiştir. Bu malzeme, matriks içindeki liflerden meydana gelen bir malzemedir. Ortalama alan yaklaşımı ile, lifler boyunca ve liflere dik efektif ısı iletkenlikler belirlenmiştir. Makroskopik seviyede, malzeme homojen ve efektif parametreler ile karakterize edilmiştir. Koordinatlara bağlı değildir. Efektif parametreler için, alt makroskopik seviyede malzemenin yapısal istatistiklerinin bilinmesi ön plana çıkmıştır. Bu ise, çok sık bilinmemekte ve sadece üretim işleminden dolayı hacim oranları bilinmektedir. Bunun için, yaklaşım metotlarından ortalama alan yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, dairesel formulu gelişi güzel izotropik liflerin sınırsız efektif ortam içinde doldurulmasıyla oluşturulmuştur. Lifler, ısı iletkenliği karakterize edilen yüzey tabakası ile kaplıdır. Lifler boyunca olan efektif ısı iletkenliğe, paralel bağlı ısı iletkenliklerle ulaşılmıştır. Liflere dik yöndeki efektif ısı iletkenliğin hesabı ise, liflerin yüzey tabakası ile kaplı olmasından dolayı standart metottan farklı olarak iki adımda gerçekleştirilmiştir.

Belova ve Murch (2004), iki fazlı malzemenin efektif ısı iletkenliğini Monte Carlo simülasyonu ile tahmin etmiştirler. Homojen dağılımlı malzemedede fazlar arasında hiçbir temas direnci olmadığı düşünölmüştür. Matriks fazından daha yüksek veya daha düşük ısı iletkenliklerin iki serisi için, dağılı küplerden veya kürelerden oluşan birkaç model verilmiştir. Sonuçlardan, Maxwell'in öncölük ettiği modelin en iyi model olduğu ifade edilmiştir. Monte Carlo simülasyonu ile, efektif ısı iletkenlik için ulaşılan ifadelerin doğruluğu test edilmiştir. Monte Carlo metodunun, yöne bağlı efektif ısı iletkenliği ifade edemediği belirtilmiştir. Burada Maxwell, Babanov, Aritmetik Ortalama, Geometrik Ortalama, Brailsford ve Major, Verma ve ark., Singh ve ark. ifadelerinin doğruluğu test edilmiştir. Bu ifadelerden (Monte Carlo metodu ile birlikte), hem küre hem küp dağılı fazlar için efektif ısı iletkenlikler belirlenmiştir. Sonuçta, Maxwell denklemi matriks içindeki seyrek dağılı küreler için çözüme ulaştırmıştır. Ayrıca, küpler içinde çok iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Üstelikte, dağılı fazın yüksek oranlarında çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Efektif ısı iletkenlikte, dağılı parçacıkların boyutunun ve şeklinin ikinci derecede önemli olduğu ifade edilmiştir. Bu simülasyon metodunda, yoğunluk ve özgül ısı her iki faz tipinde de eşit alınmıştır. Dağılı fazın hacim oranının artışıyla, efektif ısı iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.

Druma ve ark. (2004), karbon köpüklerin ısı iletkenliği üzerine çalışmışlardır. Açık ve kapalı hücre karbon köpüklerin ısı iletkenliğinin, farklı gözeneklik seviyelerinde sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Gözenekler içindeki taşınım ve ışınım etkisi ihmal edilmiştir. Köpüklerin ısı iletkenliğini tahmin eden modellerin, genellikle iletim sırasında gözenek şekli ve malzeme mikroyapısının etkisini dikkate almakta olduğu belirtilmiştir. Burada ise, köpük katı matrisi içinde küresel boşlukların homojen dağılımı düşünülerek modellenmiştir. Köpük içindeki katının mikro yapısı, izotropik dşnlmştr. Modelde, birbiriyle bağlantılı gözeneklerin yalıtıldığı ve gözenekler içinde sıcaklık alanının olmadığı varsayılmıştır. Sonuçta, tek boyutlu efektif ısı iletkenlik olarak zmlenmiştir. Bu zmler, Bauer tarafından geliştirilen analitik sonuçlar ve iletim parametresi ile karşılaştırılmıştır. İletim parametresi, hacim ısı iletkenlik ve katı ısı iletkenlik arasındaki ilişki ile verilmektedir. Sonlu eleman zmleri, düşük gözeneklilik seviyeleride teorik modelle eşleşmiştir. Fakat, yüksek gözenekli köpükler için sonlu eleman sonuçları ve analitik sonuçlar arasında farklılık gözlenmiştir. Ayrıca sonuçlar, sabit bir ‘gözenek iletim parametresine’ sahip yarı ampirik veya analitik modelin gözenekliliğin tüm aralığı boyunca tam olarak tahmin edemediği görülmüştür. Bu parametrenin değeri, sabit olması gerekirken düşük gözeneklilikten %90 gözenekliliğe ulaşınca arttığı tespit edilmiştir. Gözeneklilik artmasıyla, efektif ısı iletkenliğin azaldığı görülmüştür. Burada, gözenek boyut değişiminin etkisi, ele alınmamıştır.

Patirop (2004) tarafından, flaş yangına maruz bırakılan yangın koruma elbisesinin sayısal olarak ısı ve kütle taşınımı ele alınmıştır. Sayısal sonuçların, yoğun ısı ortam içerisindeki koruma elbisesi, hava boşluğu ve insan derisinde gerçekleşen ısı ve kütle taşınımını anlamaya imkan verebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, soğuma periyodu esnasındaki ve ışınımınla ısıya maruz haldeki koruma giysisinin termofiziksel özellikleri üzerine nem içeriğinin etkisi araştırılmıştır. Giysisinin ısı performansının tayini, yeni yangın koruma giysi üretiminde ve tasarımında önemli görülmüştür. Ayrıca, lokal alev maruz kalmasından ve yangından üretilen ışınım enerjisinden kaynaklanan yanıkları önlemek ve minimuma indirmek için de önemli bulunmuştur. Bununla birlikte, yangın söndürme esnasında oluşan ter ve ıslanma nedeniyle nemin etkisi de ele alınmıştır. Geleneksel ısı koruma ürünleri, flaş alevine maruz kalan hava tabaka

yalıtımının ısı direncine göre tasarlanmıştır. Buradan, enerji ve nem absorpsiyonunun, salınımın, yoğuşmanın ve buharlaşmanın, deriye olan sıcaklığı ve enerji akısını etkileyebileceği görülmüştür. Bu yüzden, ısı koruma ürünlerinin ısı akısı direnç seviyesini geliştirmek için, su-enjeksiyon kullanımına dayanan yeni akıllı bir ürün sistemi üzerinde durulmuştur. Böylece, flaş alevine maruz kalındığında yüksek ısı akısına karşın ısıl tampon ve aktif ısıl bariyer olabileceği ifade edilmiştir. Bu sırada, iç tabakaların da küçük ısıl iletkenliği nedeniyle etkin bir koruma sağlayabileceği belirtilmiştir. Kumaştaki ısı transferi, iki farklı yapıda modellenmiştir. İlk olarak, polimer matriks tarafından emilen su bağlı lifler (iletim), doğal sıvı sudan oluşan sıvı faz (iletim, taşınım ve faz değişimi), kuru hava ve sudan oluşan gaz fazı (iletim ve taşınım) olarak verilmiştir. Son olarak, katı polimer matriks tarafından emilen su bağlı liflerden oluşan katı faz, doğal sıvı sudan oluşan sıvı faz, subuharından ve kuru havadan oluşan gaz fazı olarak tanımlanmıştır.

Ye ve ark. (2006), kalibreli muhafazalı sıcak kutu (ASTM C236-89) kullanarak koyun yünü yalıtımının ve yün-kenevir karışımlarının ısıl dirençlerini araştırmıştır. ısıl direnç ölçümündeki tahmini belirsizlik, $\% \pm 7$ olarak verilmiştir. ısıl iletkenlikle numune yoğunluğu arasında bağıntılar türetilmiş ve literatür ile de uyumlu bulunmuştur. Yün yalıtımının ısıl iletkenliği yoğunluğun azalmasıyla artarken yalıtım kalınlığının artışıda bu iletkenlikte etkisini göstermiştir. Düşük yoğunlukta, yoğunlukla ısıl iletkenliğin değişimi literatürden elde edilen değişimden daha büyük bulunmuştur. Yün-kenevir numunelerinin ısıl iletkenliği ise, aynı yoğunluktaki yünün ısıl iletkenliğinden farklı bulunmamıştır. Numune düzleminin dikey ve yatay olmasına göre yapılan ölçümlerde, $\% 1,6$ 'lık fark bulunmuştur. $\% 20$ nem artışıyla, yün yalıtımın iletkenliğinde $\% 5$ 'den daha az bir artış gözlenmiştir. Bu sonuç literatür ile de uyumlu bulunmuştur. Yün yalıtımının ısıl iletkenliğinin, nem absorpsiyonuyla önemli derecede etkilenmediğini belirtilmiştir. Belirli nem seviyesinde yatay ve dikey yönlerde ölçülen ısıl iletkenlik arasında $\% 1,2$ 'lik fark bulunmuştur. Burada, yoğunluğun, nem içeriğinin ve bileşimin etkileri incelenmiştir. Sonuçta, yoğunluğun azalmasıyla yada nem içeriğinin artmasıyla ısıl iletkenliğin arttığı belirtilmiştir. Ancak, kenevir ilavesinin ısıl iletkenlik üzerinde çok büyük etkisinin olmadığı ifade edilmiştir.

Wang ve ark. (2006), heterojen malzemelerin efektif ısı iletkenliklerini yeni bir yaklaşımla tahmin etmiştir. Burada, 5 temel efektif ısı iletkenlik modeli ve bu modellerin birleşiminden elde edilen modeller sunulmuştur. Bu 5 temel model, seri, paralel, Maxwell-Eucken'in iki formu ve efektif ortam teorisidir. Karmaşık yapı ılı malzemeleri modellemek için, yapının hacim oranlarına dayalı basit bileşim kurallarına dayalı bir model yaklaşımı sunulmuştur. Verilen 5 temel modelin ağırlıklı ortalamasını ifade eden yaklaşım, bu modellerin herhangi birinin tercihi ile geliştirilebilmektedir.

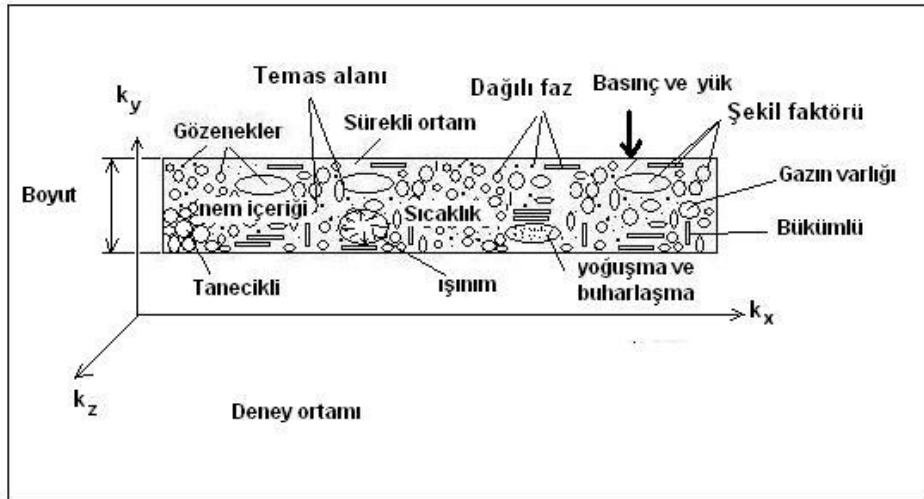
Ochs ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak nemli yalıtım malzemelerin efektif ısı iletkenliğini araştırmışlardır. Isı yalıtımında, çevresel etkiler nedeniyle ortaya çıkan sıcaklık ve nem içeriğinin etkisi ele alınmıştır. Özellikle, artan sıcaklık ve nem içeriği nedeniyle yalıtımların niteliğinin değişebileceği belirtilmiştir. Yalıtım malzemelerinin efektif ısı direnci, sıcaklık ve nem içeriğinin artmasıyla azaldığı ve bu nedenle, ısı kayıpların tahmin edilenden daha yüksek olabileceği belirtilmiştir. Bu yüzden, gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliği modelinin modifiye edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Burada, 80 °C'ye kadar sıcaklıklardaki ve nem içeriklerindeki gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin ölçümü ve modellemesi detaylı olarak verilmiştir. Nemli malzemelerde ısı iletkenlik, kuru malzemelerde ısı iletkenlik, sıcaklığın fonksiyonu olarak ısı iletkenlik ve gözenek difüzyonu nedeniyle ısı iletkenlik olmak üzere dört model verilmiştir. Nemli gözenekli ortamın efektif ısı iletkenliği, katı, sıvı su, nemli ve kuru hava fazlarının seri ve paralel toplamı olarak ifade edilmiştir. Kuru ortamın efektif ısı iletkenliğine, ışı nım da dahil edilmiştir. Gözenek difüzyonu nedeniyle gerçekleşen ısı iletkenlik ise, buharlaşmayı dikkate alan bir yaklaşımla verilmiştir. Sonuç olarak, nem içeriği ve kapalı ve açık gözeneklilik oranı gibi malzeme özelliklerini (giriş parametreleri) dikkate alınan bir modelleme verilmiştir. Modelin, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu bulunmuştur.

1.11.Literatür Sonuçları: Gözenekli Malzemelerde Değişik Parametrelerin Efektif Isı iletkenliğe Etkileri

Bu kısımda, deneysel ve kuramsal çalışmalarda maddenin cinsi, gözeneklilik şekli/büyük lüğü, sıcaklık, yoğunluk, tane boyutu, homojenlik, temas alanı, lif boyutu,

gözeneklerde sıvı/gaz hali, ısı iletim katsayısına etkileri gözlemlendi. Ayrıca, gözeneklerdeki veya gözenekler arasındaki taşınım ve ışınlım etkisini ihmal eden çalışmalar yanında ışınlımın katkısını dahil edilen çalışmalar da gözlemlendi. Bu konuda yapılan değişik çalışmalar ile bunların sonuçları kısa olarak sunuldu.

Literatürde yapılan çalışmalardan efektif ısı iletkenliğe etki eden ve incelenen bağıntılarda gözlemlenen parametreler, Şekil 1.1'deki gibi verilebilir. Sonuç olarak, gözenekli malzemelerde ve özellikle yalıtım özelliği olan malzemelerde küçük (mikron/nanometre) ortalama gözenek çaplarında bulunan gazlar esas yalıtkanlığı sağlamaktadır. Malzemedeki takviye malzeme cinsi ve hacimsel yüzdesi, ısı iletkenlik üzerinde etkilidir.



Şekil.1.1. Efektif ısı iletkenliği etkileyen parametreler

- Gözenekliliğin artmasıyla ısı iletim katsayısı azalmaktadır.
- Malzemelerde ortalama sıcaklığın artışı ile genel olarak ısı iletkenlik artmaktadır.
- Gözeneklerin şekli ve malzeme içindeki düzenleme, ısı iletkenliğine kısmen etkili görülmektedir. Enine ve boyuna ısı iletkenlikler incelendiğinde enine ölçümler daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir.

- Gözenekli yapılarda tane boyutunun küçülmesi veya çoklu yapıda büyük tane oranının azalması ısı iletim katsayısını düşürmektedir.
- Gözenek yapısı sabit alınarak veya farklı gözenek oranlarında nem oranı değişik şartlarda yapılan deneylerde nem artışı ile ısı iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Sıcaklık arttıkça, malzemedeki nemin sıvı halden gaz hale dönüşmesiyle ısı iletkenliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bu, su miktarı ve gözeneklilik arasındaki ilişkiyle açıklanmaktadır.
- Gözenekler içindeki nemin yoğunlaşması ve sıvının buharlaşması önemli bir etkiye sahiptir. Genelde ise düşük sıcaklık ve küçük gözeneklerde ihmal edilmektedir. Deney ve gözlemler, ısı iletkenliğe etkisinin büyük olduğunu göstermektedir.
- Gözenekleri oluşturan sürekli fazda gözenek sınırlarındaki temas yüzeylerinin büyüklüğü iletim açısından önemlidir ve iletimi arttırdığı görülmektedir.
- Farklı parametrelerden gözenek içindeki gazın basıncının azalması iletkenliği düşürmekte malzemeye gelen yükün artması ise iletkenliği artırmaktadır. Ancak yüksek yüklerde etki oranı azalmaktadır. Mikro çatlakların etkisi ise bu çatlakların artmasının iletkenliği azalttığı belirlenmiştir.
- Faz değişim malzeme oranı artarsa malzemenin ısı iletim katsayısı azalmaktadır.
- Literatürde gözeneklerdeki veya gözenekler arasındaki taşınımın etkisi incelendiğinde, büyük gözeneklerde taşınım üzerinde durulmuş ancak küçük gözeneklerde ihmal edilmiştir. Ayrıca doğal ve zorlanmış taşınım olarak da durulmuştur.
- Efektif ısı iletkenliğinin belirleneceği numunelerin gözeneklilik, malzeme tipi ve k_d/k_s gibi uygun çalışma aralıklarına göre modellerin uygulanması ve tespit edilmesi faydalı olacaktır. Örneğin Gonzo'ya (2002) göre %10'a kadar düşük yoğunluklu, %15-85 arasında orta yoğunluklu, %90'dan yüksek yoğunluklu gözenekli malzemeler olarak belirlenebilir. Yada Carson ve ark.'a (2003) göre iç (köpük) ve dış (tanecikli) malzemeler olarak ayrı düşünülebilir.

- Işınının küçük gözeneklerde önemsiz olduğu ancak büyüdükçe öneminin az da olsa var olduğu görülmüştür. Ancak çok tabakalı emisivite değeri olan malzemelerin ve malzemelerle kullanımında sıcaklıkla birlikte ışınının hem arttırdığı hem de azaldığı görülmüştür.

Maddelerde parçacıkların/gözeneklerin şekli, fazların (katı, sıvı, gaz) dağılımı, hacmi, liflerin ve takviyeli malzemelerin fiziki ve ısıl özellikleri ve geometrik düzenlemesi gibi parametreler, efektif ısı iletim katsayısını etkilemektedir. Bu çalışma sonuçları, mevcut termo-fiziksel özellikleri iyileştirme olanağı verirken teoride kuramsal çerçeve genişletilmiş olacaktır. Termo-fiziksel özelliklerin tespitinde alternatif çözüm olanağı sunacaktır. Bu çalışma tasarım aşamasında yeni ürünlerin gelişmesinde ve kullanım yerlerinde önemli katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, farklı malzemeler ile takviyeli tabakalı numunelerin efektif ısıl iletkenlikleri, yapı ve işletme şartlarına göre modellendi ve ölçüldü. Literatürden gözenekli ortamların efektif ısıl iletkenlik modelleri incelenerek değişik parametrelerin etkileri açısından değerlendirildi. Ayrıca efektif ısıl iletkenliğin tahminine yönelik bir model ortaya kondu. Bu çalışmanın deneysel kısmında, muhafazalı tek/çift numuneli ısıl iletkenlik ölçüm cihazı ile takviyesiz/takviyeli tekli, ikili, üçlü ve dörtlü cam yünü numunelerin efektif ısıl iletkenlikleri ölçüldü. Ardından “λ-Meter EP500” muhafazalı sıcak plakada, farklı malzemeler ile takviye edilmiş ikili, üçlü, dörtlü ve beşli tabakalı numunelerin (cam yünü, nonwoven ve strafor) efektif ısıl iletkenlikleri ölçüldü. Deneysel çalışmalar, 5, 10 ve 15 °C sıcaklık farklarında ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirildi. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında üçlü takviyeli numunelerin soğuma ve ısınma süreleri incelendi. Bunun için takviyeli ve takviyesiz olarak ikili, üçlü camyünü malzemeler ile kaplanan aynı cins iki yağ tenekesinde suyun/antifrizli suyun farklı ortamlarda ısınması ve soğuması ele alındı. Elde edilen süreleri kullanan bir analitik ifade ile takviyeli numunenin efektif ısıl iletkenliği belirlendi. İki alüminyum folyo ile takviyelenmiş ve takviyesiz üçlü straforun efektif ısıl iletkenlikleri, SPSS 1.7 programı ile sıcaklık ve sıcaklık farkına göre analiz edildi.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümün ilk kısmında, gözenekli ortamların efektif ısı iletkenlik modelleri sunuldu ve ardından, efektif ısı iletim katsayısına etki eden parametreler dikkate alınarak oluşturulan bir matematik model verildi. Bu çalışmanın ikinci kısmında, yapılan efektif ısı iletkenlik ölçüm deneylerinden ve bu deneylerde kullanılan cihazlardan ve efektif ısı iletkenlikteki değişimleri analiz eden istatistik programından bahsedildi.

2.1. Efektif Isı İletkenlik Modelleri

Gözenekli ortamların efektif ısı iletkenliğinin tahmininde kullanılan modeller temel ve birbirinden farklı olarak yer almaktadır. Birçok ısı iletkenlik modelleri, sadece bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarını kullanarak tahmin etmektedir. Bazı ısı iletkenlik modelleri ise, bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarına ilaveten yeni parametreler kullanmaktadır. Bu parametreler, yapıdaki bileşenlerin şekil, boyut, düzen, temas etkisi veya faktörü gibi verilmektedir. Isı iletkenliğinin tahminindeki belirsizlik, bu parametreler dışında bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve gözeneklilik arasındaki farklılığın artmasıyla artmaktadır. Bu, tahmin etmeyi zor ve karmaşık hale getirmektedir. Bunun için, ilk olarak başlıca efektif ısı iletkenlik modelleri ve ardından bazı özel modeller verildi. Başlıca modeller; aritmetik ortalama modeli, geometrik ortalama modeli, Hashin-Shtrikman modeli (seri ve paralel modeller/Wiener sınırları), Maxwell modelleri, Efektif ortam teori (EMT) modeli, Krischer yaklaşımı, Russell modeli en çok kullanılan modellerdir. Geliştirilen bazı temel modeller ise Maxwell modelinden yola çıkarak/kullanarak oluşturulmuştur. Bunlar arasında Maxwell-Eucken 1 ve 2 modelleri, Levy modeli, Nielsen modeli, Brailsford ve Major modeli, Jeffrey modeli, Halpin-Tsai eşitliği, Hamilton ve Crosser modeli, Davis modeli, Lu ve Lin modeli, Babanov modeli, Verma ve ark. modeli, Singh ve ark. modeli olarak verilebilir. Diğer modeller, elektrik analogisine, ısı direnç tasarımına, farklı fazların ısı iletkenlikler toplamına dayanmaktadır ve özel oluşturulmuş modelleri içermektedir.

2.1.1. Seri ve paralel model

Bileşenlerin hacim oranları ve ısı iletkenlikleri ile verilen başlıca modellerdendir. Isı akısı yönüne dik ve paralel düzenlenmiş iki bileşenli bir malzemede, iletimle ısı transferi mekanizması dikkate alınarak seri ve paralel model oluşturulmaktadır. Seri ve paralel modeller, herhangi bir heterojen malzemenin minimum ve maksimum efektif ısı iletkenlik sınırlarıdır. Efektif ısı iletkenlik, bu iki sınır arasında değişmektedir. Paralel ve seri model (Bart, 1994), ağırlıklı aritmetik ortalama ve harmonik ortalama ile verilmektedir:

$$k_{e(\text{seri})} = [(V_d/k_d) + (\varepsilon/k_s)]^{-1} \quad (2.1)$$

$$k_{e(\text{paralel})} = (V_d k_d) + (\varepsilon k_s) \quad (2.2)$$

Burada k_s , k_d ve ε , sürekli fazın ısı iletkenliği, dolgu fazının ısı iletkenliği ve sürekli fazın hacim oranı olarak verilmektedir. Sürekli ve dolgu fazlarından oluşan gözenekli bir malzeme, (ε) and V_d hacim oranlarına sahiptir. Bu eşitlikler, Hashin ve Shtrikman'e (1962) göre iletkenlik sınırları olarak sunulmaktadır (Carson ve ark. 2005). Paralel model, Gemci (1996) tarafından boylemsal ısı iletkenlik için kullanılmıştır. Paralel modelin, özellikle $k_d/k_s \gg 1$ iken önemli bir hata verdiği Lee ve Yang (1997) tarafından ifade edilmiştir. Ayrıca, Pham ve Willix (1989), Tavman (1998), Singh ve Kasana (2004), Belova ve Murch (2004) tarafından seri ve paralel modeller kullanılmıştır.

Seri ve paralel modelin genel formu ise, Kalaprasad ve ark. (2000) tarafından verilmiştir:

$$k_e^n = V_d K_d^n + \varepsilon K_s^n \quad (2.3)$$

Bu eşitlikteki n değeri, -1 veya 1 değeri alırsa seri ve paralel model haline dönüşmektedir. n değeri, -1 ve 1 aralığında olup, dolgu geometrisine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Farklı içeriklerin yer aldığı tabakalı sistemler, Ochs (2008) tarafından modellenmiştir. Burada, kısmen kapalı gözeneklere sahip malzemeler nem içeriğine sahip açık ve kapalı gözenekler (23~44%) diye detaylandırılmaktadır. Nemli gözenekli malzemelerin ısı iletkenliği, katı, sıvı su, nemli hava ve kuru hava içeriklerinin herbirinin seri ve paralel tabakalar toplamı olarak ifade edilmiştir:

$$k_{\text{seri}} = (1 - \varepsilon)k_k + V_{\text{su}}k_{\text{su}} + V_{\text{gk,n}}(\varepsilon_{\text{ag}} - V_{\text{su}})(k_{\text{gk}} + k_{\text{dif}}) + (1 - V_{\text{gk,n}})(\varepsilon_{\text{ag}} - V_{\text{su}})k_{\text{gk}} + \varepsilon_{\text{kpl}}k_{\text{g,kpl}} \quad (2.4)$$

$$k_{\text{paralel}} = \left\{ \left[\frac{1 - \varepsilon}{k_k} \right] + \left[\frac{V_{\text{su}}}{k_{\text{su}}} \right] + \left[\frac{V_{\text{gk,n}}(\varepsilon_{\text{ag}} - V_{\text{su}})}{k_{\text{gk}} + k_{\text{dif}}} \right] \right\}^{-1} + \left[\frac{((1 - V_{\text{gk,n}})(\varepsilon_{\text{ag}} - V_{\text{su}}))}{k_{\text{gk}}} \right] + \left[\frac{\varepsilon_{\text{kpl}}}{k_{\text{g,kpl}}} \right] \quad (2.5)$$

Burada ε , toplam gözenekliliği göstermektedir. İndisler k , su , ag , gk , n , dif ve kpl , sırasıyla katı, su, açık gözenek, gözenek, nem, difüzyon ve kapalı anlamına gelmektedir. Ayrıca $V_{\text{gk,n}}$, nemli gözenek oranıdır. Diğer önemli terim gözenek difüzyonu nedeniyle ısı taşınımını (k_{dif}), De Vries (1966, 1975), Krischer ve Kast (1992) ve Tsotsas (2002) çalışmalarından yararlanılarak tanımlanmıştır.

2.1.2. Geometrik ortalama modeli

Bir malzemenin efektif ısı iletkenliği, birçok durumda aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$k_e = k_s^\varepsilon k_d^{(1-\varepsilon)} \quad (2.6)$$

Bu model, Singh ve ark. (1998), Tavman (1998), ve Maqsood ve Karman 2005) tarafından verilmektedir. Kohout ve ark. (2004) tarafından ideal olarak karışık fazların ısı iletkenliği, bu fazların ağırlıklı geometrik ortalaması ile ifade edilmiştir:

$$k_e = \prod_{i=k,sv,g} k_i^{V_i} \quad (2.7)$$

Burada k_e , efektif ısı iletkenliktir. V_i ve k_i ayrı ayrı fazların hacim oranları ve ısı iletkenlikleridir. Benzer bir yaklaşım bazı çalışmalarda esnek modeller arasında Chaudhary-Bhandari modeli ile görülebilir (Chaudhary ve Bhandari 1968, Carson ve ark. 2006, Carson 2006):

$$k_e = [(1 - \varepsilon)k_d + \varepsilon k_s]^F \left(\frac{(1 - \varepsilon)}{k_d} + \frac{\varepsilon}{k_s} \right)^{(1-F)} \quad (2.8)$$

F değeri, 0 ve 1 aralığında olup malzemedeki bileşenlerin kombinasyonu yada dağılım faktörüdür.

Bu model, yüksek gözenekliliğe sahip metal köpükler için Singh ve Kasana (2004) tarafından çalışılmıştır. Burada fazların ağırlıklı geometrik ortalaması, Chaudhary-Bhandari model ile benzerdir. Tek fark düzeltme faktörü F, aşağıdaki gibi genişletilmiştir:

$$F = \frac{\ln \left(\varepsilon \frac{k_e}{k_s} + (1 - \varepsilon) \frac{k_e}{k_d} \right)}{\ln \left(1 + \varepsilon (1 - \varepsilon) \left(\frac{k_d}{k_s} + \frac{k_s}{k_d} - 2 \right) \right)} \quad (2.9)$$

Bu terim, sistemin gözenekliliğinin, bileşen fazların ısı iletkenlik oranının bir fonksiyonudur ve grafik halinde verilmiştir. Bu fonksiyonun artmasıyla liner olarak F'in arttığı görülmüştür. Burada, c sabiti ile F yeniden tanımlanmıştır:

$$F = c \left(0,3031 + 0,0623 \cdot \ln \left(\varepsilon \frac{k_d}{k_s} \right) \right) \quad (2.10)$$

2.1.3. Maxwell modeli

Maxwell modeli, optimal ısı iletim yol analizi düşünülerek açıklanmaktadır. Maxwell model yaklaşımı, dağılı fazların birbiriyle temassız olduğu bir yaklaşımdır (Maxwell, 1954). Buradan, dağılı fazın asla sürekli iletim yollarını oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Maxwell modeli, seyrek fazlar için bir ortalama alan yaklaşımı olarak bilinmektedir. Maxwell modeli, sürekli faz yönünde maksimum eğilim içindedir. Maxwell, homojen ortamda gelişigüzel dağılı ve etkileşimsiz homojen kürelerin iletkenliği için basit bir ilişki elde etmiştir:

$$k_e = k_s \left[\frac{2k_s + k_d - 2(k_s - k_d) \cdot V_d}{2k_s + k_d + (k_s - k_d) \cdot V_d} \right] \quad (2.11)$$

Burada, V_d dağılı fazın hacim oranıdır ve $(1-\varepsilon)$ olarak ta ifade edilebilir. Bu model, düşük dağılımlı dolgu fazlarında efektif ısı iletkenliği çok iyi tahmin etmektedir. Oysa yüksek konsantrasyonlu dolgu fazları olan malzemelerde, dolgu parçacıkları ya birbiri ile temas halinde ya da ısı akışı yönünde iletim zincirleri oluşturmaktadır. Bu yüzden, bu modelin efektif ısı iletkenliği düşük tahmin ettiği görülmüştür. Ayrıca bu temel model, Pham ve Willix (1989), Tavman (1998) tarafından verilmektedir. Bunun yanısıra Maqsood ve Kamran (2005) tarafından genişletilmiş Maxwell modeli olarak ele alınmaktadır. Beck (1976) tarafından bu modelin iki bileşenden birinin gözenekliliği 0,25'i ve ısı iletkenlik oranı (k_d / k_s) 10'u aşmadığı zaman güvenilir sonuçları verebileceği belirtilmiştir. Carson ve ark. (2003), Maxwell modelini j parametresi ile tanımlayarak vermektedir. Burada, Maxwell modelindeki 2 sayısı yerine $(j-1)$ katsayısı koyularak *Maxwell-Hamilton modeli* olarak verilmiştir. Ayrıca, esnek modeller arasında verilen *modifiye edilmiş Maxwell modeli* de yer almaktadır. Bu durumda, Maxwell modeldeki 2 yerine $[j^2/(1-j^2)]$ katsayısı kullanılmaktadır (Carson 2002, 2006 ve Carson ve ark. 2006). Burada j , ampirik parametre olmasına rağmen malzeme içindeki ısı iletim yollarının niteliğinin bir ölçümüdür. Bu model, seyrek dağılımlara sahip

malzemeler için uygun bir modeldir. Bu model, farklı dağılımlı faz şekli için Belova ve Murch (2004) tarafından incelenmiştir. Burada, küre şeklindeki dolgu fazlarının yüksek oranlarında uygun efektif ısı iletkenlik sonuçları elde edilmiştir.

Benzer modeller arasında sunulabilecek Maxwell-Eucken modeli, ana sebebi farklı olmakla birlikte çok iyi bilinen modellerdendir. Bu modelin, iki formu ile karşılaşılmaktadır. Bunlar, Maxwell–Eucken 1 ve 2 denklemdir. Burada Maxwell-Eucken 2 modeli;

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s)\varepsilon}{2k_d + k_s + (k_d - k_s)\varepsilon} \right] \quad (2.12)$$

ile verilmektedir. Burada k_s ve k_d , sırasıyla sürekli ortamın ve dağılı fazın ısı iletkenlikleridir. Maxwell–Eucken 2 modeli, izotropik iç gözenekli malzemeler için, üst sınır olarak belirlenmiştir (Carson ve ark. 2006). Maxwell–Eucken 1 denklemi ise, izotropik dış gözenekli malzemelerin alt sınırı olarak verilmektedir (Carson ve ark. 2006). Maxwell–Eucken 1 denklemi, sürekli faz olarak havanın alındığı bir modeldir. Maxwell-Eucken’in bu iki formu, Wang ve ark. (2006) tarafından kullanılarak bir prosedür geliştirilmiştir. Literatürdeki “Maxwell”, “Maxwell–Eucken”, “katı sürekli” ve “akışkan-sürekli” modeller hakkında Carson ve ark. (2006) tarafından önemli noktalar ortaya konmuştur. “Maxwell” ve “Maxwell–Eucken” modellerin matematiksel olarak aynı olduğu belirtilmiştir. Farklılıkları ise Maxwell model elektrik iletkenliğe uygulanırken Eucken’in ısı iletkenliğe uygulandığı belirtilmiştir. “katı sürekli” ve “akışkan-sürekli” tanımlamaların, Brailsford ve Major (1964) tarafından ilk kez ortaya atıldığı açıklanmıştır. Bunlar, aslında sürekli fazın katı bileşen yada sıvı bileşen ele alınmasına göre değişmektedir.

Üç veya dört bileşenleri içeren gözenekli ortamların efektif ısı iletkenliği, Hamdami ve ark. (2003) tarafından üç adımda tahmin edilmiştir. Herbir adımda, Maxwell modeli iki fazlı olarak kullanılmaktadır. İlk adımda, sürekli su fazı ve dağılı buz fazı düşünülmektedir. İkinci adımda, sürekli katı faz ve dağılı su-buz fazı ele

alınmıştır. Son olarak, üç fazın yer aldığı sürekli katı-su-buz fazı ve dağılılı hava fazı ile tanımlanmıştır. Farklı çalışmalarda, Maxwell'in modelleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{k_e}{k_s} = 1 + \frac{3((k_d/k_s) - 1)V}{((k_d/k_s) + 2) - ((k_d/k_s) - 1)V} \quad (2.13)$$

Burada, k_s ve k_d sürekli akışkan ortamının ve dolgu parçacığının ısı iletkenliğidir. V ise parçacık hacim oranıdır (Xue ve Xu 2005).

$$\frac{k}{k_s} = 1 - \left[\frac{3 V (1 - k_d/k_s)}{(2 + k_d/k_s)} \right] \quad (2.14)$$

Bu, simetrik olmayan modellerdendir. Burada k_s ve k_d , sırasıyla sürekli ortamın ve dağılılı kürelerin ısı iletkenlikleridir (Cernuschi ve ark. 2004).

$$k_e = k_d \left[\frac{2(1 - \varepsilon)}{(2 + \varepsilon)} \right] \quad (2.15)$$

Bu, klasik Maxwell modelidir. En basit model olup sürekli katı faz içinde izole edilmiş gözenekler olarak düşünülmektedir. Bu model, gelişigüzel kürelerin varlığında ışınım ve taşınımın ihmal edildiği bir modeldir (Jang ve Matsubara 2006).

$$\frac{k_e}{k_s} = \left[\frac{1 + 2\beta V_d}{1 - \beta V_d} \right] \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{(k_d - k_s)}{(k_d + 2k_s)} \quad (2.17)$$

Bu model, Chiew ve Glandt tarafından geliştirilmiş Maxwell modeli olarak görülmektedir (Chiew ve Glandt 1983, Gonzo 2002). Bu modelin, %10'a kadar düşük yoğunluklu gözenekli malzemelerin tahmininde iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir. Daha sonra yüksek yoğunluklu gözenekli malzemeler için Denklem (2.16)'deki model,

rollerin değişimiyle geliştirilmiştir. Bu yeni modelde V_d , β ve k_e/k_s parametreler yerine $(1-V_d)$, $\hat{\beta}$ ve k_e/k_d kullanılmıştır. $\hat{\beta}$, $(k_s - k_d)/(k_s + 2k_d)$ olarak verilmiştir. k_d , akışkan ve katı tip olabilecek kürelerin iletkenliğidir. k_d/k_s değerlerinin geniş aralığı $(0,0071 \sim 1879,4)$ için geçerlidir. Ayrıca, $\hat{\beta}$ parametresi $(k_d - k_s)/(k_d + 2k_s)$ farklılığı ile Ghodoossi (1988) tarafından verilmiştir.

2.1.4. Nielsen modeli

Nielsen'e göre bir gözenekli malzemenin ısı iletkenliği, sürekli ortamın ve dolgu fazının ısı iletkenliği (k_s ve k_d) ile ilişkilidir (Nielsen 1974). Bu model,

$$k_e = k_s \left[\frac{(1 + wBV_d)}{|1 - CBV_d|} \right] \quad (2.18)$$

ile verilmektedir. Burada B ve C parametreleri ise, aşağıdaki gibi ele alınmıştır. Nielsen tarafından geliştirilen bu model, malzemelerin geniş bir aralığında basit bir formülasyon ile uygulanabilmesi nedeniyle Pezzotti ve ark. (2000) tarafından da kullanılmıştır.

$$B = k_s \left[\frac{((k_d/k_s) - 1)}{((k_d/k_s) + w)} \right] \quad (2.19)$$

$$C = 1 + [(1 - V_M)/V_M^2] V_d \quad (2.20)$$

Burada, V_M dolgu fazının maksimum paketleme oranıdır. w ise, dolgu parçacıklarının geometrisine bağlı boyutsal bir şekil faktörüdür. w parametresi, genelleştirilmiş Einstein katsayısı ile ilişkili olarak ele alınmaktadır ($w=k_E-1$). w değeri, bazı parçacıklar için 2 ve 0,5 olarak verilmektedir (Nielsen 1973 , 1974).

Bu model farklı formlarda da ele alınmıştır (Ghodoossi 1988, Gonzo 2002). Ayrıca tek boyutlu kısa lif takviyeli polimer kompozitlerin ısı iletkenliği, bu model ile tanımlanmıştır (Fu ve Mai 2003). Lif yönüne dik ve paralel ısı iletkenlikler için bu

denklem kullanılırken şekil faktörü w , sırasıyla 0.5 ve $2(L/d_d)$ kullanılmıştır. Bu model, Tavman (1998) tarafından Lewis ve Nielsen Model olarak sunulmuştur. Burada, bu modelin Halpin-Tsai denkleminin farklı bir formu olduğu ifade edilmiştir. Nielsen'e (1974) göre, w ve V_M 'in gelişigüzel paketli küresel parçacıklar için 1,5 ve 0,637 alabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, gelişigüzel paketli düzensiz şekilli parçacıklar için $w=3$ ve $V_M=0,637$ olarak verilmiştir.

2.1.5. Halpin-Tsai model

Bu model yukarıdaki modeller ile benzerdir ve aşağıdaki gibi verilmektedir (Halpin, 1969, 1984):

$$k_e = \frac{1 + 2(L/d_d)\mu V_d}{1 - \mu V_d} k_s \quad (2.21)$$

$$\mu = \frac{(k_d/k_s) - 1}{(k_d/k_s) + 2(L/d_d)} \quad (2.22)$$

Burada d_d , dolgu lif çapıdır. Ayrıca bu model, tekyönlü kısa lifli malzemelerin ısı iletimini tanımlamak için kullanılmıştır (Fu ve Mai 2003). Gemci (1996) tarafından, lif takviyeli malzemelerin enine ısı iletkenliği bu model ile verilmiştir. Burada, $2(L/d_d)$ yerine ξ kullanılmaktadır. ξ , aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\log \xi = \sqrt{3} \log \left(\frac{a}{b} \right) \quad (2.23)$$

Burada a ve b , ısı iletkenliğinin dolgu lif eksenine paralel ve dik yöndeki ölçüm katsayılarıdır. Bu veriler, geniş olarak Agarwal ve Bsoutman (1980) tarafından verilmiştir.

2.1.6. Levy modeli

Levy, sürekli ve dağılı fazlar arasında simetri olmasını sağlamak amacıyla Maxwell-Eucken modeline dayanan bir model ortaya koydu (Levy, 1981). Bu modeli, iki Maxwell-Eucken denklemlerinden hangisinin kullanılacağı problemini ortadan kaldırmak için ele almıştır. Bunun için ortaya koyduğu bu model,

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s)F}{2k_d + k_s + (k_d - k_s)F} \right] \quad (2.24)$$

$$F = \left[(2/G) - 1 + 2V_d - \sqrt{((2/G) - 1 + 2V_d)^2 - (8V_d/G)} \right] / 2 \quad (2.25)$$

$$G = \frac{(k_d - k_s)^2}{(k_d + k_s)^2 + (k_d k_s / 2)} \quad (2.26)$$

ile verilmektedir (Wang ve ark. 2006). Pham ve Willix (1989) tarafından bu model, efektif ısı iletkenlik denklemindeki k_s ile k_d yer değiştirerek ele alınmıştır. Bir başka çalışmada denklem (2.25)'deki V_d 'in tanımı verilerek bu model genişletilmiştir (Becker ve Fricke 1999). Ayrıca, bu modeli rijit modeller arasında $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ sayarak uygulanabilirlik aralığı tespit edilmiştir (Carson ve ark. 2006). Burada fiziki temel, yukarıdaki denklemle aynıdır.

2.1.7. Efektif ortam teorisi (EMT)

Bu model, sürekli yada dağılı faz gelişigüzel dağıtılmış olan bir heterojen malzemeyi göstermektedir. Bileşenlerin bağıl miktarlarına bağlı olarak ikisinden bir bileşen, sürekli ısı iletim yolları oluşturabilmektedir (Carson ve ark. 2005). Efektif ortam teorisi (EMT), rijit modeller ($k_e = k_e(k_i, v_i)$) arasında genel form ile aşağıdaki gibi verilmektedir (Landauer 1952, Kirkpatrick 1973, Carson ve ark. 2005, 2006):

$$\sum_i v_i \frac{k_i - k_e}{k_i + 2k_e} = 0 \quad (2.27)$$

İki bileşen için bu model, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$k_e = \frac{1}{4} \left[(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d + \sqrt{[(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d]^2 + 8k_s k_d} \right] \quad (2.28)$$

Burada k_s ve k_d , sürekli faz olarak havanın ısı iletkenliği ve dağılı faz olarak yoğuşan sıvının ısı iletkenliği ile tanımlanmaktadır.

Bu modelde, malzeme içindeki sıcaklık dağılımına uniform sıcaklıktaki ve ısı iletkenlikteki katkı malzemesi ile yaklaşılabileceği varsayımına dayandırılmaktadır (Carson ve ark. 2005, Davis ve ark. 1975). Ayrıca bu model, izotropik dış gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin üst sınırı olarak belirlenmiştir. İzotropik iç gözenekli malzemeler için ise, bu model alt sınırı oluşturmaktadır. Carson ve ark. (2006) tarafından bu modelinin *modifiye edilmiş denklemleri*, verilmiştir. Modele F parametresi ilave edilerek esnek modeller, k_e (k_i, v_i, F) arasında gösterilmektedir. Denklem (2.27)'deki 2 sayısı yerine $[F / (1 - F)]$ ifadesi kullanılmaktadır (Carson, 2002). Bu modele benzeyen *Kirkpatrick modelde* ise, bu parametre $[0,5F - 1]$ 'dir (Kirkpatrick, 1973). Burada F, ampirik parametredir veya dağıtım oranıdır. Cernuschi ve ark. (2004) tarafından çok geniş boyut dağılımına sahip kürelerden oluşan ve birbirine simetrik sistemde bu model yeniden ele alınmıştır. Burada, 2 sayısı yerine $(d_b - 1)$ kullanılan parametredir. Burada d_b , boşluk boyutudur. Ayrıca bu modelin, gelişigüzel düzenlenmiş elipsoidler içinde genişletilebileceği belirtilmektedir.

Efektif ortam teori modeli, Xue ve Xu'e (2005) göre Bruggeman'ın efektif ortam teorisi olarak verilmektedir. Burada, Denklem (2.27) herbir bileşen için açıldığında $(1 - (V/\alpha))$ ve (V/α) katsayıları kullanılmaktadır. V ve α , sırasıyla nanoparçacıkların hacim oranı ve k_d/k_s iletkenlikler oranıdır. Ayrıca model, Belova ve

Murch (2004) tarafından *Brailsford ve Major model* olarak verilmektedir. Verilen bu model, Maxwell ile ilişkili bir ortalama yaklaşımdır. Wang ve ark. (2006) tarafından efektif ortam teori modelinin ve diğer dört temel modelin (Seri, Paralel, Maxwell-Eucken'in iki formu) kullanıldığı bir prosedür de geliştirilmiştir. Herbir bileşenin yapısal hacim oranlarıyla oluşturulan bir prosedürdür. Brailsford ve Major (1964) tarafından, çok bileşenli malzeme için genel bir model olarak ele alınmıştır. Bu genel model ile, seri modele, paralel modele, Maxwell-Eucken denklemlerine, efektif ortam teori modeline ulaşılabilmektedir.

2.1.8. Krischer'in yaklaşımı

Krischer'in yaklaşımında, karmaşık bir yapı daha basit yapıların karışımı olarak ele alınmaktadır. Burada, daha basit yapıların her birinin bağıl miktarları ampirik olarak tanımlanarak karışımın ısı iletkenliği belirlenmektedir. Krischerin yaklaşımı, seri ve paralel iletkenliklerin ağırlıklı harmonik ortalaması olarakta önerilmektedir (Carson ve ark. 2005, 2006). Bu model, F dağıtım faktörü ile esnek modeller $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ arasında gösterilmektedir. Krischer modeli aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Krischer 1963, Carson ve ark. 2005, 2006):

$$k_e = \left[\left(\frac{1 - F}{k_{\text{paralel}}} \right) + \left(\frac{F}{k_{\text{seri}}} \right) \right]^{-1} \quad (2.29)$$

F parametresi sıfır olduğunda Krischer'in modeli paralel modele indirgenmektedir. Ve F, 1 olduğunda ise seri modele ulaşılmaktadır. Bu yüzden, 0 ve 1 arasında değişen Wiener sınırları ile sınırlı bölgede herhangi bir yerde $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ yer almaktadır. Krischer'in modelinde, F değeri uygun tahmin edilirse kabul edilebilir tahminler beklenebilir. Bu model, gıda mühendisliği literatüründe en fazla kullanıma sahip modeldir.

Yüksek gözenekli çok bileşenli malzemeler, bu model ile analiz edilebilmektedir. Hamdami ve ark. (2003) tarafından üç adımda, karmaşık dört oranın

karışımı ile verilmektedir. Yapı, kuru madde, su, buz kristalleri ve gaz fazı (hava ve su buharı içeren) fazlarından oluşmaktadır. Krischer yaklaşımında, bu fazlar ele alınarak efektif ısı iletkenlik belirlenmektedir (Maroulis ve ark. 2002, Hamdami ve ark. 2003). Sıcaklık nedeniyle gizli ısı taşınımının etkisini de düşünerek gözeneklerdeki efektif ısı iletkenlik, geliştirilmiştir. Bu, yoğuşma-buharlaşmanın ve havanın ısı iletkenlikleri ile birlikte aşağıdaki gibi verilmektedir (De Vries ve ark. 1989, Hamdami ve ark.'a 2003):

$$k_s(T) = k_h(T) + k_{yoğ-buh} F_{yoğ-buh} \quad (2.30)$$

$$k_{yoğ-buh}(T) = \frac{D_{sb}}{R_{\bar{u}}} \frac{P}{T P - a_{su} P_{doy}} L_o a_{su} \frac{dP_{doy}}{dT} \quad (2.31)$$

Denklem (2.30)'daki ikinci terim, gizli ısı taşınımını nedeniyle eşdeğer ısı iletkenliktir. Burada T sıcaklık olup D_{sb} , P, P_{doy} ve L_o sıcaklığa bağlıdır. D_{sb} , havadaki su buharının difüzyonudur. P ve P_{doy} , basınç ve doyma basıncıdır. L_o , buharlaşma gizli ısıdır. $F_{yoğ-buh}$, buhar taşınımına karşı direnç faktörüdür. a_{su} , su içeriğini göstermektedir.

Benzer olarak, Wang ve ark. (2006) tarafından F ve (F-1) ağırlık değerlerine sahip beş temel modelden (seri, paralel, Maxwell...) biri seçilerek modelleme yapılmaktadır. Bir gözenekli ortamın n yapılı sistemde j yapısı içinde i bileşene sahip olduğu düşünülerek tasarlanmıştır. Yapının ısı iletkenliği, yapının bileşenlerine göre belirlenmektedir. Örneğin, bilinen bileşenlere ve belirli yapılara sahip bir malzeme için Maxwell-Eucken model 1 + Efektif Ortam Teorisi modeli ile çözerek hesaplanabilir:

$$k_e = \frac{k_s V_s \left(\frac{1 - 2 \cdot V_d \cdot V_{ds}}{2 \cdot V_s} \right) + k_d V_d V_{ds} \frac{3k_s}{2k_s + k_d}}{V_s \left(\frac{1 - 2 \cdot V_d \cdot V_{ds}}{2 \cdot V_s} \right) + V_d V_{ds} \frac{3k_s}{2k_s + k_d}} \quad (2.32)$$

Burada $1 \leq k_s/k_d \leq 100$ aralığı için,

$$\begin{aligned}
V_{ds} = & (0,1353 \cdot \ln(k_s/k_d) - 0,1193) \cdot V_s^3 \\
& + (0,2551 \cdot \ln(k_s/k_d) - 0,1711) V_s^2 \\
& + (0,1203 \cdot \ln(k_s/k_d) - 0,0523) V_s + 0,5
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Nemli ve kuru gözenekli malzemelerin ısı iletkenliğini tanımlanmada yine bu model kullanılmıştır (Ochs ve ark. 2008). Burada, kısmen kapalı gözenekli malzemenin ısı iletkenliği için en iyi sonuca Krischer ve Kast (1992) tarafından önerilen model ile ulaşılabilceği ifade edilmiştir. Bu model, katı, sıvı su, açık ve kapalı gözeneklerdeki nemli hava ve kuru hava gibi bileşenlerin seri ve paralel tabakalar halindeki ısı dirençlerinin toplamına dayanmaktadır. (F) ve (F-1) ağırlıklı dağılım faktörü ile ele alınmıştır. Kuru malzemelerde, (1-ε) katı ve ε hava oranlarına sahip tabakalara indirgenmiştir. Burada, gözenegin ısı iletkenliği gazın moleküler iletiminin ve ışınımının katkısından oluştuğu belirtilmesi önemlidir. Taşınım ihmal edilmektedir.

Bu model, yüksek gözenekli metal köpüklerin efektif ısı iletkenliğinde de kullanılmıştır. Bhattacharya ve ark. (2002) tarafından, fazların seri ve paralel düzenlenmesiyle oluşturulmuştur. Bu tanımlamaya benzer bir yaklaşım, seri haldeki beş tabaka ve her bir tabakada katı ve sıvı fazların paralel olduğu birim hücre için Calmide ve Mahajan (1999) tarafından yapılmıştır. Farklı geometriye genişletmişlerdir. Ayrıca Bhattacharya'nın modeli ile benzerlik gösteren bir çalışmada da dağılım faktörü F, üssel yerine çarpım olarak verilmektedir (Singh ve Kasana 2004). Carson ve ark.'nın (2006) çalışmasında, esnek modeller arasında gösterilen $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ Renaud Modeli Krischer'in yaklaşımına benzemektedir. Bu model ise, seri ve paralel modellerin sistemdeki katkısına göre belirlenmektedir (Renaud ve ark., 1992).

2.1.9. Russell modeli

Bu modelde, sürekli ortam içinde aynı boyutlu dağılı izole küplerin olduğu varsayılmaktadır (Tavman 1998). Elektrik analogisi kullanılarak geliştirilen bu model (Russell 1935), aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$k_e = k_s \cdot \left[\frac{V_d^{2/3} + (k_s/k_d)(1 - V_d^{2/3})}{V_d^{2/3} - V_d + (k_s/k_d)(1 - V_d^{2/3} + V_d)} \right] \quad (2.34)$$

Bu eşitlik, Tseng ve ark. (1997) tarafından ışınlama ısı transferi katkıları ilave edilerek verilmektedir.

2.1.10. Diğer modeller

Tüm gözenekli veya kompozit sistemlere genel olarak uygulanabilecek bir model elde etmek imkânsızdır (Carson ve ark. 2006). Yukarıda verilen temel modellerin de geneli tanımlaması zordur. Bu yüzden, literatürdeki efektif ısı iletkenlik modelleri uygulama aralığı ile birlikte sınıflandırılarak verilebilir (Yüksel ve Avcı 2010):

- Basit ve temel bileşenleri içeren efektif ısı iletkenlik modeller
- Ekstra parametre içeren efektif ısı iletkenlik modeller
- Bir bileşen bilgisi isteyen efektif ısı iletkenlik modeller
- Diğer ısı transferi mekanizmalarını içeren efektif ısı iletkenlik modeller

Basit ve temel bileşenleri içeren modeller, literatürde “ata” modeller ve türevleri olarak yer almaktadır. Bu modeller, Ek-1 Çizelge.4.1’de verildi. Ekstra parametre içeren modeller ise genel uygulanabilirliğe sahip olabilecek modeller arasında verilmektedir. Bu grupta bu parametrenin tanımı yada deneysel tespiti gerektirdiğinden ayrı bir sınıf olarak Ek-1 Çizelge.4.2’de verildi. Bunun yanısıra bir bileşen bilgisi isteyen efektif ısı iletkenlik modeller de Ek-1 Çizelge.4.3’de verildi. Bu modellerde, malzemeye özgü modeller olmasından dolayı ayrıldı. Ayrıca literatürde farklı ısı transferi mekanizmalarını içeren efektif ısı iletkenlik modelleri yer almaktadır. İletim yanında taşınımın ve ışınlımın da ele alındığı modeller Ek-1 Çizelge.4.4’de verildi.

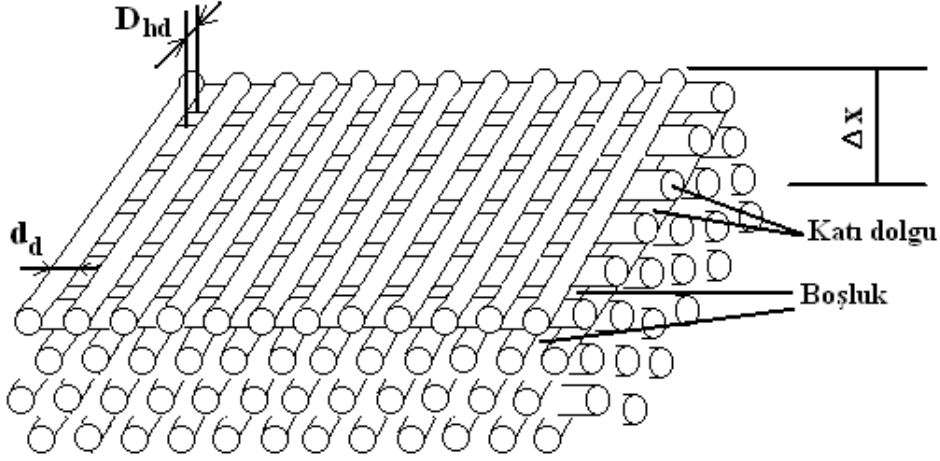
2.2. Geliştirilen Matematik Model

Bir ortamda yada ortamlar arasında ısı geçişi, sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımıdır. Gözenekli sistemlerde ısı geçişi, katı ortam içerisinde bulunan hava ile bir matris oluşturduğu halde gerçekleşir. Bu durumda efektif ısı iletim katsayısı,

boşluk veya havanın hacimsel oranı ve katı malzemenin ısı iletim özellikleri ile modellenmektedir. Bu, efektif ısı iletkenlik modellerinde görüldü. Bu modeller, ısı iletimini temel almaktadır. Isı geçişinin farklı türleri de mevcuttur ve bunlar ısı taşınımı ve ışıyımını olarak bilinmektedir. Bunlar, atomik, partiküler ve moleküler faaliyetlerin ilişkisi ile açıklanmaktadır. Ortamda gözenegin, liflerin, farklı/katkılı malzemelerin yer alması, birbiri ile ilişki halinde olan moleküllerin birbirine enerji aktarımını etkileyeceği görülebilir. Bu yüzden, gözenekli ortamın bu farklı durumları da içeren bir efektif ısı iletkenlik modeli ile temsili önemlidir.

Gözenekli ortam yapısında, katı ortam, gözenek, gözenekteki akışkan yer almaktadır. Bunların efektif özellikleri, farklı ısı transfer mekanizmalarını ortaya koymaktadır. Ortamına göre katı veya akışkan durgun ortamında ısı iletimi, hareketli bir akışkan ortamında ısı taşınımı, elektromagnetik enerji yayılımı olan ortamda ise ışıyım gerçekleşmektedir. Bu durum katılarda ve akışkanlarda incelendiğinde, akışkanlarda moleküler arası mesafe daha fazla olduğu için ısı enerjisi transferi daha az etkilidir. Bununla birlikte, katı ortamın yalıtkan ve iletken olması da etkilemektedir. Bu gibi mekanizmalar nedeniyle, ısı geçişini tanımlamada kullanılan efektif ısı iletkenlik modelleri geniş tutulmalıdır. Gözenekli bir ortamın efektif ısı iletkenliği, ortamın tanımı ve bu ısı transfer mekanizmaları ile ortaya konmalıdır.

Gözenekli bir ortam, katı dolgulardan ve bu dolguları kaplayan sürekli ortamdan oluşmaktadır. Sürekli ortamda akışkan olarak havanın kullanıldığı buna karşın katı olarak farklı maddeler olabileceği bir sistemdir. Ortamın, açık gözenekli iki fazdan oluşan bir malzeme olduğu düşünülerek matematik modellemesi yapıldı (Şekil.2.1). Açık gözenekli ortamdaki katı dolguların çaplarının sabit, homojen dağılımlı, ve bunun yanında katı dolgu ve boşluk sayılarının aynı olacağı gözenekli bir ortam olarak varsayıldı. d_d çapında lifler yada parçacıklardan oluşmuş bir gözenekli yapı için ortalama gözenek çapı D_{hd} ise, Şekil.2.1'deki gibi verilebilir.



Şekil.2.1. Gözenekli ortamda matematik model ortamı

Δx kalınlığında yalıtım malzemesi için gözeneklilik yada porozite (ε) hacimlere göre,

$$\varepsilon = \frac{V_{gk}}{V_t} \quad (2.35)$$

ifade edilir. V_t ise $V_{gk} + V_d$ toplamı yazılacağından,

$$\frac{V_{gk}}{V_d} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (2.36)$$

yazılabilir. Şekle göre homojen dağılımlı bir yapıda, lifler yada parçacıklar küresel veya silindirik kabul edilirse bir kare kesitli gözenek için aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada, D_{hd} kare kenarı veya hidrolik çap ise bu kesite düşen giriş uzunluğuda D_{hd} kadardır. Kalınlık boyunca $\Delta x/d_d$ kadar dolgu olduğuna göre,

$$V_{gk} = D_{hd}^2 \Delta x \quad (2.37)$$

$$V_d = \frac{\pi d_d^2}{4} D_{hd} \frac{\Delta x}{d_d} \quad (2.38)$$

ifadeleri yazılabilir. Bunlar birbirine oranlandığında,

$$\frac{V_{gk}}{V_d} = \frac{4}{\pi} \frac{D_{hd}}{d_d} \quad (2.39)$$

veya

$$D_{hd} = d_d \frac{\pi}{4} \frac{V_{gk}}{V_d} = d_d \frac{\pi}{4} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) \quad (2.40)$$

elde edilir. Bu eşitlik, Basmadjian (2003) tarafından verilen hidrolik çap ifadesiyle aynıdır. Bu çalışmada, $(\pi/4)$ katsayısı yerine 0,46 katsayısı kullanılarak hidrolik çap tanımlanmaktadır.

Gözenekli bir ortamın efektif özelliği, iletim yanında taşınım, difüzyonla, ışınlama gerçekleşen ısı iletkenlikler dahil edilerek tespit edilebilir. Bu durumda efektif ısı iletkenlik, katının ve durgun akışkanın oluşturduğu iletimle ısı transferi, akışkanın hareketine bağlı taşınım ısı transferi ve bunun yanında akışkan partiküllerinin mol derişikliğine bağlı difüzyonla ısı transferi olarak ele alındı. Ayrıca, gözenekli ortamın yüksek gözeneklilikte ve sonlu bir sıcaklıkta olmasıyla ışınlama ısı transferi de diğer bir parametre olmaktadır. Gözenek boyutunun küçük veya büyük olmasına bakılmaksızın bu ısı transferi mekanizmalarının ısı iletkenlik değerleri belirlenerek, modelleme gerçekleştirildi. Sıcaklığın ve basıncın etkisi de, bu modele dahil edilebilir. Sıcaklığın ortam akışkanın ısı iletim katsayısını arttıracığı bilinmektedir. Ayrıca, ısı iletimi ile basıncın değişimini ele alan çalışmalar da mevcuttur (Lee ve ark. 2002). Gözenekli yapıların efektif ısı iletkenliği, aşağıdaki gibi verilebilir:

$$k_e (T) \cong k_{il} + k_{e\varnothing,t}(T) + k_{e\varnothing,d}(T) + k_{e\varnothing,i\varnothing} \quad (2.41)$$

Burada k_{il} , verilen modeller alınarak belirlenen iletimle ısı iletkenliktir. $k_{e\varnothing,t}$, $k_{e\varnothing,d}$ ve $k_{e\varnothing,i\varnothing}$ ise, taşınım, difüzyonla ve ışınlama gerçekleşen eşdeğer ısı iletkenliği ifade etmektedir. Bazı durumlarda, boşaltılmış ortamlar ve yoğuşma, buharlaşma gibi faz değişimi modele ilave edilebilir.

2.2.1. Durgun ortamların ısı iletkenliği

Gözenekli ortamda durgun ortamların ısı iletkenliği, katı ve akışkan fazın ısı iletkenliklerine ve hacim oranlarına bağlı ısı iletimini ifade etmektedir. Bu, bileşenlerin atomik, moleküler, kafes yapısı ile ilgili enerji aktarımını içerir. Farklı hacim oranlarında, farklı ısı iletkenliklerde bileşenler ve bu bileşenlerin kombinasyonu, efektif ısı iletkenliği belirler. Bu efektif özellik, bileşenlerin her birinin ayrı ayrı veya birlikte ele alınmasıyla çözümlenebilir. Birçok çalışmada, birlikte ele alınarak efektif ısı iletkenliğe ulaşılmaktadır. Bu durumda, katı ortam yanında durgun akışkanın ısı iletimini ele alan temel ısı iletkenlik modelleri ile efektif ısı iletkenlik belirlenmektedir. Bu modeller, seri ve paralel model, geometrik ortalama modeli, Maxwell modelleri, EMT modeli, Krischer yaklaşımı, Russell modeli, Levy modeli, Nielsen modeli, Halpin-Tsai eşitliği olarak verilebilir. Seri ve paralel model, aranan efektif ısı iletkenliğin alt ve üst sınırını vermektedir. Bu modellerden Nielsen ve Halpin-Tsai modelleri, dolgu fazının maksimum paketleme oranı, çapı ve uzunluğu bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Aynı zamanda Krischer modeli de F dağılım faktörünü bilmeyi gerektirmektedir. Bu nedenle, durgun ortamların ısı iletkenliği geometrik model ile belirlendi. Bu, ideal olarak karışık fazların ısı iletkenliği ya da bu fazların ağırlıklı geometrik ortalaması ile,

$$k_{il} = k_s^\varepsilon k_d^{(1-\varepsilon)} \quad (2.42)$$

ifade edilebilir. Burada k_d ve k_s , katı ve akışkan fazların ısı iletkenliğidir. Ayrıca, Maxwell, EMT, Levy, Russell modelleri de ele alınarak değerlendirme yapılabilir.

2.2.2 Doğal taşınımın gerçekleşen ısı iletkenlik

Yüksek gözeneklilikte ve büyük gözeneklerde, akışkanın hareketli olmasıyla taşınımın ısı transferi önem kazanır. Gözenekli ortamda taşınımın ısı iletkenlik ise, gözenekler arasında akışkanın kitle veya makroskopik hareketi ile enerji aktarımıdır. Gözenekli ortamlarda gözeneği dolduran hava veya akışkan sıcaklık farkının sonucu olarak ideal gaz denkleminde göre yoğunluğu azalacaktır. Bu doğal taşınım olayı,

yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri olarak ifade edilir. Gözenek büyüklüğüne göre, doğal taşınımın gözenekli ortamın efektif ısı iletim katsayısını etkileyeceği ifade edilmektedir (Matiašovský ve Koronthályová 2000, Zeitler 2000). Dış etki olduğunda taşınım olayı, zorlanmış taşınım olarak ele alınabilir.

Gözenekliliği ε olan bir yalıtım malzemesi, d_d çapında parçacıklardan yapılmış Δx kalınlığında, iki yüzey arası ΔT sıcaklık farkında ve sıcak yüzey alt tarafta bulunuyor ise kaldırma kuvvetleri etkisinde yada doğal taşınım ile enerji taşıyacaktır. Rejim halinde bu yapıda sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru birim yüzeyde,

$$\Delta P_{kd} = (\Delta\gamma)\Delta x = g \Delta x (\rho_{sğ} - \rho_{sk}) \quad (2.43)$$

büyükliğinde kuvvet oluşacaktır. Bu kuvvet etkisinde hareket eden akışkan gözenekler arasından laminar akışta hareket ederken yerel ve sürekli dirençlerle karşılaşacaktır. Bu durumda birim yüzeyde Δx kalınlığındaki malzemede direnç kuvveti,

$$\Delta P_{dr} = \left(\sum f \frac{\Delta x}{D_{hd}} + \sum c_D \frac{\Delta x}{d_d} \right) \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.44)$$

şeklinde yazılabilir. Burada laminar akış için f ,

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64 \gamma}{v D_{hd}} \quad (2.45)$$

ve c_D ise küre ve silindir için (Umur 2001),

$$c_D \cong \frac{24}{Re} = \frac{24 \gamma}{v D_{hd}} \quad (2.46)$$

$$c_D \cong \frac{6}{Re} = \frac{6 \gamma}{v D_{hd}} \quad (2.47)$$

alınabilir. Bu direnç katsayıları, yalıtım malzemelerinde lif çapları ve gözeneklilik için uygundur. Denklem (2.44)'deki direnç kuvveti ifadesi buna göre düzenlenirse,

$$\Delta P_{dr} = \left(\frac{64 \gamma \Delta x}{v D_{hd}^2} + \frac{6 \gamma \Delta x}{v d_d^2} \right) \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.48)$$

$$\Delta P_{dr} = \gamma \Delta x \rho v \frac{1}{d_d^2} \left(\left(\frac{d_d}{D_{hd}} \right)^2 32 + 3 \right) \quad (2.49)$$

elde edilir. Burada, D_{hd} hidrolik çap denklemi (2.40) kullanılır ve düzenlenirse,

$$\Delta P_{dr} = \gamma \Delta x \rho v \frac{1}{d_d^2} \left(\left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \frac{16}{\pi^2} 32 + 3 \right) \quad (2.50)$$

$$\Delta P_{dr} = \gamma \Delta x \rho v \frac{1}{d_d^2} \left(51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right) \quad (2.51)$$

elde edilir. Rejim hali için elde edilen iki (kuvvet veya) basınç eşitlenirse;

$$\Delta P_{kd} \cong \Delta P_{dr} \quad (2.52)$$

$$g \Delta x (\rho_{sg} - \rho_{sk}) = \gamma \Delta x \rho v \frac{1}{d_d^2} \left(51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right) \quad (2.53)$$

ifadesine ulaşılır. Buradan birim yüzeyden olan kütleli debi (\dot{m}/A),

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho v = \frac{g d_d^2 (\rho_{sg} - \rho_{sk})}{\gamma \left[51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right]} \quad (2.54)$$

olarak elde edilir. Taşınan ısı miktarı ise ΔT sıcaklık farkı için,

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = (\rho v) c_p \Delta T \quad (2.55)$$

olur. Δx kalınlığı ile çarpılıp bölünürse,

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = (\rho v) c_p \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta x \quad (2.56)$$

yazılabilir. Eşdeğer iletim katsayısı için,

$$\dot{q}_{e\check{s},t} = k_{e\check{s},t} \frac{\Delta T}{\Delta x} = (\rho v) c_p \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta x \quad (2.57)$$

yazılır ve düzenlenirse,

$$k_{e\check{s},t} = (\rho v) c_p \Delta x \quad (2.58)$$

$$k_{e\check{s},t} = \frac{g c_p \Delta x d_d^2 (\rho_{s\check{g}} - \rho_{sk})}{\gamma \left[51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right]} \quad (2.59)$$

“*taşınilma gerekleŒen ısil iletkenlik*” elde edilir. Bu, belirli kalınlıkta (Δx) ve dolgu lifi çapında (d_d) ve gözeneklilikte (ε) numuneler için hesaplanabilir. Burada g , c_p ve γ , yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$), ortamın ortalama özgül ısisı (J/kgK) ve kinematik viskozitesi (m^2/s)’dir. Ayrıca, $\rho_{s\check{g}}$ ve ρ_{sk} soğuk ve sıcak taraftaki ortamın yoğunluğudur. İki plakalı ölçüm sistemlerinde st plakadan daha fazla ısil transfer edilir ve iletim katsayısı artar.

2.2.3 Difüzyonla gerekleŒen ısil iletkenlik

Hava içindeki partiküllerin açık gözenekli ortam içinde mol deriŒikliėi nedeniyle kütle geiŒi gerekleŒir. Hava akıŒı içindeki partiküller, bir yüzeyden diğer yüzeye gaz akıŒı içinde ilerler. Bu gerekleŒen difüzyon olayının hareketi, Brownian hareketi olarak ifade edilir. Çok küçük partiküllerde ($d_d < 0,1\mu\text{m}$) nemli etkisi vardır (Reist, 1993). Yayılma nedeniyle olan net yer deėiŒtirme olayıdır.

Gözenekleri gaz ile dolu bir yalıtım malzemesinde, sıcaklık farkına bağlı olarak yoğunluklar deėiŒir. Basıncı deėiŒimi ise ihmal edilebilir. Yoğunluk farkından dolayı

komşu gözenekler arasında oluşan konsantrasyon farkından dolayı gazın kendi içinde difüzyon beklenir. Bu durum rejim halinde,

$$\frac{\dot{m}}{A} = -D \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.60)$$

şeklinde ifade edilir. Bu yer değiştirme sonucunda,

$$\dot{q} = \left(\frac{\dot{m}}{A}\right) c_p \Delta T \quad (2.61)$$

kadar ısı taşınır. Ortam içerisinde bulunan gaz ideal kabul edilirse,

$$P = \rho R T \quad (2.62)$$

ve P=sabit alınıp kalınlığa göre diferansiyeli alınır ve düzenlenirse,

$$0 = T \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.64)$$

yoğunluk değişimi elde edilir. Bu, denklem (2.60)'da yerine konulursa,

$$\frac{\dot{m}}{A} = D \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.65)$$

sıcaklığa bağlı ifade edilir. Buradan,

$$\dot{q}_{dif} = D c_p \Delta T \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.66)$$

difüzyonla taşınan ısı akısı yazılabilir. Aynı kalınlık ΔT sıcaklık farkında difüzyonla taşınan ısı için, eşdeğer iletkenlik yazılırsa,

$$\dot{q}_{\text{dif}} = k_{\text{eş,d}} \frac{\partial T}{\partial X} = D c_p \rho \frac{\Delta T}{T} \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2.67)$$

olur. Buradan,

$$k_{\text{eş,d}} = D c_p \rho \frac{\Delta T}{T} \quad (2.68)$$

elde edilir. Burada ρ sıcaklığa bağlı olarak,

$$\rho = \frac{P}{R_u T} \quad (2.69)$$

ve D ise, standart sıcaklığa göre Basmadjian (2003)'deki difüzyon katsayısı ifadesi alınır,

$$D = D_0 \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (2.70)$$

yazılabilir. Burada $T_0=298$ K olarak alınır, D_0 298 K sıcaklığındaki değerdir. $P=P_0$ ve ortalama yoğunluk ile çarpılıp bölünürse,

$$k_{\text{eş,d}} = \frac{D_0 c_p \rho_0}{T_0} \frac{\Delta T}{(T/T_0)^{0,25}} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (2.71)$$

“difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik” elde edilir. Burada, c_p , T ve ΔT ortamın ortalama özgül ısısını, ortalama sıcaklığını ve sıcaklık farkını göstermektedir. Ayrıca, ε ve τ , gözeneklilik ve tortusite'dir. Tortusite, 1-10 aralığında olup $\varepsilon > 0,5$ için yaklaşık 1 alınabilir. Hava içindeki difüzyon katsayısı D_0 (cm^2/s) ise,

$$D_o = 10^{-3} T_o^{1,75} \left[\frac{(M_A + M_B)}{(M_A M_B)} \right]^{0,5} / [P_o (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2] \quad (2.72)$$

ile hesaplanır (Basmadjian 2003). Burada V_A , V_B , M_A ve M_B , A ve B maddeleri için molar hacmi ve moleküler ağırlığı ifade etmektedir. Açık gözenekli ortam içerisinde hava için molar hacim (V) $20,1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ve moleküler ağırlık (M) $28,97 \text{ g/mol}$ olarak alınır. T_o ve P_o , mutlak sıcaklık ($298,15 \text{ K}$) ve toplam basınçtır (1 atm). Ochs ve ark. (2008) tarafından verilen difüzyon bağıntısı, su ve subuharının difüzyonu olarak ele alınıp basınç ve değişimini içermektedir. Bu basınç değişiminin bilinmesi önemlidir. Birbirinden farklı amaçlı olarak elde edilen bu bağıntılar, geniş kapsamlıdır. Ayrıca, difüzyonla ısı iletkenlikte Basmadjian'a (2003) göre su içi difüzyon olayının ifadesi,

$$D_{su} = 7,4 \cdot 10^{-8} (\nu M_B)^{1/2} \frac{T(K)}{\mu_{B(\text{centipoises})} V_A^{0,6}} \quad (2.73)$$

kullanılabilir. Burada V_A , ν ve M_B sudaki atomik ve moleküler hacim katkısı, ampirik katsayı ve moleküler ağırlıktır. μ_B centipoises birimindeki viskozitedir.

Difüzyonla ısı iletkenlik, ortalama difüzyon katsayısı denklemi (2.72) kullanılarak bulunabilir. Ayrıca, Basmadjian (2003) tarafından verilen gözenekli ortamlar içinde akışkanın difüzyon katsayısı,

$$D_{gk} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(9700 D_{hd} \sqrt{\frac{T}{M}} \right) 10^{-4} \quad (2.74)$$

(m^2/s) ile belirlenebilir. Burada ε , τ , D_{hd} , T ve M , sırasıyla gözenekliliği, tortusite, hidrolik çapı, ortalama sıcaklığı ve molekül ağırlığını göstermektedir. Tortusite, gözenekli ortamın içindeki yolun eğriliğini ifade etmektedir ve burada ortalama 4-5 civarı tavsiye edilmektedir. Hidrolik yarıçap ise cm olarak alınır. Molekül ağırlığı, akışkana göre değişmekte olup hava için ortalama $28,97 \text{ g/mol}$ olarak alınır.

2.2.4 Işınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik

Herhangi bir ortamdaki ısı ışınım, sonlu sıcaklıklı bir cismin yaydığı enerji ile açıklanmaktadır (Incropera ve DeWitt 2006). Katılar dışında sıvılar ve gazlar da ışınım ile ısı yayarlar. Işınım yayma olayı, cismin yapısından bağımsız olarak cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişim olarak görülebilir. Burada enerji, fotonlar ile aktarılmaktadır. Incropera ve DeWitt'e (2006) göre ışınım ile aktarımın boşlukta daha etkin gerçekleştiğini ifade etmesi önemlidir. Gözenekli ortamın yüksek gözenekliliğe sahip olmasıyla ışınımın etkisinin dikkate alınması gereken diğer bir parametre olduğu görülebilir.

Gözenekli ortam içerisinde ışınım ile ısı transferi, gelen ve yayılan ışınım olarak ele alınabilir (Incropera ve DeWitt 2006). Yayılan ışınım, katı bileşenin ısı enerjisinden kaynaklanır. Bu ise, birim zamanda bir yüzeyden serbest bırakılan enerji, Carson ve ark. (2004) Stefan-Boltzman kanunu ile anlaşılabilir (Lienhard IV ve V 2008). e, farklı yüzeylere sahip cisimlerin yaydığı ışınım olup siyah cisme göre tanımlanır. Bu parametre ise yüzeyin işlenmişliğine, yüzeyi oluşturan malzemeye bağlıdır. Ortam içerisindeki boşluklardan gelen ışınım ele alındığında, birbirini gören katı bileşenden kaynaklanır. Kaynaktan bağımsız olan bu gelen ışınımın bir kısmı veya tamamı yutulabilir. Incropera ve DeWitt'e (2006) göre yutma oranı < 1 ve yüzey ışınım geçirmez ise gelen ışınımın bir kısmı yansıtılır. Incropera ve DeWitt'e (2006) göre birçok mühendislik uygulamasında yüzeyin gelen ışınımına donuk olduğunu yani geçirebilirliğin olmadığıdır. Buradan sadece yutmanın gözenekli ortamın iç enerjisine etki edeceği görülür. Yutma ise yutma oranı ile gelen ışınımın dalga boyuna ve yönüne bağlıdır. Tüm dalga boyları üzerinde ortalaması alınmış ışınım geçirmez bir ortamda, "yayılma oranı = yutma oranı = 1 - yansıtma oranı" olarak verilebilir. Yansıtma ise, pürüzlülük, cilalı yüzeyler, aynalar, kirlilik gibi seçici durumlarda bahsedilir. Bu gözenekli ortamda kullanılan katı bileşenin özelliklerine veya bu ortama ilave edilen cisme bağlı olarak etkili olur. Eğer gözenekli ortamdaki yüzey için, gri yüzey kabulü yapılarak yüzeyin birim alanından birim zamanda ışınım ile net ısı geçişi için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\dot{Q}_{i\dot{s}} = \epsilon\sigma A(T_2^4 - T_1^4) \quad (2.75)$$

Burada sıcaklıklar dışındaki terimler P_3 sabiti olarak alınabilir. T_2 sıcaklığı, sıcaklık farkına göre ifade edilir ve seriye açılırsa,

$$\dot{Q}_{i\dot{s}} = P_3 T_1^4 \left[\left(\frac{T_1 + \Delta T}{T_1} \right)^4 - 1 \right] \quad (2.76)$$

$$\dot{Q}_{i\dot{s}} = P_3 T_1^4 \left[4 \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right) + 6 \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right)^2 \right] \quad (2.77)$$

yazılabilir. Δx kalınlığı ile çarpılıp bölünür ve düzenlenirse,

$$\dot{Q}_{i\dot{s}} = 4P_3 T_1^3 \frac{\Delta T}{\Delta x} \left[1 + 1,5 \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right) \right] \Delta x \quad (2.78)$$

elde edilir. Burada ısı geçişi, eşdeğer iletkenliğe göre yazılıp,

$$Q_{i\dot{s}} = k_{e\dot{s},i\dot{s}} A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.79)$$

ve sıcaklık dışındaki terimler P_3 sabitine dahil edilirse,

$$k_{e\dot{s},i\dot{s}} = P_3 T_1^3 \left[1 + 1,5 \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right) \right] \quad (2.80)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan, $\Delta T/T_1 \leq 0,6$ için “ışınım ile gerçekleşen ısı iletkenliğe” ulaşılabilir. Burada sabit, $P_3 = f(\sigma, \epsilon, \Delta x, \text{malzeme cinsinin...})$ fonksiyonudur. Barea ve ark. (2005) tarafından, bu ışınlama sabiti sıcaklıkla bağlantılı bir fonksiyonel parametre ($P_3 T^3$) ile verilmiştir. Benzer sabit, Ochs ve ark. (2008) tarafından nemli ve kuru gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinde kullanılabilir. Optik kalınlığın 1'den

büyük olduğu yoğun gözenekli malzemeler için efektif ısı iletkenlik, yerel ışı nım sıcaklığı $T_{i\text{ş}}$ açısından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$k_{i\text{ş}} = \frac{4\sigma D_{\text{hd}} T_{i\text{ş}}^3}{(2/\epsilon) - 1} = P_3 T_{i\text{ş}}^3 \quad (2.81)$$

Burada, σ , D_{hd} ve ϵ , Stefan-Boltzman sabitini ($5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), gözenek hidrolik çapını ve emisiviteyi göstermektedir. Ayrıca, farklı parametrelerin yer aldığı ışı nımla ısı iletkenlik modelleri de mevcuttur. Spinnler ve ark. (2004)'da, çok tabakalı ve perdelerle ayrılmış yalıtımlardan oluşan gözenekli malzemelerin absorbe etme, yayma, dağıtma yeteneğine sahip olduğu varsayılarak deneysel ve teorik çalışma yapmıştır. Burada ise, Rosseland difüzyon yaklaşımına dayanan $(16 \bar{n} \sigma)/3 \beta_{i\text{ş}}$ ışı nım iletkenliği ile ifade edilmektedir. Benzer bir çalışma da yatağın efektif ısı iletkenliği, Tsotsas ve Martin'e göre verilen boyutsuz ışı nım iletkenliği kullanılarak geliştirilmiştir (Gupta ve ark. 2003). Bu iletkenlik, $(4\sigma F_0 d_e)/k_g$ sabiti ile ifade edilmiştir. Sıkışmış haldeki parçacık yataklarının efektif ısı iletkenliğini Weidenfeld ve ark. (2004) tarafından çalışılırken hava boyunca ışı nım sabiti, $(4\sigma(4R^2 - \pi r_c^2))/(2/\epsilon - 1)$ olarak almışlardır. Yaklaşık olarak benzer ışı nım ilaveleri gözlenmektedir. Diğer taraftan Schlunder, Zehner, ve Bauer (SZB) modeli Abou-Sena ve ark. (2007) tarafından Li_2TiO_3 çakıl taşlı yatak için kullanılmıştır. Burada ışı nımın katkısı, $(0,004 \cdot X_{i\text{ş}} \cdot \sigma \cdot (1/100)^3)/((2/\epsilon - 1) \cdot k_g)$ olarak verilmiştir. Bu model, yatak boyunca ışı nım ve iletimin varlığında parçacıklar arasında nokta temasının olmadığını ancak temas alan boyutunun etkisini ele alan bir modeldir. Bu model, Okazaki ve ark. (1981) tarafından çakıl taşlı yatakların ve Shapiro ve ark. (2004) tarafından seramik tozlu paketli yatakların efektif ısı iletkenliği için bildirilmiştir.

Yapılan çalışmada, gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliği için farklı ısı transfer mekanizmalarının fonksiyonu olan bir matematik model tanımlandı. Gözenekli ortamın efektif ısı iletkenliği, durgun katı ortamın ısı iletkenliği yanında önemli oranda difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik, ışı nımla gerçekleşen ısı iletkenlik ve küçük miktarda da olsa taşınımla gerçekleşen ısı iletkenliği içermektedir. Geliştirilen

model, sıcaklıklara ve buna bağılı olarak ortamın özelliklerine bağılıdır. Literatürdeki modellere göre bileşenlerin hacim oranlarından farklı olarak farklı ısı ortamlarının incelemesi (katı, sıvı, gaz gibi) olarak ele alınabilir. Bunun yanında literatürde etkisi gözlemlenen gözenek boyutunun etkisi ve gözenekliğin etkisi de mevcuttur. Bu modelde gözenek boyutu kalınlığa göre daha etkin bir parametre olarak gözükmektedir.

Fiziksel yapının yöne göre değişmesi, yöne bağılı tensör niteliğine göre tanımlamayı da gerektirebilmektedir. Homojen olmayan malzemenin ısı iletkenliğinin açık hacim yoğunluğuna bağılı olduğu, Pitts and Sissom (1997) tarafından ifade edilmiştir. Incropera ve DeWitt (2006) tarafından, izotropik bir ortamda k değerinin ise, eksen yönünden bağımsız olduğu bildirilmiştir. Lifli ve kompozit malzemeler anizotropik malzemeler olduğundan yöne bağılı olarak değişebilir. Işınımla ısı transferi uygulamaları için yöne bağılılık, hem gelen ışınımda hemde yayılan ışınımda zayıf olduğundan Kreith ve ark.'a göre (1999) ihmal edilmektedir.

2.3. Deney Tesisatı ve Ölçüm Cihazları

Bu bölüm, malzemelerin efektif ısı iletkenliğini ölçmek amacıyla gerekli deney tesisatı seçimini içeren ölçüm yöntemini, standartı ve altyapıyı ele almaktadır. Burada, muhafazalı tek/çift numuneli ısı iletkenlik ölçüm cihazının üzerinde duruldu. Ardından esas ölçümleri teşkil eden mevcut muhafazalı ölçüm cihazı ve standartta uygun EP500 cihazının özellikleri verilerek, cihazın kullanımı hakkında bilgi verildi. Bu ölçüm cihazlarında efektif ısı iletkenliği belirlenecek malzemelerin nasıl hazırlandığı ele alındı.

2.3.1. Ölçüm yöntemi ve standardı

Efektif ısı iletkenliğinin ölçümünde kullanılan yöntemler, standartlar incelendiğinde sürekli hal metodu ve geçici hal metodu olarak ayrılmaktadır. İncelemede sürekli hal, geçici hal ölçüm yöntemlerinden muhafazalı tek veya çift deney parçalı cihaz ile ölçüm yapılmasına karar verildi. Sürekli hal metodunun, matematik olarak davranışı basit ve deney şartlarının kontrolü kolaydır. Deney süresinin

uzunluğundan çok, birincil metot olmasından dolayı tercih edilir (TS ISO 8302, 2002). Buna karşın Hamdami ve ark.'a (2003) göre deney süreleri kısa (5-20 saniye) olup çizgi-kaynak ısı prob sistemi avantajlı bulunmaktadır. Başlangıç donma noktaları altında bu prob metodun, ısı iletkenliğin tanımı için uygun olmadığı belirtmişlerdir. Carson ve ark. (2004) tarafından gıda analoji örneklerinin homojen olmayan bileşimi ve boyutu nedeniyle yaygın olarak kullanılan ısı iletkenlik ölçüm cihazlarının (örneğin muhafazalı sıcak plaka ve ısı iletkenlik probu) uygun olmadığı bildirilmiştir. Bunun yerine %2-5 tahmini belirsizliğe sahip olan geçici karşılaştırmalı ısı iletkenlik ölçüm metodunun, büyük numunelerde ölçümleri gerçekleştirmek için etkili olacağı belirtilmiştir. Fakat ısı yayılım metodu kullanılarak gerçekleştirilen ölçümde zaman tüketim oranının yüksek olduğu belirtilmiştir. Efektif ısı iletkenliğin hesaplanabilmesi için, yoğunluğunun ve özgül ısısının bilinmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

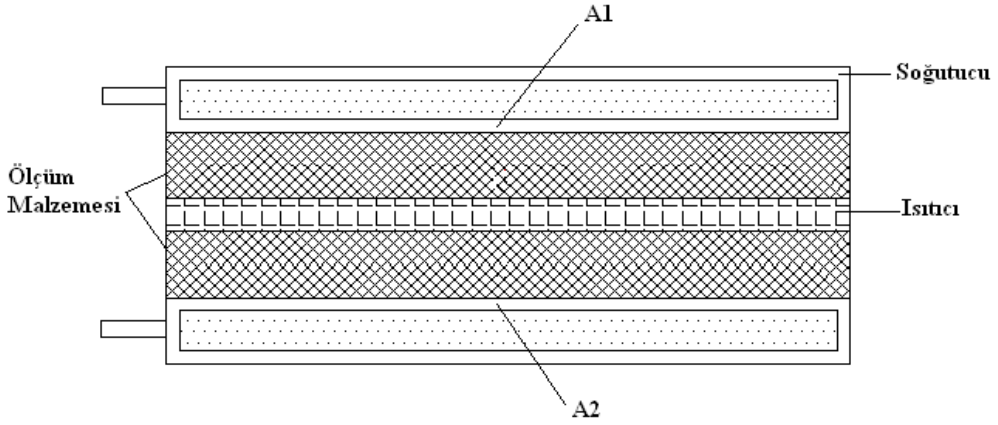
Gözenekli yapılarda ısı iletim katsayısının ölçülebilmesi amacıyla muhafazalı sıcak plaka yöntemi tercih edildi. Basit olarak bu yöntemde ısı iletim katsayısı tespit edilecek malzemedan yapılmış iki numune hazırlanır ve bunlar arasına levha şeklinde bir elektrikli ısıtıcı yerleştirilir. Sonra bunlar, soğutucu vazifesini gören iki levha arasına yerleştirilir. Şekil.2.2' de görüldüğü üzere, ısıtıcıda üretilen ısı enerjisinin yarısı üstteki deney numunesine, diğer yarısı alttaki deney numunesine doğru akımı gerçekleşir. Soğutucu levhalarda, numunelerin diğer yüzeyleri soğutulmaktadır. Yüzey boyunca eşit soğutma yapabilmek için, soğutucu levhalarda boru dolaştırılmaktadır. Isıl çiftler, ölçüm numunelerinin hem alt hem de üst temas yüzeylerine yerleştirilerek sıcaklıklar ölçülür. Eğer deney numunelerinin kalınlığı (Δx) eşit ve yüzey alanı (A) bilinirse Fourier ısı iletim kanununa göre numune boyunca ısı enerjisi,

$$\frac{Q}{2} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.82)$$

şeklinde hesaplanabilir. Isı akısının yöne bağlı bir büyüklük olduğu dikkate alınır ve izotropik ortam için Fourier kanununun genel bir ifadesi yazılırsa,

$$\frac{Q}{A} = q = -k \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.83)$$

Bu ifade, ısı akısının bir izoterme dik ve azalan sıcaklık yönünde olduğunu gösteren bir vektör denklemdir. Farklı koordinat sistemine göre de yazılabilir. Bu denklemlerde verilen k, ısı iletim katsayısı (W/mK) malzemenin önemli bir aktarım özelliğidir. Isıtıcıya verilen ısı enerjisi (Q), voltaj ve akım şiddeti ölçümlerinden belirlenebilir. Bu denklemlerde k, deney numunelerinin ısı iletim katsayısı ve ΔT numune kalınlığında sıcaklık farkıdır. Eğer her iki numune için ΔT farklı ölçülüyorsa, ortalama değeri kullanılır.



Şekil.2.2. Koruyucu ısıtıcılı sıcak levha cihazının şeması.

Deney düzeneğinde, sıcaklık ölçümleri kenara yakın noktalar yerine numunenin orta kısmından yapılır. Eğer ölçüm malzemesinin çevre yüzeyleri dış hava ile temasta olurlarsa, ısıtıcıda üretilen enerjinin bir kısmı atmosfere ısı kaybı olarak akar. Bunu önlemek için, ısıtıcı ve deney numuneleri çevresine koruyucu ısıtıcı yerleştirilebilir. Isıtıcıda üretilen ısı enerjisi, voltajı değiştirilerek ayarlanır. Bu şekilde, çevre ısıtıcıların kalınlıklarındaki sıcaklık düşümü, iki ölçüm malzemesinin kalınlıklarındaki sıcaklık düşümü ile aynı olması sağlanır. Sonuçta, ölçüm malzemesi ile koruyucu ısıtıcı arasında bir ısı enerjisi akımı olmayacaktır. Fakat ısıtıcıda üretilen enerjinin bir kısmı yine de, sistemin atmosfer ile temasta olan yüzeylerinden kaybolacaktır. Bunu da azaltmak için bütün sistem çevresi bir yalıtım malzemesi ile kaplanabilir.

Isı iletim katsayısının ölçülebilmesi için, ölçüm cihazının, ölçüm yönteminin, sistemdeki numunenin boyutlarının, sınırlarının dikkat edilmesi gerekir. Bunun için, sürekli rejimde tek ve iki numunenin kullanıldığı TS ISO 8302 “Isı Yalıtımı-Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini-Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı” standardı ele alınır. TS ISO 8302 standardı, düz levha halindeki kararlı hal ısı aktarım ölçümlerini ve muhafazalı sıcak plaka cihazının kullanımını kapsamaktadır.

TS ISO 8302’ye göre cihaz, düz, paralel yüzeylere sahip ve paralel izotermal yüzeyler arasındaki deney numunelerinde tekyönlü ısı akısını, (sürekli hal şartlarında) tayin etmektedir. Çift ve tek deney numuneli cihaz olmak üzere iki şekilde imal edilmektedirler. Çift deney numuneli cihazda, hemen hemen aynı iki deney numunesi arasında yer alan metal yüzeylerden yer alan ısıtma ünitesinden oluşmaktadır. Isı akısı, deney numunelerinden izotermal soğutma ünitesine gerçekleştirilerek ölçüm yapılmaktadır. Tek deney numuneli cihazlarda ise iki deney numunesinden birinin yerine yalıtım parçası ve koruma plakası yerleştirilmektedir. Cihaz boyutları, normal olarak 0,2 m-1m daire veya kare şeklindeki deney parçası boyutlarıyla belirlenmektedir. 0,3 m’den küçük boyutlardaki deney numuneleri malzemenin özelliğini temsil etmemesi ve 0,5 m’den büyük deney numuneleri ise düzlemselliği, sıcaklık yeknesaklığı, dengeye ulaşma süresi nedeniyle tavsiye edilmemektedir. Bu yüzden cihazın, 0,3 m-0,5 m ve sadece homojen malzemelerde 0,2 m (kare) boyutlarında olması önerilmektedir (TS ISO 8302).

Soğutma ünitelerinin boyutları, muhafazalı ısıtıcıları dahil olmak üzere en az ısıtma ünitesinin yüzeyinin boyutları kadar olmalıdır. Üniteler, deney parçaları yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının %2 sınırları içinde sabit ve yeknesak bir sıcaklıkta olabilecek metal plakalardan oluşur (TS ISO 8302). Burada, soğutma ünitesi içindeki sıvının sarmal ters akımlı ortamdan geçirilmesi önerilmektedir. Isıtma ünitesi, ölçme ve muhafaza kısmından oluşmaktadır. Yüzey plakaları genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip metallere yapılmaktadır. Isıtma ünitesi, uygun bir ısı akısı sağlayacak şekilde ve pürüzsüz olmalıdır. Çift deney numuneli cihazlarda, 0,1 m²K/W’den büyük bir ısı direncine sahip deney numuneleri kullanıldığında muhafaza ve ölçme alanı yüzeyleri

arasındaki sıcaklık farkının ortalama 0,2 K olması önerilmektedir. Ayrıca, deneyin oda sıcaklığına yakın bir ortalama sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir.

Cihazda ölçümlerde kullanılacak malzeme ile ilgili gerekli bilgilerin temin edilmesi gerekir. Burada, malzemenin homojen veya homojen gözenekli olması önemlidir. Olmaması durumunda, ölçümlerin tüm malzemeyi temsil edebilmesini sağlamak amacıyla yeterli ölçüde örnekleme yapılması önerilmektedir. Numune, malzemenin özelliklerini temsil edebilmelidir. Numune kalınlığının ölçümleri ise, ölçüm araçlarının hataları %0,5 olabilecek şekilde cihazın içinde yapılmalıdır. Kalınlık ölçümleri, soğutma ünitesi köşeleri referans kabul edilerek dik eksenler boyunca gerçekleştirilir. Etkin deney parçası kalınlığı, deney numunesi cihaza yerleştirildiğinde ve yerleştirilmeden önceki ölçüm noktaları arasındaki mesafenin ortalama farkından hesaplanır. Asgari deney parçası kalınlığı, kalınlık ölçüm araçlarının doğruluğu ve yüzey temas direnci ile sınırlıdır. İki deney numunesi arasındaki fark, %2'yi geçmemesi ve mümkün olduğunca özdeş olması önerilmektedir (TS ISO 8302). Ayrıca, malzeme incelikle ve yoğunluğu azaldıkça ısı aktarımının iletim dışında diğer süreçlere bağıllığı artacağı ifade edilmiştir.

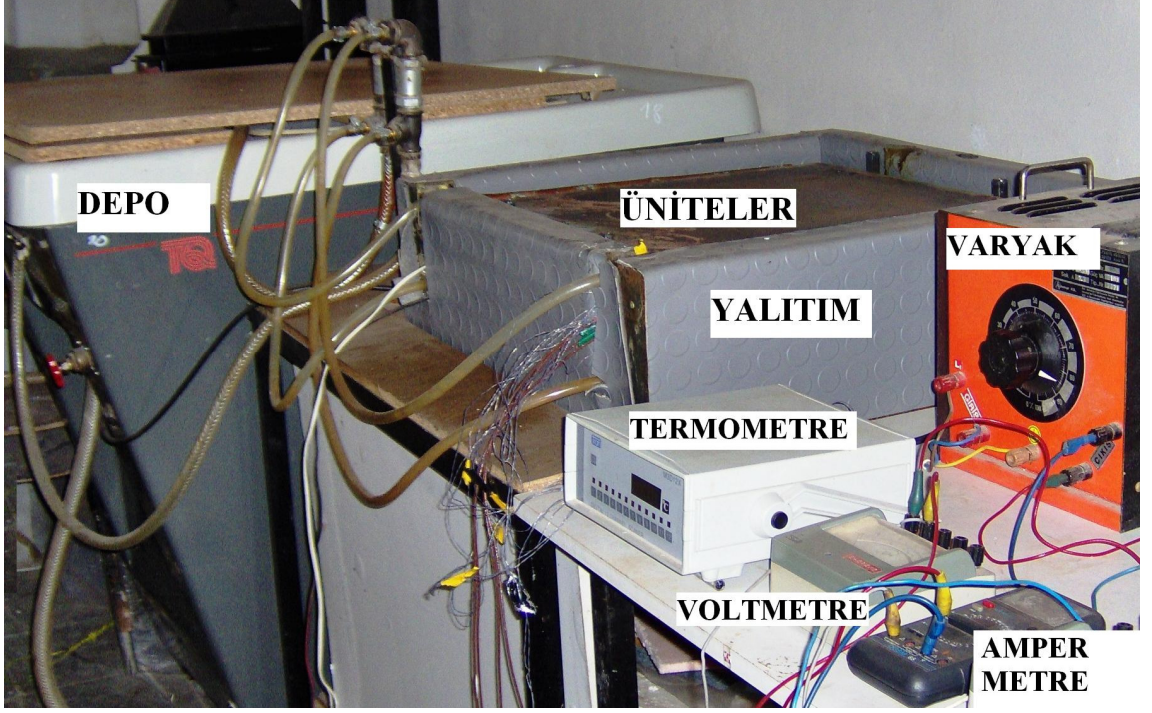
Sıcaklık ölçümleri, genellikle yüzey plakalarındaki olukların içine veya deney numuneleriyle temas halindeki yüzeyin hemen altına yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu sırada, ısıtma ve soğutma yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını %1 doğrulukla ölçebilecek bir metot önerilmektedir. Ayrıca, deney numunesi üzerine yerleştirilen ısı çiftlerinin 0,2 mm'den daha büyük çaplı tel olmaması ve \pm %1 standart hatada olması gerektiği ifade edilmektedir. Soğutma ünitesi sıcaklığı oda sıcaklığının altında veya ortalama sıcaklık oda sıcaklığının üstünde olması halinde, arzu edilen yoğunlaşma sıcaklığını muhafaza etmek gerekir. Bunun için, cihazın muhafaza içinde konulması önerilmektedir (TS ISO 8302, 2002). Ölçümlerde, ısıtma ve soğutma ünitelerinin yüzey sıcaklığının kararlılığı yanında 5 K kadar düşük sıcaklık farkları da kullanılabilir. Daha düşük sıcaklık farkları TS ISO 8302 standardında uygunsuzluk olarak rapor edilmektedir. Burada, ölçme hatalarını en aza indirmek amacıyla kullanılan sıcaklık farkının en az 10 K- 20 K arasında olması önerilmektedir. Ayrıca, deney süresinin

kısıtlanabilmesi için cihaza yerleştirmeden önce deney numunelerinin oda sıcaklığında şartlandırılması önemli görülmektedir.

Isı iletkenliğin ölçümünün yapıldığı cihaz, deney ortamının ortalama sıcaklığı, oda sıcaklığına yakın olduğunda ısı aktarım özelliklerini $\pm\%2$ doğrulukla ölçebilecek kapasitede olmalıdır. Benzeri cihazlarla referansı yapıldıktan sonra cihazın tam çalışma aralığında herhangi bir noktada yaklaşık $\pm\%5$ bir doğruluk elde edilmelidir. Cihazda tutulan deney numunesi ile yapılan ardışık ölçümler, $\%1$ 'den daha iyi olmalıdır. Cihazdan çıkartılarak belli zaman aralığından sonra yapılan ardışık ölçümler de, aynı standart istenmektedir. Bu standartta verilen metodun, ısı direnci $0,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ 'den daha düşük numunelere uygulanamayacağı belirtilmiştir. Isıl direnç alt sınırı olarak, $0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ düzeyi önerilmektedir. Fakat belirli doğruluk değerlerine ulaşamayabileceği ifade edilmektedir. Cihazın gerekli performansı, verilen bu tüm şartların sağlanabilmesine bağlanmaktadır.

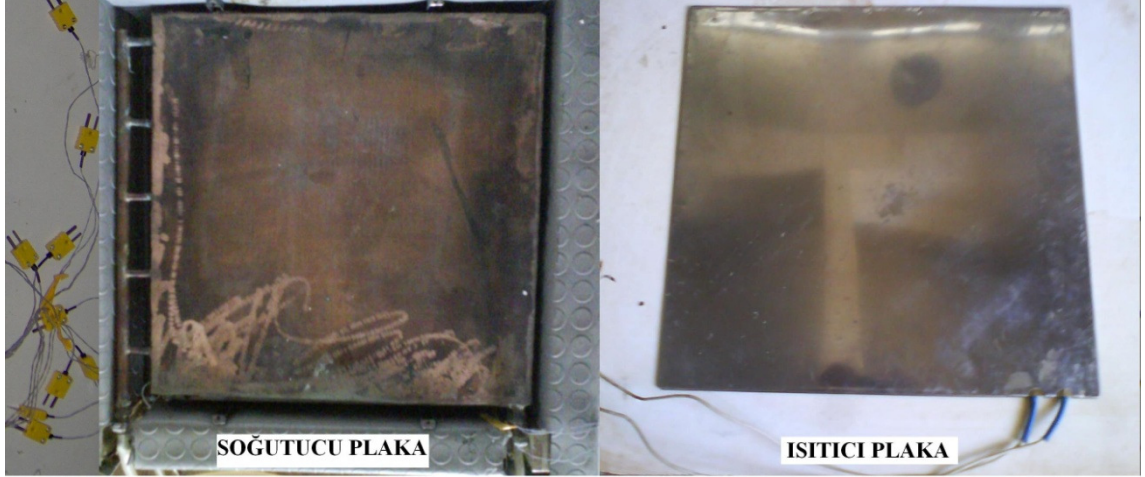
2.3.2. Mevcut muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı

Muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı, soğutma ve ısıtma ünitelerinden oluşmaktadır. Bu üniteler, mevcut tesisatta $50 \times 50 \text{ cm}$ iki dış soğutucu plaka ve $40 \times 40 \text{ cm}$ bir iç ısıtıcı plaka olarak kullanılmaktadır. Soğutucu ve ısıtıcı plaka üniteleri, güç kaynağı, ve soğutma deposu ile Şekil.2.3'de görülmektedir. Bu tesisatta, çift numuneli ve tek numuneli olarak efektif ısı iletkenlik belirlenebilmektedir. Bu, numunenin soğutma ve ısıtma üniteleri arasında yerleştirilmesine bağlıdır. Cihaz, $25-35 \text{ }^\circ\text{C}$ soğutma sıcaklık aralığına sahiptir. Isıtıcı plaka, $0-300 \text{ W}$ aralığında ısı yüküne sahip hassas ayarlı bir varyak sistemi ile ısıtılmaktadır ve aralığında çalışmaktadır. Bu şekilde, istenilen numune ortalama sıcaklığına ve sıcaklık farkına ayarlanabilmektedir. Numune, soğutma plakası boyutlarında seçilerek ölçüm gerçekleştirilir.



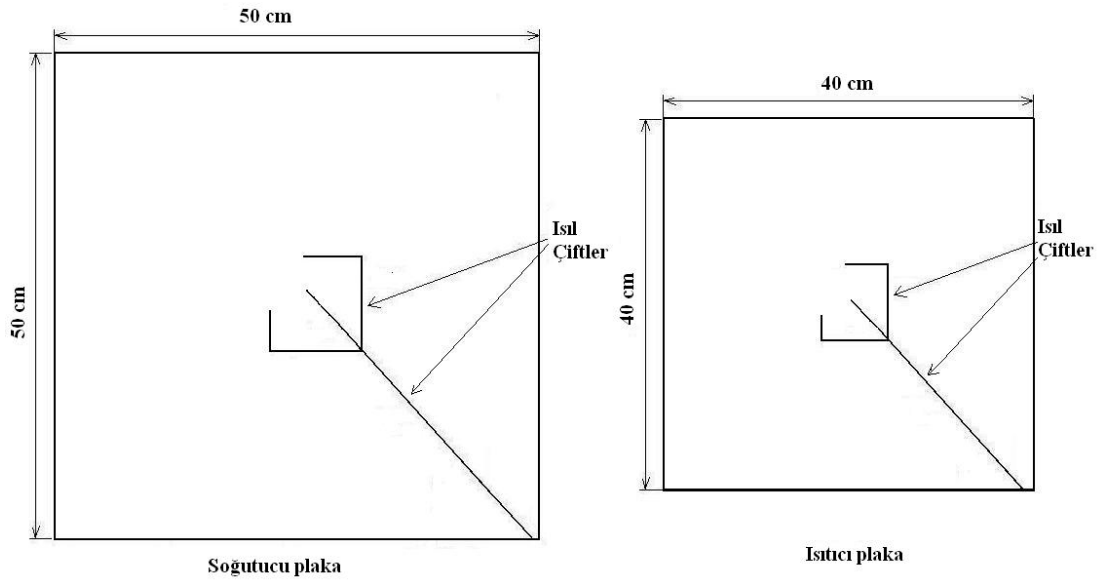
Şekil.2.3. Mevcut muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı

Cihazda, soğutucu ve ısıtıcı plakalar iki önemli ünedir. Isıtıcı plaka, düzenli ve belirli aralıklar da yerleştirilen tellerden oluşmaktadır. Bu teller, kaplanarak paslanmaz çelikten levhalar arasına yerleştirildi. Buradan çıkan teller, direnç teli olmayıp yalıtılmış olarak varyağa bağlandı. Varyak ile ısıtıcı plakada sağlanan ısı, numuneye ve oradan da soğutucu plakaya iletilmektedir. Numune ısıtıcı plaka ile belirli bir ısı akısında sabit sıcaklıkta tutulurken numunenin diğer tarafı soğutucu plaka ile soğutulmaktadır. Soğutucu plakalar, iki bakır levha arasında içten sarmal bir şekilde dolaşan akışkan ile soğutulmaktadır. Bu akışkan, soğutucu plaka girişinden çıkışa doğru S hareketi çizerek hareket etmektedir. Böylece, homojen ısı dağılımı sağlanmaktadır. Soğutucu plakada, depodaki akışkan ile desteklenmektedir. Depoda toplanan akışkan, sabit sıcaklıkta deney tesisatına yollanır. Bu deponun boyutu, akışkan miktarına ve akışkanın gerekli sıcaklıkta kalmasına olanak sağlamaktadır. Hem ısıtıcı hem de soğutucu plakanın her iki yüzeyi pürüzsüz ve belirli bir düzlemselliğe sahiptir. Ayrıca plakaların kalınlığı, sıcaklık farkının oluşmaması için 2 mm ihmal edilebilecek bir kalınlıktadır.



Şekil.2.4. Isıl çiftler ile birlikte soğutucu ve ısıtıcı plakalar

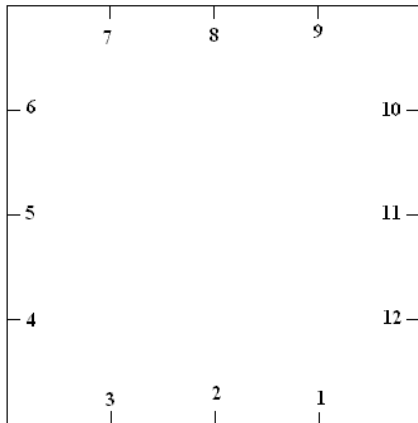
Tesisatta sıcaklıklar, soğutucu ve ısıtıcı plaka yüzeylerine yerleştirilen ısıl çiftler ile belirlenmektedir. Plakalardaki sıcaklık ölçümü için kullanılacak ısıl çiftler, plaka başına 3 adet olarak belirlendi. Bunlar, merkezde 5 cm'lik bir daire içerisinde yerleştirildi (Şekil.2.5). Bu ısıl çiftler, numunenin alt ve üst yüzeyleriyle direkt temas halindedir.



Şekil.2.5. Soğutucu ve ısıtıcı plakalara yerleştirilen ısıl çiftler

Deney tesisatındaki ısı kayıplarını önlemek için, soğutma, numune ve ısıtma ünitesinin etrafı poliüretan köpük yalıtım malzemesi ile çevrildi. Bu yalıtım, Şekil.2.3’de görüldüğü gibi sarf malzeme ile desteklendi. Yalıtım kalınlığı 6,5 cm yapılarak 68,5x71x19 cm boyutlarında deney tesisatının dış hacmi elde edildi.

Deneye başlamadan önce, numuneler laboratuvar ortamında şartlandırıldı. Ardından, numuneler soğuk ve sıcak plakalar arasına yerleştirildi. Bu numuneler, 12 farklı noktadan kalınlıkları ölçülerek ortalama kalınlık belirlendi ve cihaza yerleştirildi (Şekil.2.6). Isıtma ünitesinin gücü Şekil.2.3’de görüldüğü gibi voltmeter ve ampermetre vasıtasıyla ayarlanarak ölçüme başlandı. Güç kaynağından belirlenen güce ve buna karşılık gelen voltaj farkına akıma göre yapılan ölçümlerde yüzey sıcaklıkları tespit edildi. Dijital Tron M3D12X 12 kanallı termometer (1 °C ölçüm hassasiyetli) ile sıcaklıklar okundu. Her numunede ortalama sıcaklık tespitinde bu değerler, maksimum ± 2 volt olarak değişmektedir. Ölçümler ve veri almaya, 8 saat içerisinde rejime ulaşıncaya kadar devam edildi. Varyaktan volt, amper verileri ve termometreden sıcaklık verileri okunarak 8 saat içerisinde rejime ulaşıncaya kadar devam edildi. Bu veriler, Microsoft Excel programına aktarıldı. Programda, numunenin sıcaklık farkı, kalınlığı ve ısıtıcı gücü belirlendi. Bu veriler ve Fourier ısı iletim kanununa göre, numunenin efektif ısı iletkenliği elde edildi. Deney tesisatının rejime ulaştığı andaki veriler, numunenin efektif ısı iletkenliğini vermektedir. Ayrıca, sıcaklığa, sıcaklık farkına bağlı grafiği çizildi. Ölçümler, farklı ısı güçlerinde ve farklı kalınlıklarda tekrarlandı.



Şekil.2.6. Plaklar ile 12 farklı noktadan ortalama kalınlık tespiti

Mevcut çift numuneli sıcak plaka deney tesisatında, 45 x 45 cm boyutlarında camyünü malzemelerin efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü. Şartlanmış tekli, ikili, üçlü ve dördü cam yünü numuneler, dört farklı kalınlıkta araya malzeme konulmadan ve konularak ölçümleri çift numuneli gerçekleştirildi. İlk olarak, üst üste konulan camyünü malzemelerin aralarına herhangi bir malzeme veya yapıştırıcı kullanılmadan yapıldı. İkinci halde ise her bir cam yünü tabakası arasına çok ince, direnç oluşturmayacak ve numune ile aynı boyutta naylon konularak yapılan ölçümlerdir. Deney tesisatından belirlenen ısı iletkenlikler, farklı kalınlığa, farklı sıcaklığa ve sıcaklık farkına göre değerlendirildi.

Bu tesisatta, referans bir malzemeyle karşılaştırmalı bir ölçümde yapıldı. Bu ölçüm, referans ve numunenin sıcak ve soğuk plaka arasına birlikte konulmasıyla yapılmaktadır. Bunun için, uluslar arası standartlarda kabul edilen ve ısı iletkenliği bilinen bir referans malzeme kullanıldı. Referans malzeme, -10 °C ile 50 °C aralığında ısı iletkenlik değerleri tespit edilmiş bir malzemedir. Referans malzemenin belirsizlik değeri, 0.00028 W/(m·K)'dir. Boyutları ise deney tesisatı boyutlarında 50 x 50 cm'dir. Numune ve referans malzemenin alt, üst ve ara yüzeylerdeki sıcaklıkları ısı çiftler ile ölçülerek sıcaklık farkı tespit edildi. Sıcaklık farkı, kalınlığı belli olan numune ve referans malzemenin ısı iletkenliği, referans malzemenin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik ifadesi tespit edilerek ölçüm numunesinin ısı iletkenliği belirlendi. Ancak ölçümlerde, %5'den daha yüksek ısı iletkenlik hataları olduğu için değerlendirmeye tabi tutulmadı. Bu hata, muhafazalı ısıtıcıların otomatik kontrollü kullanılması ile azaltılabilir. Böylece, numune kalınlığından çevreye olan ısı kayıpları azaltılarak homojen bir ısı dağılımı sağlanabilir. Bunun yanında deney tesisatındaki referans numunenin, varyağın, ısı çiftlerin hassasiyeti ile ölçüm %5 aralığına indirgenebilir. Ölçümler, 24 saat süresince yapılarak uygun efektif ısı iletkenlik değerleri tespit edilebilir.

2.3.3 Mevcut muhafazalı sıcak plaka tesisatında hata analizi

Deneylerde efektif ısı iletkenliği ölçümekte kullanılan, mevcut sıcak plakalı tesisatında, farklı ölçümler yapan cihazlar yer almaktadır. Bu cihazlar, belirli bir ölçüm

hassasiyetine sahip olması yanında ölçülen her bir değer bir miktar hata içermektedir. Ölçümler esnasında yapılan toplam hata, Moffat' ın (1988) önerdiği eşitlik kullanılarak belirlenebilir. Deneyler sırasında verilen ısı güç, okunan yüzey sıcaklıkları, ölçülen numune kalınlığı için hata kaynakları fonksiyonu (HFK),

$$\text{HFK} = f(T_{\text{ü}}, T_{\text{a}}, V_{\text{I}}, A_{\text{I}}, x) \quad (2.84)$$

şeklinde oluşmaktadır. Bu durumda bağıl hata, Moffat' ın (1988) düşüncesine göre,

$$\text{Hata} = \left\{ \left(\frac{\Delta T_{\text{ü}}}{T_{\text{ü}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{\text{a}}}{T_{\text{a}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{\text{I}}}{V_{\text{I}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{\text{I}}}{A_{\text{I}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.85)$$

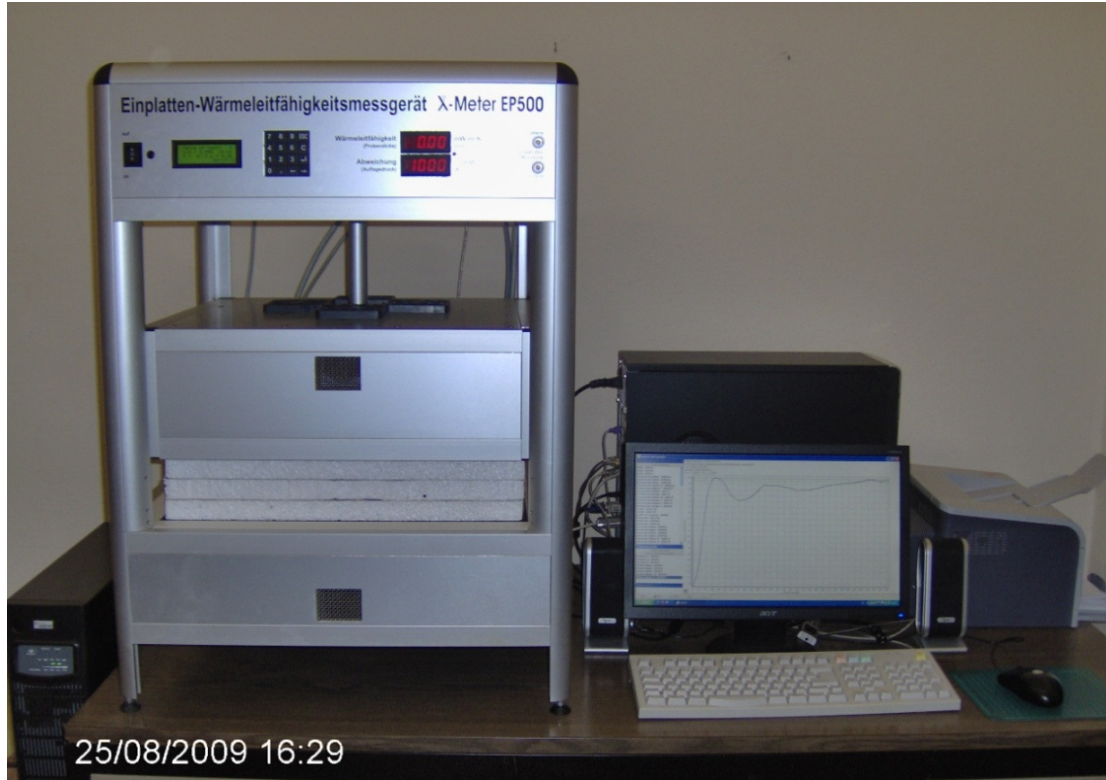
şeklinde hesaplanabilmektedir. Deneylerde kullanılan cihaz hassasiyetleri için, ısı çiftlerinde 1,5 °C, voltmetrede 2 V, ampermetrede 0,001 A, mihengirde 1/50 mm, alanda 1.10⁻⁶ m² verilebilir. Ölçüm aralıkları ise, üst sıcaklıkta 64,16-150,66 °C, alt sıcaklıkta 20,47-34,12 °C, voltmetrede 42,4-89 V, ampermetrede 0,25-0,456 A, kalınlıkta 0,1599-0,5990 m, alanda 0,16 m²'dir. Bu değerlere göre yapılan hesaplamalar sonucu, yaklaşık hata oranı maksimum % 8 olarak tespit edildi. Okuma hassasiyetide dikkate alınacak olursa % 9 cihaz için hesaplanan hatadır.

2.3.4. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Efektif ısı iletkenlik ölçümleri, Lambda Messtechnik GmbH Dresden EP500 muhafazalı sıcak plaka cihazı ile gerçekleştirildi. Bu cihaz, EN 1946-2, EN12664, EN 12939, DIN 52612 ve en önemlisi TS ISO 8302, ASTM C177 ve EN 12667 standartlarına uygun olup 0,005 ile 1,8 W/mK aralığında ölçüm yapabilen bir ısı iletkenlik aygıtıdır (<http://www.lambda-messtechnik.de>). Çift numune yöntemi, numunelerin birbirinden farklı olabilmesi nedeniyle tek numuneli cihaz tercih edildi. Tek numuneli olarak 0,1 mm çözümü ile 10 mm ile 200 mm kalınlık aralıklarında ölçüm yapılabilmektedir. Numuneyi -10 °C ve 40 °C sıcaklık aralıklarında ve 5 ile 15 K sıcaklık farkı aralıklarında efektif ısı iletkenlikleri belirlenebilmektedir. Bu cihaz,

Şekil.2.7 ve 2.8’de verildiği gibi otomatik kontrollü ve EP500 kontrol programı ile çalışmaktadır. Cihazın sağladığı standart ölçüm aralıkları ise şöyledir:

- oda sıcaklığında beklenen doğruluğu $< \%2$
- bütün sıcaklık aralıklarında beklenen doğruluğu $< \%5$
- tekrarlanabilirlik: $< \%1$ (çoğu durumda $\% 0,5$ ’den daha azdır)
- deney parçası çıkartılıp yerine monte edildiğinde tekrarlanabilirlik $\% 1$
- her bir numune kalınlığında ve ısıl iletkenlik aralığında mutlak hata $< \%1,5$
- deney parçasının kalınlığının ölçülebilmesi ve ölçümdeki gerekli doğruluk $\%0,5$
- malzemeler üzerindeki azami cihaz basıncı 50..2500 Pa aralığında çalışabilmesi
- maksimum güç girişi: 400 W
- oda sıcaklığı: yaklaşık 18...28 °C



Şekil.2.7. EP500 muhafazalı sıcak plaka ısıl iletkenlik ölçüm cihazı

Bu cihaz, numunenin cihaza yerleştirilmesi ve ön kontrol panelinden istenilen basınca ayarlanması ile çalışmaya başlamaktadır. Cihaz, Şekil.2.8’deki gibi ölçülecek malzemenin ağırlığından, istenilen sıcaklıklara, sıcaklık farklarına, kadar birçok bilgilerin programa girilmesi ile ölçüme başlamaktadır. Isıl iletkenlik ölçümü, sistemin

belirli sürede yaklaştığı yaklaşık hata oranı aralığına göre grafiğini çizerek sonucunu vermektedir (Şekil.2.8).

Cihazın ölçümlerdeki standardı sağlayan değer aralıkları ise şöyle verilebilir:

- ısıtma ünitesinin karşılıklı yüzeylerinin ortalama sıcaklıkları arasındaki azami sıcaklık farkı 0,2 K. Soğutma ve ısıtma üniteleri arasındaki sıcaklık farkının ölçülmesinde gerek duyulan doğruluk $< \%1$. Sıcaklık farklarının ölçülmesindeki azami hata $\%1$.
- ısı çiftleri için standart hata $\%1$

The screenshot shows the 'Prepare test' window with the following details:

- Parameters Tab:**
 - Test no.: 090625a
 - Specimen designation: dortluzocam-folyolu
 - Spec. thickness: 66.10 mm
 - Spec. dimensions: 500 mm x 500 mm
 - Specimen mass: 1738.2 g
 - Pressure: 1000 Pa
 - Raw density: 105.20 kg / m³
 - Temp. coeff.: mW/(m * K²)
 - Database: C:\Program Files\Lambda Messtechnik\Data\Muster_uludag.DBF
- Test configuration:**
 - Number of test temperatures: One test temperature (selected)
 - Nominal thickness: 65 mm (selected)
 - Thickn. at 250 Pa: (unselected)
 - EPS (thickn. effect) acc. to EN 13163: (unselected)
 - Test will be ended if change of lambda is less than 1.0 % over time of 60 min.
- Temperatures:**
 - 1. test temp.: 17 °C
 - Temp. difference between sensor plates: 10 K
 - Temperature for subsequent test: (checkbox unselected)
- Notes:** (empty text box)
- Buttons:** Load, Save, Start

Şekil.2.8. EP 500 kontrol programında test hazırlık aşama menüsü

- elektrik gücünün ölçülmesindeki gerekli doğruluk %0,1
- kenar sıcaklığı ile ortalama deney parçası sıcaklık farkının, deney parçasının iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkına oranının azami değeri (En iyi istatistiksel doğruluk sonuç için) 0,1 (0,02)
- sıcaklık sensörleri üzerindeki elektriksel ölçmeler için gerekli doğruluk %0,2
- cihaz metal plakaları ile mahfazasız sıcaklık algılayıcıları arasındaki asgari elektrik direnci 100 MΩ
- deney parçasının yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına göre soğutma ve ısıtma ünitesinin sıcaklık yeknesaklığı ve kararlılığı %2 ve sıcaklık dalgalanmaları üst sınırı %2
- ölçme kısmı alanına göre azami boşluk alanı %5
- giriş gücündeki dalgalanmalar nedeniyle ısıtma ünitesinin müsaade edilen azami sıcaklık dalgalanmaları %0,3
- dengesizlik ve kenar ısı kaybı hataları toplamı için azami sınır değerler %0,5

2.3.5. Efektif ısı iletkenliğin deneysel ölçümleri

Deneyssel efektif ısı iletkenlik ölçümleri, gözenekli ve takviye malzemelerin hazırlanmasından, ısı iletkenliğin ölçümünden ve testinden oluşmaktadır. Hangi gözenekli malzemeye hangi malzeme tiplerinin konulduğu ve nasıl yerleştirildiği bir sonraki bölümde ele alındı. Burada ise, yapı ve işletme parametrelerinin efektif ısı iletkenliğe etkisini incelemek amacıyla birbiriyle bağlantılı üç farklı deney tesisatında gerçekleştirilen ölçümler üzerinde duruldu. İlk deneysel çalışmada mevcut çift numuneli ısı iletkenlik cihazında araya farklı malzemelerin konularak ve konulmadan ölçümleri tespit edildi. İkinci deneysel çalışmada, EP500 muhafazalı tek numuneli sıcak plakalı bir ısı iletkenlik cihazı ile gerçekleştirilen deneylerdir. Üçüncü ve son aşamada, bu efektif ısı iletkenlik ölçümleri, iki farklı yalıtıma sahip yağ tenekeleri içerisindeki suyun ve antifrizli suyun soğuma ve ısınma süreleri incelenerek test edildi.

İlk mevcut deney tesisatında, çift numuneli yöntemle göre tekli, ikili, üçlü ve dörtlü numunelerin efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Araya herhangi bir tabaka konulmadan ve araya naylon tabakası yerleştirilerek yapılan ölçümler yer almaktadır.

Naylon ve naylonsuz haldeki ölçümler ile taşınımın belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca çift numuneli olduğundan üst ve alt numunelerin sıcaklık farkları ele alınarak incelendi. Bu ölçümler, güç kaynağından belirlenen 50 V, 60 V, 70 V, 80 V voltmetre değerleri ve buna karşılık gelen akıma göre gerçekleştirildi.

İkinci deneysel çalışmada, EP500 muhafazalı sıcak plaka cihazı ile cam yünü, strafor, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş gibi gözenekli tabakalı ortamların efektif ısı iletkenlikleri tespit edildi. Gözenekli cam yünü tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli katmanlar halinde ve farklı emmisivite değerlerine sahip araya konulan malzemeler ile ölçümler yapıldı. Bu ölçümler ile iletimle olan ısı transferi yanında konveksiyon ve ışınımı gözlemek amacıyla cam yünü tabakaları arasına emissivitesi düşük alüminyum malzemeler konarak düşük ve yüksek sıcaklıklardaki farklılıklar irdelendi. Ayrıca sıcaklık farkı ile deneyler tekrar edildi. Gözenekli malzemelerin, 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 32 °C ve 40 °C işletme sıcaklıklarında ve 5 K, 10 K ve 15 K üç farklı işletme sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Cihaz, 1000 Pa basınca ayarlanarak tabaka halindeki malzeme üstüne üst plaka otomatik olarak konumlandırıldı. Ardından muhafazalı sıcak plaka ölçüm cihazı, EP500 kontrol programında istenilen işletme aralıkları Şekil.2.8'de girilerek çalıştırıldı. Cihaz, programda belirtilen 60 dk'da %1 aralığına ulaştığında ölçümleri tamamlamaktadır.

Bu ölçümler, öncelikle üçlü tabakalı strafordan elde edilen takviyesiz ve alüminyum folyo takviye edilmiş numunelerde gerçekleştirildi. Ardından, alüminyum folyo takviyesi yapılmayan tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli camyünü numunelerin ölçümleri yapıldı. Ayrıca, bu her bir ikili, üçlü, dördü ve beşli camyünü tabakalı numunelerde alüminyum folyo takviyesi yapılarak efektif ısı iletkenlikler elde edildi. Sadece beşli camyünü tabakalı numunede araya konulan alüminyum folyo takviyelerin konumu ve sayısı değiştirilerek ölçümler yapıldı. Bu malzemeler dışında, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş malzemesinde de ölçümler yapıldı. Üçlü camyünü numunesi ile aynı kalınlıkta olacak şekilde tabakalı dokumasız filtre kumaş numunesi kullanıldı. İlk olarak, alüminyum ve bakır folyolar ile takviye yapılmadan efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Ardından, alüminyum veya bakır folyolar ile üçlü tabakalara ayrılmış numunelerde efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü.

2.3.6. Malzemelerin hazırlanması

Deneylerde kullanılan malzemeler, cam yünü, strafor, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş, alüminyum folyo, bakır folyo, ince alüminyum folyo, kağıt ve stretch naylondur. Bu malzemelerden camyünü malzemesi, belirli kalınlıklarda sıkıştırılmış haldeki izopandan dönüştürüldü. Standart olarak piyasada peteklerin, sobaların sıcaklığını muhafaza etmek ve ışınlı ısı transferi ile sıcaklığı arttırmak amacıyla kullanılan bir malzemedir. Bu malzemelerin alüminyum folyo yüzeyleri kaldırıldıktan sonra açık gözenekli ve yüksek gözenekliliğe sahip bir malzeme elde edildi. Diğer malzemeler piyasada hazır halde bulunmaktadır. Tüm malzemeler, 50x50 cm boyutlarında falçata ile kesilerek hazırlandı. Bu malzemelerin üst üste yerleştirilmesiyle farklı kalınlıklı numuneler elde edildi. Cam yünü malzemelerinden, tekli, ikili, üçlü, dörtlü ve beşli tabakalar halinde numuneler elde edildi (Şekil.2.9). Strafor malzemesi, sadece üçlü tabakalar halinde üst üste konularak kullanıldı. Bu malzemeler dışında kullanılan dokumasız filtre kumaş malzemesinin her birinin kalınlığı 2,1 mm'dir. Ölçümlerde, bu malzemedan 21 tabaka kullanıldı. Böylece, üçlü camyünü numunesi ile ortalama olarak aynı kalınlıkta ve yoğunlukta malzeme elde edildi. Bu cam yünü, strafor ve dokumasız filtre kumaş malzemelerinin ortalama kalınlıkları ve kütleleri ise, takviyesiz ve takviyeli olarak Çizelge.2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Cam yünü, strafor ve dokumasız filtre kumaş malzemelerinin takviyesiz ve takviyeli kalınlıkları ve kütleleri.

Numuneler		Camyünü					Strafor	Dokumasız filtre kumaş	
Takviyesiz	Tanım	Tekli	İkili	Üçlü	Dörtlü	Beşli	Üçlü	Üçlü*	
	Kalınlık (mm)	16,7	32,9	48,9	-	83,67	87,50	48,7	
	Kütle (g)	388,7	804,2	1162,9	1571,7	1948	218,1	2961,5	
Takviyeli	Kalınlık (mm)	-	33,07	49,05	66,11	83,58	87,50	49,13	
	Takviye sayısı ile Kütle (g)	1 (Al) folyo	-	843,3	-	-	2003	-	3017
		2 (Al) folyo	-	-	1273,5	1682,7	2058,5	330	3072,5
		3 (Al) folyo	-	-	-	1738,2	2114	-	-
		4 (Al) folyo	-	-	-	-	2182	-	-

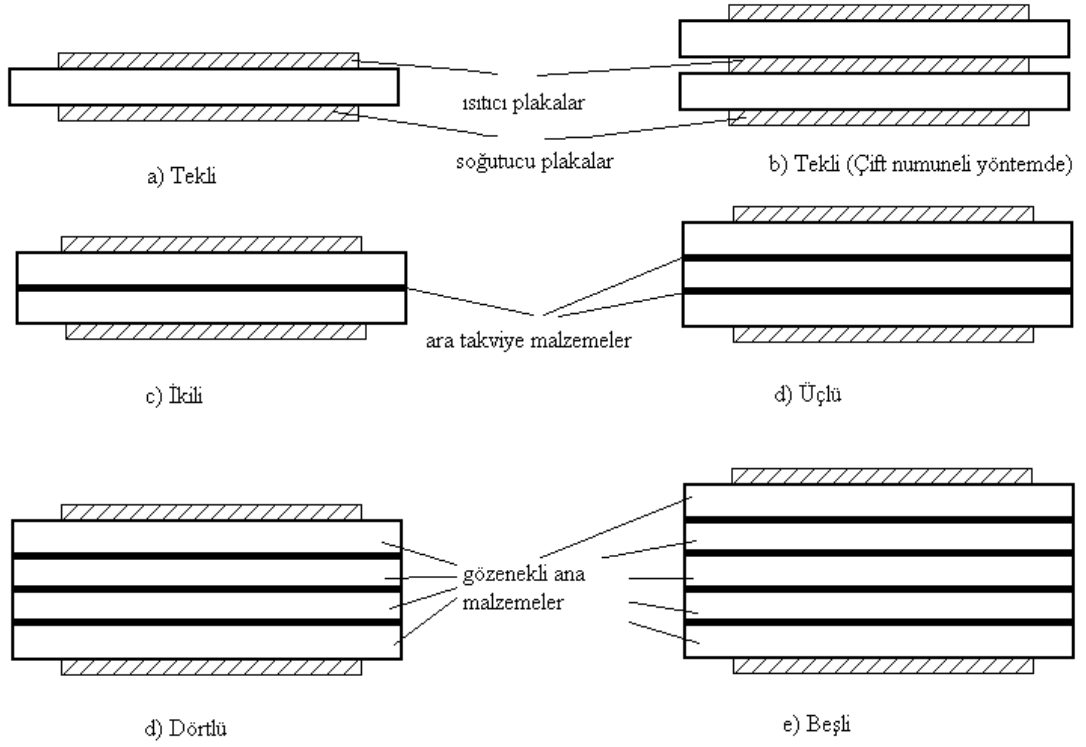
Alüminyum ve paslanmaz çelik takviyesi kullanılan üçlü camyünü numunelerinde, kalınlık ortalama olarak 55,2 mm ve 55,1 mm'dir. Kütleleri ise, 5242,9 g ve 12883,9 g olarak ölçüldü. Ayrıca, araya iki adet kağıt konularak oluşturulan üçlü camyünü numunelerinde, 49 mm ve 1203,7 g'dır. Aynı şekilde stretch film ve üçlü camyünü kullanımında, 48,8 mm kalınlığında ve 1162,9 g kütesindedir. Benzer ince alüminyum folyo takviyesi yapıldığında ise, 48,9 mm kalınlığında ve 1180,5 g kütesindedir. Dokumasız filtre kumaş malzemesi, bakır folyo takviyesi ile kullanıldığında kalınlık 49,2 mm'dir. Kütle ise, 3398 g olarak ölçüldü. Bu kalınlık ve kütle verileri, EP500 ısı iletkenlik cihazında 1000 Pa basınç altında ortaya çıkan kalınlıklardır. Ayrıca, mevcut muhafazalı sıcak plaka tesisatında kalınlıklar ölçüm yönteminden dolayı değişmektedir. Burada, tekli, ikili, üçlü ve dörtlü cam yünü malzemelerinde kalınlıklar ortalama olarak 15,993 mm, 31,21 mm, 44,83 mm ve 59,90 mm'dir. Burada yoğunluklar, sırasıyla ortalama 105,91 kg/m³, 97,29 kg/m³, 101,36 kg/m³ ve 99,85 kg/m³'tür.

Her bir tabakalı ve takviyeli (Al gibi) numunenin yoğunluğu, ağırlık/hacim ile tespit edildi. Tabakalı numunelerin ağırlığının değişiminden dolayı yoğunlukta değişim mevcuttur. Gözeneklilik ise, lif yoğunluğu 2560 kg/m³ olan camyünü için belirlendi. Lif özellikleri Bailleul ve ark. (2003) tarafından verilen çalışmadan alındı. Burada, her bir tabakanın kalınlığı ve kütesine dikkate alınarak tespit edildi. Camyününün gözenekliliği için, toplam hacim "0,5x0,5xkalınlık" ile hesaplandı. Ayrıca camyünü lifinin kapladığı hacim ise, kütle için lif yoğunluğuna oranı ile tespit edildi. Boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanan gözeneklilikten, % 96,294 olarak bulundu. Roy ve ark. (2006) tarafından, deneysel olarak %90'nın üzerinde değerler verilmektedir. Straforu ise, Şenol ve AYTEKİN (2004) %98 gözeneklilikte vermektedir. Dokumasız filtre kumaşının hava geçirgenliği, firmada 150 l/dm².dk olarak verilmektedir. Gözeneklilik, verilerde değerlendirmeye tabi tutulmadı.

Araya takviye edilecek naylon, kağıt, ince alüminyum folyo, alüminyum ve bakır folyolar, alüminyum ve paslanmaz çelik levhalar numunelerle aynı boyutlarda kesildi. Bu takviyeler, farklı emmisivite değerlerine göre ele alındı. İki farklı

alüminyum folyo, bakır folyo, alüminyum ve paslanmaz çelik levhalar düşük emmisivite değerlerine sahip malzemelerdir. Alüminyum ve bakır folyolar, 0,1 mm ve alüminyum ve paslanmaz çelik levhalar 3 mm kalınlığına sahiptir. Ayrıca, gıda saklamada kullanılan alüminyum folyo çok ince bir malzeme olup 1 µm kalınlıklıdır. Alüminyum ve bakır folyolar, kırtasiye veya sanatsal amaçlı kullanılırken alüminyum ve paslanmaz çelik levha sanayide tercih edilmektedir. Alüminyum, atmosferik korozyona dayanıklı, kaynak kabiliyeti yüksek, mekanik özellikleri düşük ancak elektrik ve ısı iletkenliği yüksek bir malzemedir. Ardından, yüksek emmisivite değerlerine sahip malzemeler olarak kağıt ve stretch film kullanıldı. Bunlardan kağıt, her iki tarafı beyaz kırtasiye tipi malzemedir. Bu malzeme, 10 µm kalınlıklı ve 81 g/m² dir. Bunun dışında gıdaları kaplamada kullanılan 1 µm'dan düşük kalınlığa sahip stretch tipi filmler de (LDPE/LLDPE plastik malzeme) kullanıldı. Bu malzemelerin emmisivite değerleri, kaplanmamış alüminyum folyoda 0,030-0,09, bakır folyoda 0,008-0,070, paslanmaz çelikte (tip 18-8) 0,16, kağıtta 0,68-0,90 ve stretch filmi 0,84-0,94 aralığında olduğu bulundu (<http://www.infrared-thermography.com>)

Deneye başlamadan önce, numuneler çevre ile dengeye ulaşabilmesi için laboratuvar ortamında şartlandırıldı. Numuneler, kışın 22-25 °C, yazın 25-31 °C sıcaklık aralığında ve %50-55 bağıl nemlilik aralığında en az 24 saat bekletildi. Bu tekli, ikili, üçlü, dördü, beşli gözenekli numuneler, Şekil.2.9'daki gibi seri halde yerleştirilerek ölçüm numuneleri elde edildi. İlk olarak, takviye yapılmadan ısı iletkenlik ölçüm cihazına alınarak ölçümleri gerçekleştirildi. Ardından, ölçüm cihazındaki bu katmanların arasına naylon, kağıt, iki farklı tip alüminyum folyo, bakır folyo, alüminyum, bakır gibi malzemeler seri halde konularak incelendi. Bu şekilde iletimle ısı transferi gerçekleşirken, araya konulan takviyeler ile taşınım ile olan ısı transferi engellenmekte ve taşınım ile ısı transferi gözlemlendi. Bunlar, farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık farklarında ele alındı.

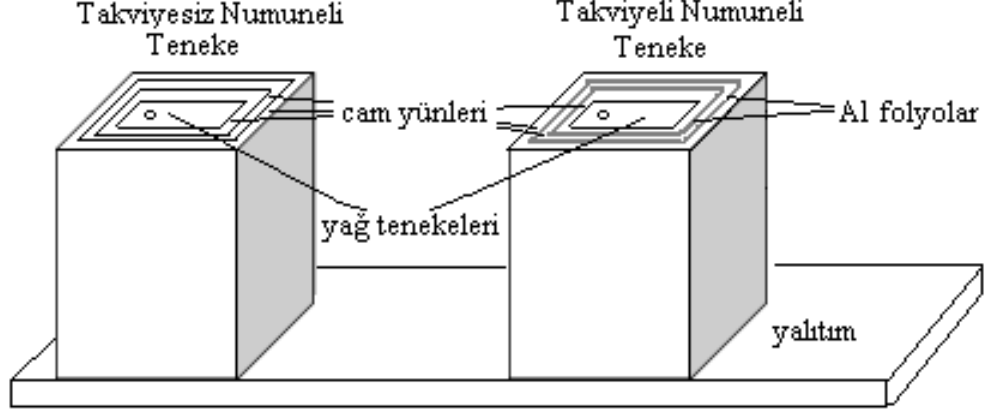


Şekil.2.9. Farklı kalınlıklara sahip numuneler

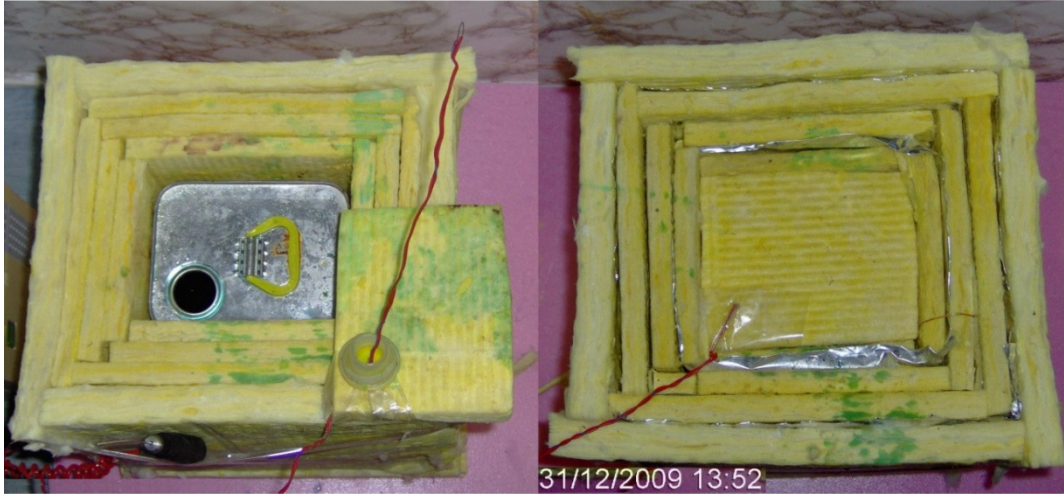
2.3.7. Isınma ve soğuma deney tesisatında ölçümler

Bu çalışmada, bir önceki muhafazalı sıcak plaka yönteminde ölçülen efektif ısı iletkenlikler üzerine değerlendirme yapabilmek amacıyla deney tesisatı kuruldu. Bu tesisatta iki tip tabakalı sistemin karşılaştırılmasıyla deneyler gerçekleştirildi. Deneyler, yağ tenekelerinin içerisine koyulan yarı ve tam dolu haldeki sıcak ve soğuk suyun/antifrizli suyun zamanla soğumasını ve ısınmasını içermektedir. Tesisat, Şekil.2.10 ve Şekil.2.11’de verildiği gibi 5 litrelik yağ tenekelerinin etrafına cam yünü tabakaları ve bu tabakalar arasında alüminyum folyo ilave edilerek hazırlandı. Bu yağ tenekelerin plastik kapaklarından delinerek aynı mesafeden ölçümleri sağlayacak şekilde ısı çiftleri geçirildi. Isıl çiftler, Şekil.2.12’de verilen veri toplayıcıya bağlanarak dakikada 1 veya 5 dakikada bir sıcaklıkları kaydetti. Cole-parmer model 92000-05 veri toplayıcı ile iç akışkan sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığı ölçüldü. Bu veri toplayıcı ile birlikte üçlü camyünü kaplı 5 litrelik yağ tenekeleri, Şekil.2.13’de gösterilen ortama ve buzdolabına yerleştirildi. Buradan excel programında sıcaklık ve süreye göre soğuma ve

ısınma süreleri dikkate alınarak efektif ısı iletkenlik değeri ölçülerek EP500 cihazından alınan sonuçlarla karşılaştırıldı.



Şekil.2.10. 5 litrelik yağ tenekelerinin takviyesiz ve takviyeli cam yünü ile tasarımı

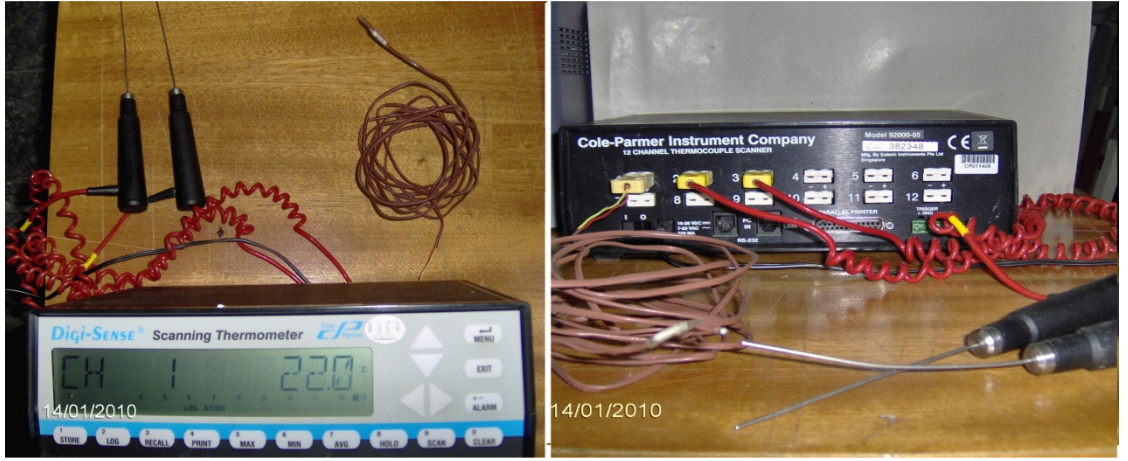


Şekil.2.11. Takviyesiz ve takviyeli cam yünü ile kaplanan 5 litrelik yağ tenekeleri

Tenekedeki iç akışkan sıcaklığı ve tenekenin dış ortam sıcaklığı, Cole-parmer Digi-Sense (model 92000-05) veri toplayıcı ile ölçüldü. Aynı anda, maksimum 12 noktadan sıcaklık ölçümüne yarayan bu veri toplayıcı, K tipi ısı çiftleri ile kullanıldı. B, E, J, K, N, R, S,T ısı çifti tipleri de kullanılabilir. K tipi kullanım için cihaz doğruluğu ± 0.5 °C ve okumanın $\% \pm 0.1$ 'dir. 4 s'den 1 saate kadar kayıt yapabilen ve 0.1 °C/1 °C çözüme sahip bir cihazdır. Kanallar, istenildiğinde ayrı ayrı açılıp

kapanabilmektedir. Aygıt, 4680 veri depolayabilip, saklayabilme özelliğine sahiptir. Anlık veya saklanmış veriler anında yazıcıya veya bilgisayara aktarılabilir. Aygıtın çalışma gücü, 10-28 V DC 300 mA ve 9-20 V AC 500 mA'dır.

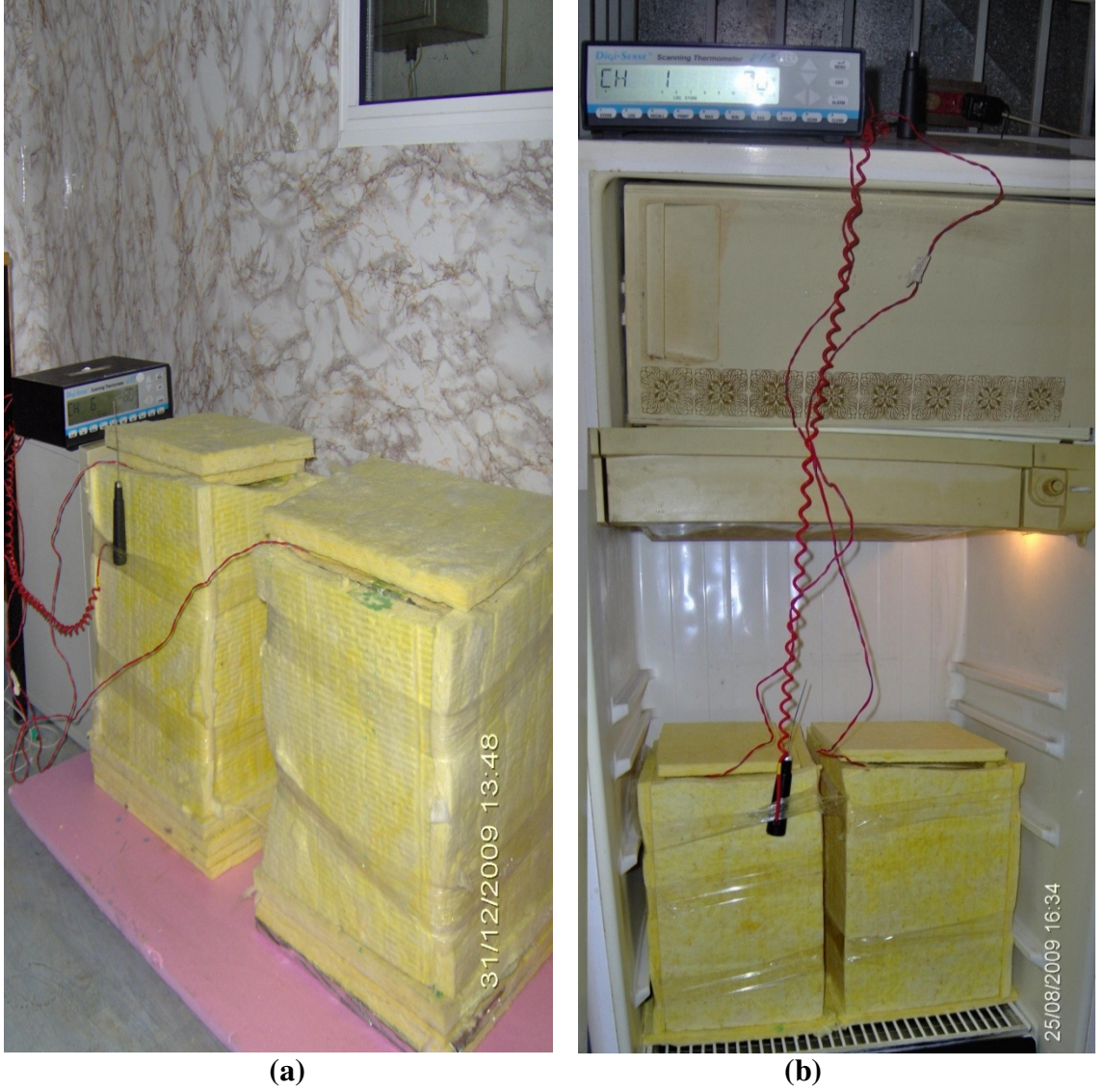
Teneke içi su/antifrizli suyun sıcaklık ölçümü için esnek K tipi ısıl çift kullanıldı. Bu ısıl çiftin cevap süresi 4 s ve veri toplayıcıya uygundur. Ayrıca, dış çevre sıcaklık ölçümünde veri toplayıcıya uygun, K tipi bir prob daha kullanıldı. Bu prob ise, -100 °C / +850 °C ölçüm aralığına sahiptir. Proben sıcaklığı algılama süresi 0.4 saniyedir. Prob uzunluğu 100 mm, çapı ise 1,5 mm'dir. Isıl çiftler, Şekil.2.12 ve Şekil.2.13'de verildiği gibi veri toplayıcıya bağlanarak ölçümler gerçekleştirildi.



Şekil.2.12. K tipi ısıl çiftlerin bağlandığı 12 kanallı veri toplayıcının görünüşü

Soğuma veya ısınma süreleri Şekil.2.13'deki gibi incelenen iki farklı üçlü camyünü numune için, efektif ısıl iletkenliğe ulaşılabilir. Teneke içindeki akışkanın iç enerjisi, tenekenin etrafına sarılan Al folyolu ve folyosuz tabakalı camyünü numuneden çevreye gerçekleşen ısı kaybı ile dengelenmektedir. Zamanla gerçekleşen bu soğuma veya ısınma olayı, enerjinin korunumu ile açıklanabilir. Bu olay, termodinamiğin birinci kanunu yazılarak tanımlanabilir:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE_t}{dt} \quad (2.86)$$



Şekil.2.13. (a) ortama ve (b) buzdolabına yerleştirilen 5 litrelik yağ tenekelerinin ısınma ve soğuma süresince sıcaklıklarının kaydı

Bu ifade, sistemin çevresi ile yaptığı iş ve ısı alışverişleri toplamının sistemin toplam enerjisindeki değişimine eşit olduğunu gösterir. Kapalı bir sistemde toplam enerji, maddenin yapısına bağlı iç enerji ve konuma bağlı potansiyel ve hıza bağlı kinetik enerjilerin toplamıdır. Dışarı ile herhangi bir iş alışverişi olmayan sistemde, ifade aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} (U + PE + KE) \quad (2.87)$$

Kabın yüzeylerinden kaybedilen ısı ise,

$$Q=K_e.A.\Delta T \quad (2.88)$$

yazılabilir. İç enerjideki değişim, ısı kayıplarına eşit yazılabileceğinden,

$$K_e.A.\Delta T = \frac{dU}{dt} \quad (2.89)$$

şeklinde ifade edilir. Burada iç enerji, katı ve sıvılar için $c=sbt$ kabulü ile,

$$K_e.A.\Delta T = m.c. \frac{dT}{dt} \quad (2.90)$$

yazılabilir. Burada, $\Delta T = T - T_\phi$ sıcaklık farkıdır. Bu ifade y ile tanımlanırsa ve her iki tarafın türevi alınırsa $dy = dT$ olacaktır. Bunlar, yerine koyulursa ve düzenlenirse,

$$K_e.A.y = m.c. \frac{dy}{dt} \quad (2.91)$$

$$\left. \frac{dy}{y} \right|_1^2 = \frac{K_e.A}{m.c} \cdot \Delta t \quad (2.92)$$

$$\ln \frac{y_2}{y_1} = \ln \frac{T_2 - T_\phi}{T_1 - T_\phi} = \frac{K_e.A}{m.c} \cdot \Delta t \quad (2.93)$$

elde edilir. Bu denklem (2.93), iki farklı tip cam yünü tabakası için yazılıp birbirine oranlanırsa aşağıdaki formda elde edilir. Burada $[A/(m.c)]$ oranı her ikisinde de sabittir (folyo etkisi ihmal edilmiştir) ve sadeleşir. Buna göre,

$$\frac{\ln (y_2/y_1)_{Al \text{ takviyeli}}}{\ln (y_2/y_1)_{Al \text{ takviyesiz}}} = \frac{(\Delta t. K_e)_{Al \text{ takviyeli}}}{(\Delta t. K_e)_{Al \text{ takviyesiz}}} \quad (2.94)$$

ilişkisi ile takviyeli ve takviyesiz cam yünü numunelerinin soğuma ve ısınma sürelerine bağlı olarak efektif ısı iletkenlikleri arasındaki ilişkiye ulaşılabilir. Bu bağıntıyla belirli bir sürede efektif ısı iletkenliğinin değişimi izlenebilir yada sabit sıcaklık aralığında süreye göre efektif ısı iletkenliğinin değişimi görülebilir.

2.3.8. SPSS ile deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalardaki parametre sayısı ve elde edilen verilerin miktarı fazla olduğundan, verilerin ve sonuçların birbirlerine göre karşılaştırılması güçleşmektedir. Çok önemli sonuçlara yol açacak veriler, gözden kaçabileceği gibi, önemli olmayan parametreler yanıltıcı bir biçimde ön plana çıkabilir. Bu gibi durumları önlemek ve elde edilen verileri doğru bir biçimde değerlendirebilmek için, istatistiksel analiz yöntemlerinden yararlanıldı. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında belirlenen ısı ortam şartlarına bağlı olarak efektif ısı iletkenlikteki değişimler istatistiksel olarak değerlendirildi.

2.3.8.1 İstatistiksel analiz ve yöntemleri

Doğada karşılaşılan bütün olgular, belirli faktörlerden etkilenmektedir. İncelenecek olgu ve olayları, kendisini oluşturan bütün faktörleri göz önüne alarak incelemek gerekir. Ayrıntılı olarak incelenen bir değişken, doğada tek başına bağımsız bir dağılım göstermez. Bir ya da daha fazla değişken ile ilişki içerisindedir. Bir değişkeni incelerken, bu değişken ile birlikte değişen ya da ilişkili tüm değişkenleri, sabit veya türdeş olarak kabul etmek ve kontrol altına almak mümkün değildir. Bu koşulların değişimini problem çözümüne katmak ve gerçekçi çözümlere ulaşmak için, çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden yararlanmak gerekir (Kan 2006).

İstatistik testleri, kurulan hipotezde parametre kullanılıp, kullanılmamasına, parametre sayısına, örnek sayısına, örneklemin bağımlı olup olmadığına ve test edilecek değişken sayısına göre farklı biçimlerde sınıflandırılmaktadır (Özdamar 2001).

Test edilen değişken sayısına göre istatistik testleri ikiye ayrılır:

1. Tek değişkenli önemlilik testleri
2. Çok değişkenli önemlilik testleri

Kurulan hipotezin parametreye dayalı olup olmadığına göre iki gruba ayrılır:

1. Parametrik önemlilik testleri
2. Parametrik olmayan önemlilik testleri

Parametre sayısına göre üç gruba ayrılır:

1. Tek örneklem testleri
2. İki örneklem testleri
3. k-örneklem testleri

Örneklemin bağımlı olup olmadığına göre iki gruba ayrılır:

1. Bağımlı örneklem testleri
 - 1.1 Bağımlı iki örneklem testleri
 - 1.2 Bağımlı k-örneklem testleri
2. Bağımsız örneklem testleri
 - 2.1 Bağımsız iki örneklem testleri
 - 2.2 Bağımsız k-örneklem testleri

Değişkenin incelendiği araştırmalarda sayısal sonuçların sunulmasından çok bazı parametreler ön plana çıkmaktadır. Burada p değeri, karşılaştırılan gruplar arasındaki değerlerin istatistiksel bir ölçüsü olarak ele alınan bir parametredir. Araştırmacılar, genellikle p değerini vermek yerine, bu değeri anlamlılık düzeyinden büyük veya küçük ($p >$ ve $p <$) olduğunu belirtirler. Bu anlamlılık düzeyi, bir dağılım üzerinde red ve kabul bölgelerini belirler (Kan 2006). Örnek olarak $p < 0.05$ olması, karşılaştırılan parametrelerin aralarında %5 hassasiyetle anlamlı olduğunu göstermektedir. Anlamlılık düzeyi, istatistiğin gözlenme olasılığına bakarak belirlemek söz konusudur ve bunun için dört koşul vardır. Bunlar Çizelge 2.2’de verildi (Özdamar 2002).

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, istatistiksel analiz programı olan SPSS 1.7 aracılığı ile analiz edildi. Anlamlı sonuçlar olup olmadığını ve faktörlerin etkilerinin büyüklüğünü anlamak amacıyla ANOVA ve S-N-K testleri uygulandı.

Çizelge 2.2 İstatistik testlerde elde edilen p değerlerine göre verilen kararlar ve önemlilik düzeyi.

Karar olasılığı	Karar	Düzeyi
$p > 0.05$	Önemli değil	-
$p < 0.05$	Önemli	*
$p < 0.01$	Çok önemli	**
$p < 0.001$	İleri düzeyde önemli	***

2.3.8.2 Tek değişkenli varyans analizi (ANOVA)

Birden fazla sayıda gruptan elde edilen veri setinde Y değişkeninin genel değişiminin (genel varyans), bu değişime etkide bulunan öğelerine göre ayırarak yapılan analiz, varyans analizidir. Varyans analizi, istatistiksel testlerde ANOVA adıyla geçer. Varyans analizi, normal dağılım gösteren, iki ya da daha fazla örnek ortalamasının (y toplum) aynı parametrik ortalamalı toplumlardan gelip gelmediğini ortak varyans kullanarak test etmeyi amaçlar (Kan 2006). Çizelge 2.3’de denklemleri görülen varyans analizinin uygulanabilmesi için örneklerin seçildiği toplumlar normal dağılımlı olmalıdır. Ayrıca, veriler ölçümlerle belirtilmelidir, örnekler rastgele seçilebilmelidir ve örnekler birbirinden bağımsız olmalıdır (Özdamar 2001).

Doğada olaylar, bir ya da daha fazla değişken ile ilişki içerisindedir. Bir değişkeni incelerken, bu değişken ile birlikte değişen ya da ilişkili tüm değişkenleri, kontrol altına almak mümkün değildir. Değişken, birden fazla öğelerin yada faktörlerin ve faktörlerin kesişimin etkisi altında yer alır. Bunun için, öncelikle bazı hipotezlerin kurulması gerekir. Genellikle, “ölçülen değer üzerine faktörlerin etkisi yoktur” hipotezi kurularak analize başlanır. Buna göre, ölçülen değerler açığı olarak Y , ölçülen değerlerin ortalaması μ , faktörler A ve B , her iki faktörün kesisimi AB ve hata C ile gösterilerek,

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.95)$$

tasarım oluşturulur. ANOVA analiz denklemleri ile yapılan hesaplamalardan faktörlerin etkileri belirlenir.

Çizelge 2.3 İki faktörlü ANOVA analiz denklemleri

Varyans kaynağı	Kareler toplamı	Sd
Gruplar arası	$GA = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{n_i} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{N}$	$f_A - 1$
Gruplar içi	$GI = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{(\sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{n_j} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{N}$	$f_i - 1$
Etkileşim	$GE = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{\sum_{j=1}^{n_j} (\sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{n_{ij}} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{N} - GI - GA$	$(f_A - 1) \cdot (f_i - 1)$
Toplam	$GT = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} Y_{ijk})^2}{N}$	$(f_A \cdot f_i \cdot n_k) - 1$
Hata	Hata=GT-GA-GI-GE	$f_A \cdot f_i \cdot n_k -$ diğerleri

Burada Y_{ijk} ve N, ijk 'ya göre değişken değerleri ve toplam veri sayısını göstermektedir. Ayrıca n_i ve n_j i. ve j. faktörlere ait veri sayısıdır. n_k , o faktör grubu altındaki veri sayısıdır. f_A, f_i ise, her bir faktörün kendi içinde sayısını ifade etmektedir.

S-N-K testi, Student Newman Keul testidir. Bu test, verilen hipotezler sonrası grup ortamlarının ikili olarak karşılaştırmalarını içerir. Grup ortalamalarının ikili karşılaştırmalarında, aceleci olarak mantığa aykırı sonuçlara ulaşma eğilimi gösterilir. Örnek olarak $m_1 < m_2 < m_3$ verilirse, ilk olarak birkaç sonuç çıkarılmaktadır. m_1 ve m_3 'ün önemli oranda farklı olmadığı ya da m_2 'nin m_1 'den önemli oranda farklı olduğu sonucu çıkarılır (http://www.aiaccess.net/English/Glossaries/GlosMod/e_gm_newman_keuls.htm). Aslında, bu sonucun hatalı olabileceği ve her bir ortalama çiftinde “önemli farklılıkların” incelenmesi gerektiği öne sürülmektedir. Bu test, ölçüm değişkenini

etkiyen öğelerden hangisinin önemli oranda etkilediğini ön plana çıkarmaktadır. Çoklu karşılaştırma testi olup, ANOVA sonuçlarından yararlanmaktadır.

2.3.8.3 SPSS 1.7 programı ile analiz

EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında belirlenen ısı ortam şartlarına bağı olarak efektif ısı iletkenlikteki değişimler istatistiksel olarak değerlendirildi. İstatistiksel analizler SPSS 1.7 istatistik programı ile yapıldı (Şekil.2.14). Burada değişken, efektif ısı iletkenliktir. Sıcaklık, sıcaklık farkı ise faktörlerdir. Buradan iki faktörlü analiz olarak tasarlanırsa, üç hipotez kurulur. Bunlar, “sıcaklığın, sıcaklık farkının ve herikisinin ölçülen değer üzerine etkisi yoktur” hipotezleridir. Faktörlerden sıcaklık, sıcaklık farkı ve herikisinin etkisi, denklem (2.95)’e göre A_i , B_j ve AB_{ij} olarak ele alındı. İlk olarak, alüminyum folyo takviye edilmemiş üçlü strafor numunedeki 5, 10, 15 K sıcaklık farkları için 0, 5, 10, 15, 20, 25, 32, 40 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyler incelendi. Ardından bu sıcaklık farklarında ve sıcaklıklarda alüminyum folyo takviyeli üçlü strafor numunesi ele alındı. Ölçülen verilerin sayısı en az üç olup bu veriler belirli grup ve grup altında toplanarak ANOVA testi gerçekleştirildi. Farklı tip numunelerde ayrı ayrı analiz yapıldığı için numunedeki değişim dolaylı ele alındı.

İki faktörlü tasarım şeklinde ele alınan iki farklı tip numunede analiz gerçekleştirildi. Bu analizde üçlü strafor numunesinin hem takviyeli hem de takviyesiz hali ayrı ayrı ele alındı. Programın analiz aşamasında “General Linear Model—univariate” altında yer alan “Post Hoc Multiple Comparisons For Observed Means” ve “Options” menülerinde faktörlerler belirlendi. Bağımlı değişken olarak efektif ısı iletkenlik verileri alındı. “Post Hoc Multiple Comparisons For Observed Means” menüsünde S-N-K varyans analizi seçildi. Ayrıca “options” menüsünde tanımlı istatistikler, homojenlik testi ve tahmini etki parametreleri seçildi. SPSS 1.7 programından elde edilen varyans analizi tablosu (ANOVA) ile, sıcaklık, sıcaklık farkı, alüminyum folyo arasından hangilerinin veya hangi ikisinin keşişiminin numunenin efektif ısı iletkenlikte etken olduğu tayin edildi. Faktörlerden biri sıcaklık ve diğeri sıcaklık farkı alındı. Alüminyum folyonun etkisi bu analiz sonuçlarından çıkarıldı. Yine aynı program ile yapılan S-N-K testi ile de, etken olarak tayin edilen faktörün her bir

seviyesi incelendi. Yani S-N-K testi ile etken olan bu faktör seviyeleri arasındaki fark ele alındı.

The screenshot displays the SPSS Statistics Data Editor window for a dataset named '*strafor ve ucluzocam.sav [DataSet1]'. The data table contains 8 rows of observations with the following variables: Specimendes, Temperat, Diff.temp, Spec.thickn, Rawdens, and lamMeas. The 'Univariate' dialog box is open, showing the following configuration:

- Dependent Variable:** lam Meas [lamMeas]
- Fixed Factor(s):** Temperat. [Temperat], Diff. temp. [Diff.temp]
- Random Factor(s):** (Empty)
- Covariate(s):** (Empty)
- WLS Weight:** (Empty)

The dialog box also includes buttons for Model..., Contrasts..., Plots..., Post Hoc..., Save..., and Options... at the bottom right, and OK, Paste, Reset, Cancel, and Help buttons at the bottom left.

	Specimendes	Temperat	Diff.temp	Spec.thickn	Rawdens	lamMeas
1	strafor-folyolu	25	10	87,5000	15,1000	36,0700
2	strafor-folyolu	25	10	87,5000	15,1000	39,8400
3	strafor-folyolu	25	10	87,5000	15,1000	39,7100
4	strafor-folyolu	25	10	87,5000	15,1000	38,3700
5	strafor-folyolu	32	10	87,5000	15,1000	56,8100
6	strafor-folyolu	40	10	87,5000	15,1000	78,1300
7	strafor-folyolu	32	10	87,5000	15,1000	62,7000
8	strafor-folyolu	40	10	87,5000	15,1000	81,4600

Şekil.2.14 SPSS 1.7 analiz programı ve değişkenler

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümün ilk aşamasında, literatürdeki çalışmalardan elde edilen veriler matematik modele uygulandı. Öncelikli olarak literatürdeki efektif ısı iletkenlik modelleri, her malzemeye veya belirtilen özelliklere sahip malzemelere uygulanıp uygulanamayacağı açısından incelendi. Ardından geliştirilen matematik modelin etkinliğini belirlemek amacıyla literatürde mevcut olan çeşitli malzemelerin deneysel verileri ile karşılaştırıldı. Bu iki aşamada da hem literatürde verilen modellerin hem de geliştirilen matematik modelin değerlendirilmesi yapıldı.

İkinci aşamada, farklı tabakalı numunelerin efektif ısı iletkenlikleri deneysel olarak ölçüldü. Bu numuneler arasında emisivite değeri farklı malzemelerin konulup konulmamasına göre, ölçümler gerçekleştirildi. İlk olarak, laboratuardaki muhafazalı sıcak plaka cihazında yapılan ölçümler verildi. Farklı tabaka kalınlıklarındaki camyünü numunelerin arasında naylon koyularak ve koyulmadan yapılan ölçümler, sunuldu ve karşılaştırıldı. Ardından, standartlara uygun EP500 muhafazalı sıcak plaka cihazı ile bu deneyler genişletildi. Farklı tabaka kalınlıklarındaki camyünü numuneleri arasında alüminyum folyo, kağıt, bakır gibi takviye malzemeleri koyularak ve koyulmadan yapılan ölçümler, sunuldu. Ayrıca, camyünü dışında strafor ve dokumasız (nonwoven) filtre kumaş malzemesi ile yapılan ölçümler verildi. Bu ölçümlerin sonuçları, karşılaştırılarak değerlendirildi. Son olarak, takviyeli ve takviyesiz iki farklı tabakalı sistem kurularak soğuma ve ısınma süreleri elde edildi ve incelendi. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ile takviyeli gözenekli ortamların özellikleri belirlendi.

Bu çalışmalar yanında üçlü strafor numunesinin efektif ısı iletkenliği, SPSS 1.7 programı ile sıcaklık ve sıcaklık farkına göre incelendi. Program, alüminyum folyo takviyelenmiş ve takviyelenmemiş halde ele alındı.

3.1. Efektif Isıl İletkenlik Modellerinin Değerlendirmesi

Literatürde karşılaşılan efektif ısı iletkenlik modelleri, her malzemeye veya belirtilen özelliklere sahip malzemelere uygulanıp uygulanamayacağı açısından incelendi ve değerlendirildi. Literatürde, bir çok modeli içeren böyle bir çalışma yeralmamaktadır. Bunun için, “Materyal ve Yöntem” bölümünde verilen efektif ısı iletkenlik modellerinden bazı temel modeller seçildi. Literatürde verilen efektif ısı iletkenlikle ilgili deneysel sonuçlar tespit edilerek, bu modellere uygulandı. Bu modellerin geçerlilik aralığı ise, gözenekliliğe göre aşağıdaki gibi verilmektedir.

Düşük gözeneklilikte (%10);

- Maxwell Model (Chiew ve Glandt 1983, Gonzo 2002, diğerleri)
- Bauer Model ($V_d \geq 0,90$)

Ortalama gözeneklilikte (%10-85);

- Sugawara ve Yoshizawa Model ($\varepsilon < 0,20$ örneklerde)
- Maxwell model (Maqsood ve Kamran (2005)'a göre $k_d/k_s \ll \%10$)
- Cheng ve Vachon Model ($k_s \ll k_d$, $k_d/k_s > 100$, $V_d < 0,667$)
- Chiew ve Glandt Model ($0,15 \leq V_d \leq 0,85$)
- Kohout Model ($k_d/k_s < 200$; üstüste kesişen küreler için $0,5 < V_d < 0,7$; küpler için $0 < V_d < 1$)
- Tichâ ve Pabst Model ($\varepsilon > 0,50$ küçük gözeneklerde)
- Fan ve ark. Model (örneklerde $0,50 < \varepsilon < 0,70$)
- Singh Model ($\varepsilon < 0,90$)
- Meredith ve Tobias model ($V_d < \%60$)
- Hu ve ark. Model (örneklerde $0,25 < \varepsilon < 0,55$ $k_s/k_d \leq 0.2$)
- Liang ve Qu Model ($0,10 < \varepsilon < 0,50$ ve örneklerde k_{es} , $R < 5$ mm ve $\varepsilon < \%78$ için k_e 'yi çok iyi ifade etmektedir)
- Gupta, Yang ve Roy Model (örneklerde $0,43 < \varepsilon < 0,63$)
- Gibson Model (kumaşlarda $\varepsilon > 0,60$)
- Rahman ve Chen Model (meyve ve sebzeler için $\varepsilon < 0,56$) ve Rahman Model ($5 \% < X_{su} < 88\%$, $0 < \varepsilon < 0,5$ $20 < T < 25^\circ\text{C}$)

- Fu, Viskanta ve Gore Model ($0,53 \leq \varepsilon \leq 0,97$)

Yüksek gözeneklilikte (%85);

- Paralel ve seri modelin genel formu (Lee ve Yang (1997)'e göre $k_d/k_s \gg 1$ iken önemli bir hata verdiği belirtilmektedir.)
- Geometrik model (Singh ve Kasana (2004)'e göre yüksek gözenekli metal köpükler için)
- Boomsma ve Paulikakos Model (yüksek gözenekli metal köpükler $\varepsilon > 0,90$)
- Argenta ve Bouvard Model ($k_d/k_s \geq 10^3$ sahip yoğun gözenekli malzemeler için)
- Bhattacharya ve ark. Model (örneklerde $\varepsilon \geq 0,90$)

Genel model olarak;

- Lee ve Yang Model ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)
- Bruggeman Model ($0 \leq V_f < 1$)

verilebilir.

Birçok çalışmada önceliğe sahip olabilecek başlıca modeller, aritmetik ortalama modeli, geometrik ortalama modeli, Hashin-Shtrikman modeli (seri ve paralel modeller/Wiener sınırları), Maxwell modelleri, Efektif Ortam Teorisi (EMT), Maxwell modeli, Maxwell-Eucken 1 ve 2 modelleri, Brailsford ve Major modeli, Levy modeli, Jeffry modeli, Halphin-Tsai eşitliği, belirlendi. Diğer modellerden de Hamilton ve Crosser modeli, Davis modeli, Lu ve Lin modeli, Babanov modeli, Varma ve ark. modeli, Singh ve ark. modeli ele alındı. Burada, ampirik parametreye bağlı olan ve olmayan herbir model görülmektedir. Ayrıca, efektif ısı iletkenlik terimi kapalı olan modellerde yer almaktadır. Buradaki ampirik parametreye bağlı modeller, gözenek şekli, düzeni gibi bazı fiziksel ve ısı parametrelerle tanımlanmaktadır. Bu parametreler; Halphin-Tsai modelindeki (L/d_d), Nielsen Modeldeki w , Krischer Modelindeki λ / Meredith ve Tobias Modeldeki F ve diğerleri. Bu parametrelerin gerçek aralıkları ise, Çizelge.3.1'de verildi. Modeller arasında, efektif ısı iletkenlik terimi kapalı olan modellerde yer almaktadır. Bu durum, efektif ısı iletkenliğinin tahminini zorlaştırmaktadır. Bu modeller; Carson ve ark. (2006)'in makalesindeki EMT modelin modifiye modeli, Kirkpatrick modeli, Cernuschi ve ark. (2004) makalesindeki

Bruggmen modeli ve Xue ve Xu (2005)'in makalesindeki Bruggmen'in EMT modeli. Bu modeller için, matematiksel çözüm yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır.

Çizelge.3.1. Bazı modeller için tahmini parametrelerin aralıkları

Modeller	Altsınır	Üst sınır
Maxwell-Hamilton : j	1,65	23000
Maxwell-Hamilton : j ***	1,01	11,60
Nielsen : w	0,27000	16000
Halphin-Tsai: [L/d _d]	0,32	3518
Halphin-Tsai: [L/d _d] ***	0,00469	115
Krischer : F	0,000010	8,14
Meredith ve Tobias : F	0,00088	5,375
EMT'in modifiye modeli: F	0,290	0,999
Kirkpatrick : F	3,18	8000

***: önerilen model aynıdır, fakat iletkenlik ve hacim parametreleri değiştirilerek hesaplanmaktadır.

Efektif ısı iletkenlik modelleri, gözeneklilik aralığı, ısı iletkenlik aralığı şeklinde ayırt edilmeden literatürdeki her bir deney verisine uygulandı. Çizelge 3.2'de seçilen efektif ısı iletkenlik modellerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması verilmektedir. j, w, F, L/d_d gibi ampirik parametreler ise, belirsiz olup 0 - 1 aralığında kabul edildi. Hesaplamalarda, sabit bir değer olarak 0,5 alındı. Ayrıca k_d/k_s, katı fazın iletkenliğinin akışkan faz iletkenliğine oranı şeklinde kabul edildi. Bazı modellerde, katı fazın iletkenliği yerine akışkan fazın iletkenliği kullanılarak sonuçlar elde edildi. Bu sırada hacim oranları da yer değiştirmektedir. Ardından, sisteme uygun bir model seçimi yapabilmek için ayrı ayrı fiziksel temellere göre irdelendi. Böylece, literatürdeki modellerin ayırt edilmesini sağlayabilecek bulgular elde edildi. Böylece, en yaygın kullanılan bu modellerin karmaşıklığı en aza indirildi. Çizelge 3.2'den aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

- Seri ve paralel modeller, aranan efektif ısı iletkenliğinin (k_e) aralığı hakkında bilgi vermektedir.
- % 94 ve üzeri gözeneklilikte, k_d/k_s oranına bağlı olarak bazı Maxwell modelleri (Maxwell*, Modifiye Maxwell (Carson 2002), Maxwell-Eucken 2, Maxwell* (Xue ve Xu 2005), Maxwell* (Chiew ve Glandt 1983) modelleri) uygun olabilir. Ayrıca, Halphin-Tsai (L/d_d=1)* eşitliği, Russell* ve Franc'1 modelleri de verilebilir. Bu

k_d/k_s oranı arttıkça, bu modellerin uyumluluğu azalmaktadır. Bazı özel ve parametreye bağlı modeller, etkin hale gelmektedir. Örneğin, klasik Maxwell modeli, Nielsen modeli, Krischer modeli, Singh ve ark. modeli.

- Aynı modeller, % 39 ve %70 gözeneklilik aralığında ve k_d/k_s oranı 3,5-6,5 civarında iken kullanılabilir. Bunun yanı sıra, Halphin-Tsai (L/d_d)*, Levy, efektif ortam teori, Brailsford ve Major, modelleri ilave edilebilir. Fakat bazı modellerin parametreleri değişen modelleri kullanılmalıdır. Bunlar; Maxwell, Modifiye Maxwell *(Carson 2002), Maxwell–Eucken 1, Maxwell (Xue ve Xu 2005), Maxwell (Chiew ve Glandt 1983), Halphin-Tsai ($L/d_d=1$), Russell modelleri. Burada, Kopelman Isotropik [1] modeli ile birlikte Franc'1 model de uyumlu modellerdir. Ancak, bu gözeneklilik aralığında k_d/k_s oranı arttıkça, bazı özel ve parametreye bağlı modeller etkin hale gelmektedir. Örneğin, Maxwell (Cernuschi ve ark. 2004), Nielsen, Halphin-Tsai (L/d_d), Gori ve ark. (k_{by}), Chiew ve Glandt (1983) modelleri.
- Aynı modeller, %10 altı gözeneklilikte ve belirli k_d/k_s oranında (80-90) uygun sonuçlar verebilir. Bunun yanı sıra, Maxwell* (Cernuschi ve ark. 2004), Klasik Maxwell, Halphin-Tsai (L/d_d)*, Levy, efektif ortam teori, Brailsford ve Major, Maxwell (Gonzo 2002), Bauer (Gonzo 2002) modelleri ilave edilebilir. Ancak, k_d/k_s oranının değişmesiyle özel ve parametreye bağlı modeller kullanılabilir.
- Modellemede, k_d/k_s oranı önemlidir. Ayrıca, modellerin aynı k_d/k_s oranında gözenekliliğin değişiminden etkilendiği görüldü. Gözenekliliğin etkisi, k_d/k_s oranı 6-8 yada 37-40 iken görülebilir.

Sonuç olarak; efektif ısı iletkenlik modeli seçerken k_d/k_s oranı ve gözeneklilik parametreleri önemlidir. Düşük iletkenlikli ve farklı gözenekliliğe sahip numunelerde bazı efektif ısı iletkenlik modelleri kullanılabilir. Bu modeller, Maxwell, Modifiye Maxwell (Carson 2002), Maxwell–Eucken 1-2, Maxwell (Xue ve Xu 2005), Maxwell (Chiew ve Glandt 1983), Halphin-Tsai ($L/d_d=1$), Russell, Franc'1 modelleri. Ancak parametrelerin değişimi önemli oranda sonucu değiştirmektedir. Bunun yanı sıra, yüksek gözeneklilik dışında efektif ortam teori, Brailsford ve Major modelleri kullanılabilir. İletkenlik ve oranı arttıkça, modelin deneysel verilerle uyumluluğu azalmaktadır. Bu durumda, özel ve parametreye bağlı modeller (Halphin-Tsai (L/d_d),

Levy, klasik Maxwell, Nielsen, Maxwell (Gonzo 2002), Maxwell (Cernuschi ve ark. 2004), ...), tercih edilebilir.

j , F , w , L/d_d gibi parametreye bağılı modellerin uyumlu olabilmesi mümkün olabilir. Bu ise, Çizelge.3.1'deki aralıktan parametrelerin doğru tahmin edilmesiyle mümkündür. Prensipde bu modellerde bazı fiziksel ve ısıl parametrelerin kullanımının temel amacı, gözenekli malzemeleri tanımlamada beklenen yaklaşımı sağlayabilmesiydi. Ancak burada bu ısıl ve fiziksel parametrelerin, deneysel sonuçlar ve teorik modeller arasındaki farklılığı tanımlayamadığı gözlemlendi. Bu parametrelerin aralığının, çok geniş olduğu görülmektedir. Örneğin, Halphin-Tsai modellerinin kullanımında F değeri, 0,32'den 3518'e değişmektedir. Bu değer, ya kullanıcının deneysel tecrübesine bağılı olarak ya da iyi bir tahminle belirlenebilir. Parametreye bağılı modellerin uyumlu olabilmemesinin, ancak Çizelge değerleri aralığında iyi bir tahminle mümkün olabilir. Bu değerlerin aralığının geniş olması nedeniyle, tahmin etmek zordur.

Sonuçta, ısıl iletkenlik modellerinin her gözenekli yapıya ve/veya iletken yapılara sahip deneysel veriler için uyumlu olmadığı anlaşıldı. Buradan, her modelin her yerde uygulanamayacağı anlaşıldı. Bununla birlikte, modelin kullanım aralığının bilinmesini de gerekli kılmaktadır. Bunun için, gözenekliliğin, k_d/k_s oranının, yalıtkanlık/iletkenlik özelliğinin tespiti ve doğru parametrelerin (j , F , w , $L/d_d...$) seçimi yapılarak efektif ısıl iletkenlik belirlenir. Matematik modellerin istenilen sonucu verebilmesi, modelin uygulanacağı gözenekli ortamın iyi bir şekilde tanımlanmasına bağlıdır. Bu da modeli kullanan kişinin, konunun iyi bir uzmanı olabilmemesini ön plana çıkarmaktadır. Efektif ısıl iletkenliğin tam olarak belirlenebilmesi, bu şekilde sağlanabilir. Verilen temel efektif ısıl iletkenlik modelleri (Seri, paralel, Maxwell ve türevi modeller, Maxwell-Eucken modellerinin iki formu, Efektif ortam teori modeli gibi) yerine deneysel verileri kullanmak ise, teçhizat gerektirdiği için tercih edilmemektedir.

Çizelge.3.2. Yaygın modellerin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Kaynak verileri		Carson ve ark. (2004)	Gupta ve ark. (2003)	Patirop (2004)	Ye ve ark. (2006)	Seo ve ark. (2005)	Kohout ve ark. (2004)	Ochs ve ark. (2008)	Spinnler ve ark. (2004)	Fu ve ark. (1997)	Xue ve Xu (2005)	Jang ve Matsubara (2005)	Barea ve ark. (2005)	Liang ve Qu (1999)	Vargas ve McCarthy (2002)	Jiang ve ark. (2004)	Xu (2001)
Denklem No	Modeller																
Numuneler		EPS bead/guar.	Softwood char	Kumaş (Kevlar /PBI)	NZ yün	C/P lifli ince tabaka	Cam küresel parçacık	EGG Cam lifli	SiO ₂	Çimento pastası+ silicafume	AL ₂ O ₃	ZrO ₂ -4mol% Y ₂ O ₃	Mullite	Gaz-katı kompozit	SS-304	Bronz parçacık	Bakır-lehim ince
Gaz		Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Argon	Hava	Hava	Hava	Hava
T ₀ (K)		283,5	309	321	286,3	293 ^b	298	313	698	293	293 ^b	295	473	1073	298	291,5	317,5
k _d		0,035	0,0946	0,179	0,194	0,46	0,8	1,16	1,4	1,4**	46	2,2**	5,1	6,79	15	54	365,15
k _s		0,6	0,02652	0,0278	0,0251	0,02575	0,02	0,03064	0,03555	0,02575	0,604	0,0259	0,025776	0,070204	0,02614	0,0256	0,0278
k _d / k _s oranı		0,0583	3,5671	6,4388	7,7291	17,8641	40,0000	37,8590	39,3812	54,3689	76,1589	84,9421	197,8585	96,7181	573,8332	2109,3750	13134,8921
Gözeneklilik		0,543	0,4238	0,666	0,989	0,65	0,39	0,61	0,949	0,0207	0,96	0,09	0,47	0,78	0,41	0,402	0,689
k _e		0,2262	0,0638	0,056	0,04622	0,27	0,14	0,07	0,075	0,32	1,1	1,9	1,4	1,68	0,67	0,798	49,7
2.1	Seri	0,0716	0,0453	0,0387	0,0253	0,0385	0,0494	0,0494	0,0374	0,6652	0,6288	0,2572	0,0545	0,0897	0,0636	0,0636	0,0403
2.2	Paralel	0,3418	0,0657	0,0783	0,0270	0,1777	0,4958	0,4711	0,1051	1,3716	2,4198	2,0043	2,7151	1,5486	8,8607	32,3023	113,5808
2.6	Geometrik Ortalama	0,1637	0,0552	0,0518	0,0257	0,0706	0,1898	0,1264	0,0429	1,2889	0,7183	1,4750	0,4249	0,1919	1,1091	2,4893	0,5307
2.11	Maxwell	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
	Maxwell *	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
	Maxwell-Hamilton (j)	11,9998	0,0389	0,0339	0,0252	0,0324	0,0351	0,0402	0,0365	0,4451	0,6165	0,1487	0,0402	0,0800	0,0449	0,0446	0,0341
	Maxwell-Hamilton (j)*	0,0545	<u>-0,0745</u>	<u>-0,0521</u>	0,0237	<u>-0,3722</u>	2,4053	<u>-1,7033</u>	<u>-0,0378</u>	1,4308	<u>-1,3157</u>	2,4450	48,7451	<u>-2,4943</u>	49,5013	165,0238	<u>-300,2936</u>
	Modifiye Maxwell (j)	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
	Modifiye Maxwell (j)*	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
2.12	Maxwell-Eucken 1	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
	Maxwell-Eucken 2	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
2.13	Maxwell (Xue ve Xu)	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
	Maxwell (Xue ve Xu)*	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
2.14	Maxwell (Cernuschi ve ar.)	0,2237	0,0477	0,0458	0,0257	0,0487	0,0540	0,0638	0,0406	0,0974	0,6737	0,0942	0,0661	0,1151	0,0722	0,0715	0,0537
	Maxwell (Cernuschi ve a)*	0,0831	0,0566	0,0388	<u>-0,0413</u>	0,0481	0,3493	0,1401	<u>-0,5179</u>	1,3577	<u>-18,944</u>	1,9082	1,5317	<u>-1,0317</u>	5,7991	21,4611	<u>-12,1894</u>

2.15	Klasik Maxwell	0,0126	0,0450	0,0449	0,0014	0,1215	0,4084	0,3467	0,0484	1,3570	1,2432	1,9158	2,1887	1,0747	7,3444	26,8876	84,4639
2.16	Maxwell (Chiew Glandt)	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
	Maxwell (Chiew Glandt)*	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
2.18	Nielsen (w, $V_M=1,6V_d$)	0,1893	0,0508	0,0528	0,0372	0,0574	0,0641	0,0751	0,0601	0,1446	1,0225	0,1334	0,0784	0,1457	0,0868	0,0862	0,0652
2.21	Halphin-Tsai ($L/d_d=1$)	0,2887	0,0553	0,0507	0,0257	0,0584	0,0984	0,0825	0,0408	1,0093	0,6765	0,5882	0,1102	0,1273	0,1376	0,1394	0,0654
	Halphin-Tsai (L/d_d)	0,2531	0,0519	0,0458	0,0255	0,0492	0,0753	0,0666	0,0392	0,8927	0,6530	0,4400	0,0827	0,1088	0,1007	0,1016	0,0529
2.21	Halphin-Tsai ($L/d_d=1$)*	0,1237	0,0611	0,0678	0,0264	0,1428	0,4206	0,3713	0,0833	1,3581	1,8388	1,9206	2,2065	1,1384	7,3610	26,9036	84,4877
	Halphin-Tsai (L/d_d)*	0,1004	0,0582	0,0618	0,0262	0,1219	0,3671	0,3097	0,0721	1,3452	1,5424	1,8445	1,8612	0,9083	6,2981	23,0537	67,2629
2.24	Levy	0,1962	0,0582	0,0579	0,0259	0,0852	0,2426	0,1560	0,0454	1,3233	0,7456	1,6924	0,6111	0,2089	2,2675	7,9130	0,1646
2.27	Efektif Ortam Teori	0,2391	0,0592	0,0574	0,0257	0,0897	0,3562	0,2001	0,0414	1,3577	0,6825	1,9085	1,5521	0,1845	5,8117	21,4728	0,4022
	Brailsford ve Major	0,2391	0,0592	0,0574	0,0257	0,0897	0,3562	0,2001	0,0414	1,3577	0,6825	1,9085	1,5521	0,1845	5,8117	21,4728	0,4022
2.29	Krischer'in yaklaşımı (F)	0,1184	0,0536	0,0518	0,0261	0,0632	0,0898	0,0894	0,0552	0,8959	0,9982	0,4558	0,1069	0,1697	0,1263	0,1270	0,0807
2.34	Russell	0,3038	0,0567	0,0558	0,0266	0,0695	0,1104	0,1006	0,0517	1,0112	0,8717	0,6011	0,1309	0,1699	0,1600	0,1620	0,0862
	Russell*	0,1380	0,0625	0,0694	0,0264	0,1482	0,4462	0,3891	0,0837	1,3699	1,8467	1,9803	2,3467	1,1742	7,8476	28,6929	88,3701
Ek 1.1	Gori ve ark.. (k_{by})	0,2705	0,0539	0,0467	0,0254	0,0512	0,0887	0,0709	0,0383	1,0075	0,6400	0,5758	0,0955	0,1082	0,1207	0,1225	0,0546
	Cheng ve Vachon Model ^[2]	3,4873	0,3771	0,0951	0,0288	0,0935	0,4604	0,1303	0,0491	<u>-0,1215</u>	0,7999	<u>-0,1539</u>	0,2378	0,1650	0,4411	0,4839	0,0877
	Singh ve ark. Model	0,8532	<u>-0,0110</u>	<u>-0,0437</u>	0,0228	<u>-0,9752</u>	<u>-0,1982</u>	0,9422	0,0892	<u>-0,0983</u>	1,1938	<u>-0,1169</u>	<u>-1,8659</u>	0,3143	<u>-0,5966</u>	<u>-0,5547</u>	0,1746
	Hill Model	0,1513	0,0849	0,1097	0,0288	0,2404	0,5275	0,5681	0,1591	1,2143	3,7022	1,7850	2,6363	1,8590	8,2185	29,5694	108,9642
	Kopelman Isotropik [1] ^c	0,3038	0,0567	0,0558	0,0266	0,0695	0,1104	0,1006	0,0517	1,0112	0,8717	0,6011	0,1309	0,1699	0,1600	0,1620	0,0862
	Franc'l Model	0,0160	0,0545	0,0598	0,0021	0,1610	0,4880	0,4524	0,0714	1,3710	1,8400	2,0020	2,7030	1,4938	8,8500	32,2920	113,5617
	Maxwell (Gonzo 2002)	0,0126	0,0450	0,0449	0,0014	0,1215	0,4084	0,3467	0,0484	1,3570	1,2432	1,9158	2,1887	1,0747	7,3444	26,8876	84,4639
	Chiew ve Glandt (1983)	0,2273	0,0488	0,0465	0,0257	0,0508	0,0677	0,0722	0,0407	0,5722	0,7199	0,4828	0,1434	0,1445	0,4026	1,2986	1,4786
	Bauer M. (Gonzo 2002)	0,0108	0,0414	0,0346	0,0002	0,0952	0,3811	0,2825	0,0161	1,3568	0,3680	1,9098	1,9678	0,7007	6,7978	24,9716	63,3304
	Verma ve ark. Model	0,1105	0,0523	0,0480	0,0256	0,0596	0,1180	0,0955	0,0423	1,0970	0,7163	0,8057	0,1983	0,1649	0,3459	0,5254	0,3294
	Meredith ve Tobias (*)	0,0138	0,0265	0,0946	0,1905	0,2346	0,2006	0,5391	1,2840	0,0133	42,9940	0,0976	1,6424	4,5587	4,0183	14,0927	203,0334

*: önerilen model ayımdır, fakat iletkenlik ve hacim parametreleri değiştirilerek hesaplanmaktadır.

** : kabul edilen ortalama değerlerdir.

a: k_s 'in yerine modelde k_d olarak verilmektedir.

b: kabul edilebilir ortalama sıcaklık

c: Gori ve ark.. (2001) (k_{en} ile) ve Babanov (1957) modelleri ile aynı değeri verir.

Not: j, w, F, L/d_d gibi ampirik parametreler sabit bir değer olarak 0,5 alındı.

3.2. Geliştirilen Matematik Modelin Değerlendirmesi

“Materyal ve Yöntem” bölümünde geliştirilen matematik model, literatürdeki açık/kapalı gözenekli ortamdaki ısı iletkenlik verilerine göre değerlendirildi. Bunun için literatürdeki farklı gözenekliliğe, farklı iletkenliğe, farklı akışkanlara, farklı sıcaklığa, farklı ölçme yöntemlerine sahip deneysel veriler kullanıldı. Bazı literatür çalışmalarında hem deneysel verilerinin yetersizliliği hem de modelin gerektirdiği eksik veriler nedeniyle geliştirilen matematik model uygulanamadı. Ardından, geliştirilen matematik modelin efektif ısı iletkenliği eşdeğer ısı iletkenlik parametreler açısından hesaplandı. Bunlar, durgun ortamdaki ısı iletkenlik, doğal taşınım ve difüzyonla oluşan ısı iletkenliktir. Bu uygulamanın önemli bir avantajı, modelin farklı ısı ortamlarının sıcaklığına, sıcaklık farkına, gözenekliliğe, gözenek boyutuna, kalınlığa, tortusiteye bağlı olmasıdır. Aslında model, birçok parametreyi içermesi açısından önemlidir. Geliştirilen matematik modelin birkaç çalışmaya uygulanması aşağıda ayrıntılı olarak verildi. Ayrıca Çizelge 3.7, 3.8 ve 3.9’da verilen farklı literatür verileri ile de bu modelin uygulama aralığı genişletildi ve incelendi.

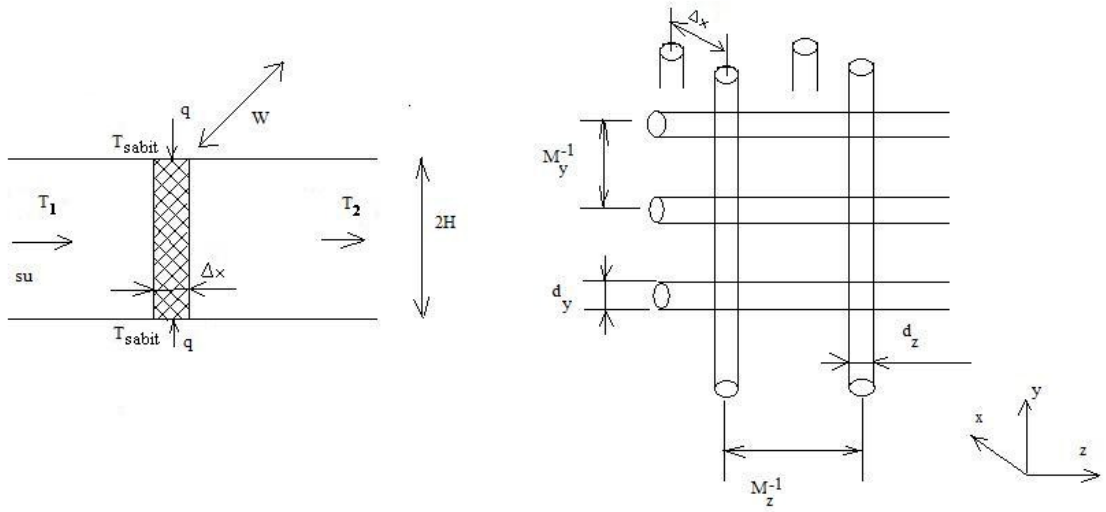
3.2.1. Cam yünün efektif ısı iletkenliğini tahmin etme

EP500 ısı iletkenlik deneylerinde kullanılan cam yünü malzemesinin efektif ısı iletkenliği öncelikli olarak değerlendirildi. Bu malzeme, açık gözenekli bir ortamdır ve 20 °C’deki efektif ısı iletkenlik değeri 0,03213 W/mK’dir. Bu malzemenin matematiksel efektif ısı iletkenliği, durgun ortamda, doğal taşınım, difüzyon ve ışınım ile oluşan eşdeğer ısı iletkenlikler olarak belirlendi. Herbir ısı iletkenlik modeli için içerisindeki havanın özellikleri gerekli olup sıcaklığa göre çizelgelerden alındı (Kılıç ve Yiğit 2008). “Doğal taşınım ile ısı iletkenlik”, Denklem (2.59)’daki gerekli kalınlık, lif çapı ve gözeneklilik tespit edilerek hesaplandı. Diğer özellikler ise (yoğunluk, özgül ısı), ortamın (hava) ortalama özellikleri alındı. Kumpas ve mikrometre kullanarak numune kalınlığı 0,044837 m ve lif çapı 1,5 µm ölçüldü. Camyünü numunesinin gözenekliliği 0,9609 olarak belirlendi. Doğal taşınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik, Denklem (2.59)’dan $3,675 \cdot 10^{-7}$ W/mK bulundu. “Difüzyon ile gerçekleşen ısı iletkenlik” ise, Denklem (2.71) ile hesaplandı. Burada numunenin alt ve üst yüzey

arasındaki sıcaklık farkı 10 °C ve bu sıcaklıklar 15 °C ve 25 °C'dir. Yoğunluk, özgül ısı değerleri ortalama sıcaklıktaki özellikler alındı. Difüzyon hareketi, gözeneklerdeki havanın kendi partikülleri arasında gerçekleştiği varsayıldı. Bu nedenle difüzyon katsayısı D_0 , Denklem (2.72)'e göre A ve B maddelerinin her ikisini de hava alınarak hesaplandı. Difüzyon katsayısı, $1,9 \cdot 10^{-5}$ m²/s olarak elde edildi. Difüzyon katsayısında, molar hacim 20,1 cm³/mol ve moleküler ağırlık 28,97 g/mol alındı. Bu veriler, Denklem (2.71)'de yerine konulduğunda difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik $7,247 \cdot 10^{-4}$ W/mK bulundu. "Işınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik", Denklem (2.81)'de verilen $(4\sigma D_{hd} T_{i\gamma}^3) / ((2/\epsilon) - 1)$ ifade ile hesaplandı. Burada hidrolik çap, Denklem (2.40) ile bulunabilir. Camın emisivite değeri ise 0,92-0,97 aralığında olup 0,92 alındı (<http://www.infrared-thermography.com>). Işınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik, $1,537 \cdot 10^{-4}$ W/mK elde edildi. Durgun ortamda gerçekleşen ısı iletkenlik ise, cam lifin ısı iletkenliği 1 W/mK ve akışkanın 0,0257 W/mK olup efektif ısı iletkenlik modellerinden Geometrik model ile 0,02965 W/mK belirlendi. Bu hesaplanan ısı iletkenliklerin toplamından cam yünün efektif ısı iletkenlik değeri 0,03053 W/mK elde edildi. Ölçüm sonuçlarından yaklaşık olarak 20 °C sıcaklıkta 0,03213 W/mK olması beklenen efektif ısı iletkenlik değeri % 4,98'lik farkla ulaşıldı. Bu değer, %5 hata oranı aralığında olup, efektif ısı iletkenlikte hangi ısı iletkenliğin daha etkin olduğunu da belirtmektedir.

3.2.2. İletken dokuma yapılı matrisin efektif ısı iletkenliğini tahmin etme

İkinci olarak J.-W. Park (2001) tarafından iki boyutlu düzlem dokunmuş iletken ağların birbirine bağlı laminate'lerinden oluşan basit bir dokuma meshin efektif ısı iletkenliği ele alındı. Bu gözenekli matris, geniş bir gözeneklilik aralığına ve yüksek anizotropik ısı iletkenlik vektörüne sahip olarak üretilen bir numunedir. Böyle bir mesh'in boyutları, Şekil.3.1'deki gibi çalışmada verilmiştir.



Şekil.3.1. İki boyutlu düzlem dokunmuş iletken ağlardan oluşan matris numune

Burada $M_y = M_z = M_s$ ve $d_y = d_z = d$ 'dir. Numunenin kalınlığı $\Delta x = c_d \cdot n_d (d_y + d_z)$ olarak verilmektedir. c_d , sıkıştırma faktörü olup burada 0,912'dir. n_d ise laminate'deki kafes tabakalarının sayısıdır. Çizelge.3.3'de verilen numunenin iletken ve akışkan bileşen özelliklerine göre toplam efektif ısı iletkenlik $k_e = 57,6$ W/mK verilmektedir. Isıl performansını belirlerken $\Delta T = 10$ °C için kullanılan mesh iletken malzemesinin ve akışkanın (su) özellikleri, Çizelge.3.3'de verildi.

Çizelge.3.3. Matris numunede bulunan iletken malzemenin ve suyun özellikleri

Su (Sürekli Ortam)				İletken Malzeme	
$T_{s\bar{g}}=310$ K		$T_{sk}=320$ K			
ρ_s	993 kg/m ³	ρ_s	989,1 kg/m ³	$\rho_{bakır}$	8933 kg/m ³
μ_s	$6,95 \cdot 10^{-4}$ Pas	μ_s	$5,84 \cdot 10^{-4}$ Pas	$k_{bakır}$	400 W/mK
k_s	0,628 W/mK	k_s	0,641 W/mK	ρ_{lehim}	7317 kg/m ³
Pr	4,6	Pr	3,8	k_{lehim}	55-60 W/mK
C_p	4178 J/kgK	C_p	4174 J/kgK		
γ_s	$0,7 \cdot 10^{-6}$ m ² /s	γ_s	$0,583 \cdot 10^{-6}$ m ² /s		

Bu matris numunenin efektif ısı iletkenliği tespitinde öncelikle Ek-1'in Çizelge.4.3'deki Xu ve Wirtz Modelinden gözeneklilik 0,687 olarak hesaplandı. Çizelge.3.4'de verilen matris boyutları Denklem (2.59) kullanılarak, *Taşınım*la gerçekleşen ısı iletkenlik elde edildi.

$$k_{e\delta,t} = \frac{g c_p \Delta x d_d^2 (\rho_{s\delta} - \rho_{sk})}{\gamma \left[51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right]} \quad (3.1)$$

$$k_{e\delta,t} = \frac{9,81.4176.(0,0076835).(0,0004318)^2(993 - 989,1)}{0,637.10^{-6} \left[51,877 \left(\frac{1 - 0,687}{0,687} \right)^2 + 3 \right]} \quad (3.2)$$

$k_{e\delta,t}=26,097$ W/mK taşınımıyla gerçekleşen ısı iletkenliktir.

Çizelge.3.4. Matris numunenin boyutları

M_s	$20 \text{ in}^{-1}=0,787 \text{ mm}^{-1}$
W	$3,938 \text{ in}$
H	$0,25 \text{ in}$
Δx	$0,3025 \text{ in}=0,0076835 \text{ m}$
D_{hd}	$0,036 \text{ in}=0,0009144 \text{ m}$
n_d	10
d_d	$0,017 \text{ in}=0,0004318 \text{ m}$

Ardından, Denklem (2.71)'e göre

$$k_{e\delta,d} = \frac{D_o c_p \rho_o}{T_o} \frac{\Delta T}{(T/T_o)^{0,25}} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (3.3)$$

difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik belirlenir. Burada Basmadjian'a (2003) göre su içi difüzyon bağıntısı,

$$D_{su}=7,4 \cdot 10^{-8} (\nu M_A)^{1/2} \frac{T_o(K)}{\mu_{A(\text{centipoises})} V_A^{0,6}} \quad (3.4)$$

ele alındı ve difüzyon katsayısı belirlendi. Burada V_A , aynı çalışmada sudaki atomik ve moleküler hacim katkısı olarak olup $V_A=2xH+O=2x3,7+7,4=14,8 \text{ cm}^3/\text{mol}$ bulunur. Burada ν , suyun ampirik katsayı olup $\nu=2,6$ olarak verilmektedir. $M_A=18$ suyun moleküler ağırlığıdır. μ_A , suyun viskozitesi olup $0,894$ centipoises değeri, verilmektedir. Buradan bu veriler yerine konulursa,

$$D_{su}=7,4.10^{-8} \cdot (2,6.18)^{1/2} \cdot \frac{298,15}{0,894 \cdot (14,8)^{0,6}} = 3,352.10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (3.5)$$

$$k_{eş,d} = \frac{3,352.10^{-9} (4176) 997,37}{298,15} \frac{10}{(315/298,15)^{0,25}} \frac{0,912}{1} \quad (3.6)$$

difüzyonla ısı iletkenlik, 0,000415 W/mK elde edildi. *Işınım*la gerçekleşen ısı iletkenlik ise, Denklem (2.81)'de verilen $(4\sigma D_{hd} T_{iş}^3) / ((2/\epsilon) - 1)$ bağıntıdan hesaplandı. Burada emisivite ϵ , bakır için 0,008-0,07 aralığında olup 0,008 alındı. Buradan, $2,603.10^{-5}$ W/mK olarak belirlendi. *Durgun ortamda iletimle gerçekleşen ısı iletkenlik* ise geometrik modele göre,

$$k_{il} = k_{bakır}^{V_d} \cdot k_{su}^{\epsilon} = 400^{(1-0,687)} 0,6345^{0,687} = 4,772 \text{ W/mK} \quad (3.7)$$

$$k_e = k_{eş,t} + k_{eş,d} + k_{eş,iş} + k_{il} = 26,097 + 0,000415 + 2,603.10^{-5} + 4,772 \quad (3.8)$$

30,869 W/mK olarak elde edildi. k_d/k_s oranı 692,04 olup iletken malzemede efektif ısı iletkenlik tahmini %46 civarında gözükmektedir. Verilen efektif ısı iletkenlik 57,6 W/mK olup elde edilen sonuçla farklılık olduğu görüldü. Buradaki farklılık, durgun ortamdaki ısı iletkenlik değerine iletkenlik oranının yansımamasından kaynaklanabilir. Bu, iletkenlik oranının (k_d/k_s) yüksek olması olarak açıklanabilir.

3.2.3. Heterojen nonwoven malzemelerin efektif ısı iletkenliğini tahmin etme

Mohammadi (1998) tarafından bildirilen heterojen dokumasız (nonwoven) malzemelerin ısı yalıtım özellikleri ile matematik modelin değerlendirmesi yapıldı. Bu araştırma, dokumasız (nonwoven) kumaş yapılarını içermektedir. Kumaş yapısı, farklı needle ile yapılandırılmış G-C-G cam/seramik tabakaların kombinasyonlarından oluşmaktadır. Burada G ve C, cam ve seramiği ifade etmektedir. Numuneler, 33x26 cm

boyutlarındaki numunelerden 20,32 cm boyutlarında kesilerek elde edilmektedir. Bu numuneler arasından 3 barbs olan numuneye, geliştirilen matematik model uygulandı. Bu numunenin boyutları ve özellikleri, Çizelge 3.5 ve 3.6'da verildi. Muhafazalı sıcak plaka yönteminde sıcaklık 709,65 K ve soğuk yüzey 429,65 K olup, buna bağlı olarak havanın özellikleri Çizelge.3.6'da verildi.

Çizelge.3.5. Cam seramik numunesinin boyutları ve özellikleri

Δx	1,69175 cm
m	41,975 g
ε	0,97070567399
D_{hd}	186,799 μm

Çizelge.3.6. Cam seramik numunede bulunan malzemenin ve havanın özellikleri

Cam		Seramik	
ρ	2,54 g/cm ³	ρ	2,63 g/cm ³
d_{lif}	11-12 μm	d_{lif}	6 μm
k	0,864 W/mK (6 BTU-in/hr/sqft/F)	k	0,0792 W/mK (0,55 BTU-in/hr/sqft/F)
Hava (Sürekli Ortam)			
$T_{s\check{s}}=429,65 \text{ K}$		$T_{sk}=709,65 \text{ K}$	
ρ_s	0,81284 kg/m ³	ρ_s	0,49086 kg/m ³
μ_s	242,46.10 ⁻⁷ Ns/m ²	μ_s	341,96.10 ⁻⁷ Ns/m ²
k_s	0,0359 W/mK	k_s	0,0529 W/mK
α_s	43,64.10 ⁻⁶ m ² /s	α_s	100,2.10 ⁻⁶ m ² /s
C_p	1,0182 kJ/kgK	C_p	1,0774 kJ/kgK
γ_s	29,998.10 ⁻⁶ m ² /s	γ_s	69,754.10 ⁻⁶ m ² /s

G-C-G cam/seramik tabakalı numunenin ölçümünde, ısıtıcı plakaya verilen güç 26,625 W ve yüzey alanı 0,00835 m² olarak verilmektedir. Bu ölçümden elde edilen efektif ısı iletkenlik değeri ise, 0,09633 W/mK'dir. Çizelge.3.6'dan ortalama lif çapı, boylamsal ortalamaya göre 6,967 μm ve ortalama lif yoğunluğu 2,615 g/cm³'dir. Geliştirilen matematik model ile öncelikle *doğal taşınım*la gerçekleşen ısı iletkenlik, gerekli özellikler yerine koyularak aşağıdaki gibi elde edildi.

$$k_{e\check{s},t} = \frac{g c_p \Delta x d_d^2 (\rho_{s\check{s}} - \rho_{sk})}{\gamma \left[51,877 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 3 \right]} \quad (3.9)$$

$$k_{e\text{ş,t}} = \frac{9,81 \cdot 1047,8 \cdot (0,0169175) \cdot (6,697 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (0,81284 - 0,49086)}{49,876 \cdot 10^{-6} \left[51,877 \left(\frac{1 - 0,9707}{0,9707} \right)^2 + 3 \right]} \quad (3.10)$$

Hava özellikleri, ortalama sıcaklık için belirlenen değerler alınarak taşınım ile ısı iletkenlik $1,6522 \cdot 10^{-5}$ W/mK olarak bulundu. *Difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenliği* Denklem (2.71) ifadesinden yazılırsa,

$$k_{e\text{ş,d}} = \frac{D_o \cdot (1047,8) \cdot 1,17}{298,15} \frac{(709,65 - 429,65)}{(569,65/298,15)^{0,25}} \frac{0,9707}{1} \quad (3.11)$$

elde edilir. Burada hava difüzyon olayı ise denklem (2.72)'e göre,

$$D_o = \frac{(10^{-3} T_o^{1,75} (2/M_B)^{0,5})}{(2 V_A^{1/3})^2} = \frac{(10^{-3} \cdot 298,15^{1,75} \cdot (2/28,97)^{0,5})}{(2 \cdot 20,1^{1/3})^2} \quad (3.12)$$

$1,9 \cdot 10^{-5}$ m²/s bulunur. Numunenin hidrolik çapı, Denklem (2.40)'dan $6,967 \cdot 10^{-6}$ m çapına göre aşağıdaki gibi $3,62635 \cdot 10^{-4}$ m bulundu. Ancak, verilen hidrolik çap değeri kullanıldı. Buradan *difüzyonla gerçekleşen ısı iletkenlik*, $0,01806$ W/mK tespit edilir. Ayrıca *ışınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik*, Denklem (2.81)'de verilen $(4\sigma D_{hd} T^3) / ((2/\epsilon) - 1)$ bağıntıdan hesaplandı. Burada emisivite ϵ , cam ve seramik için $0,90 - 0,95$ aralığında olup $0,92$ alındı. Buradan, $7,0856 \cdot 10^{-3}$ W/mK olarak belirlendi. *Durgun ortamda gerçekleşen ısı iletkenlik* ise, geometrik modele göre yazılabilir. Buradan,

$$k_{il} = k_{cam}^{V_d} \cdot k_h^\epsilon = 0,864^{(1-0,9707)} \cdot 0,0444^{0,9707} \quad (3.13)$$

$0,04843$ W/mK bulundu. Hava ısı iletkenliği, ortalama sıcaklık için belirlenen değerdir. G-C-G cam/seramik tabakalı numunenin *toplam efektif ısı iletkenliği*,

$$k_e = k_{e\text{ş,t}} + k_{e\text{ş,d}} + k_{e\text{ş,iş}} + k_{il} = 1,6522 \cdot 10^{-5} + 0,01806 + 7,0856 \cdot 10^{-3} + 0,04843 \quad (3.14)$$

0,0736 W/mK olarak elde edilir. Bu değer ile, ölçülen efektif ısı iletkenlik değeri 0,09633 W/mK arasında fark vardır. Bu farklılık, iletkenlik oranının (k_d/k_s) yüksek olması olabilir.

Geliştirilen model, literatürde yer alan akışkanın hem hava hem de su olduğu durumda efektif ısı iletkenlik ölçüm değerleriyle karşılaştırıldı. Modelden hesaplanan ısı iletkenlik değeri, ölçümlerden elde edilen efektif ısı iletkenlik değeri ile uyumlu olabilir. Ancak, iletkenlik (k_d/k_s oranı) ve kabullerin iyi tespit edilmesine bağlıdır. Bu farklılığın değerlendirmesi, farklı literatür çalışmalarıyla Çizelge 3.7, 3.8 ve 3.9'da daha geniş kapsamlı gözlemlendi. Çizelge 3.7, literatürdeki bazı malzemelere matematik modelin uygulamasıdır. Çizelge 3.8 ve 3.9, literatürdeki düşük gözenekli, k_d/k_s oranı yüksek ve kalınlığı (ve/veya sıcaklığı) belirsiz malzemelere matematik modelin uygulamasıdır. Burada geliştirilen matematik model, ısı iletkenlikleri, gözeneklilikleri ve k_d/k_s oranı farklı malzemelere uygulandı. Ayrıca, durgun ortamlardaki iletimle ısı iletkenliğini gösteren bağıntının iyi seçilmesi model ile de orantılıdır. Burada, geometrik model değerleri kabul edilerek bulundu. Bunun yanı sıra, doğal taşınım ve difüzyonla ısı iletkenlik katsayısı Denklem (2.59) ve (2.72)'e göre elde edildi. Ayrıca ışınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik, (Denklem 2.81)'de verilen bağıntıdan hesaplandı.

Model için gerekli ancak mevcut literatür çalışmasında yer almayan yada eksik/yetersiz kalan veriler için, bir takım varsayımlar yapıldı. Bu varsayımlardan biri, gözenekli ortamın sıcaklık farkı olup (ortalama sıcaklıkları belli olmasına karşın) muhafazasız ölçüm yöntemine göre 10 K kabul edildi. Diğer bir varsayım ise, numune ortalama sıcaklığı olup sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarının ortalamaları olarak alındı. Ayrıca, iletkenliği bilinmeyen katı bileşenlerin iletkenlikleri çalışma içerisindeki katı bileşene göre literatürde tarama yapılarak belirlendi. Argon gibi bazı akışkan özellikleri literatürde yetersiz olduğu için bunun yerine hava özellikleri tercih edildi. Işınım ile gerçekleşen ısı iletkenlik hesaplanırken, gerekli emisivite değerleri literatürde tarama yapılarak belirlendi. Softwood bark, softwork char, bronz parçacıklar, bakır lehim laminete ve bakırlı numunelerinin emisivite değerleri, sırasıyla 0,8, 0,95, 0,55 (veya 0,10) ve 0,09 alındı (<http://www.infrared-thermography.com>).

Çizelge.3.7. Literatürdeki bazı çalışmalara matematik modelin uygulanması

Modeller (Denklem No)		Kaynaklar	Patirop (2004)	Gupta ve ark. (2003)	Gupta ve ark. (2003)	Spinnler ve ark. (2004)	Ye ve ark. (2006)	Matiašovský ve Koronthályová (2000)
Numuneler			Kumaş (Kevlar/PBI)	Softwood bark	Softwood char	SiO ₂	NZ yün (wool)	Taşyünü
Akışkan			Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava
Sıcaklık farkı, ΔT			316-326	303-315	303-315	693-703	278 - 293 ^b	273-313
Sıcaklık, T (K)			321	309	309	698	286,3	293
Ortalama lif çapı, d_d (μm)			16	340	430	6	35-40	5
Gözeneklilik ε			0,666	0,6237	0,58	0,949	0,989	0,996
Kalınlık, Δx (mm)			0,56	25	25	30	70	100
Katı bileşen iletkenlik k_d			0,179	0,194	0,0946	1,4	0,194	1,2 ^b
Akışkan bileşen iletkenlik k_s			0,0278	0,0269	0,0269	0,0522	0,0251	0,0025712
Verilen efektif ısı iletkenlik k_e			0,056	0,0607	0,047	0,075	0,04622	0,058
(2.40)	Hidrolik çap (μm)		25,0575	442,5989	466,3769	87,6874	2648,0413	977,8207
(2.59)	Taşınımla ısı iletkenlik (W/mK)		0,0000002	0,0034280	0,0039728	0,0000004	0,0013802	0,0000881
(2.71)	Difüzyonla ısı iletkenlik (W/mK)		0,0004907	0,0005563	0,0005173	0,0006142	0,0011230	0,0029989
(2.72)	Difüzyon katsayısı (m^2/s)		0,0000190	0,0000190	0,0000190	0,0000190	0,0000190	0,0000190
(2.81)	Işınım ısı iletkenlik (W/mK)		0,0001601	0,0019744	0,0028235	0,0057612	0,0120059	0,0047519
(2.42)	Durgun iletimle ısı iletkenlik (W/mK) ^a		0,0518	0,0566	0,0456	0,0617	0,0257	0,0261
(2.1)	Seri Model		0,0387	0,0398	0,0384	0,0549	0,0254	0,0258
(2.11)	Maxwell Model		0,0507	0,0543	0,0460	0,0597	0,0257	0,0259
(2.34)	Russell Model		0,0558	0,0600	0,0479	0,0735	0,0266	0,0280
(2.28)	Efektif Ortam Teori Model		0,0574	0,0646	0,0485	0,0604	0,0257	0,0260
(2.41)	Toplam efektif ısı iletkenlik (W/mK)		0,0524	0,0625	0,0529	0,0681	0,0402	0,0339
	Fark %		-6,3680	+2,9933	+12,5900	-9,1920	-12,9828	-41,5604

a: Geometrik model verileridir. b: Kabul edilen değerlerdir.

Çizelge.3.8. Literatürdeki düşük gözenekli veya k_d/k_s oranı yüksek malzemelere matematik modelin uygulaması

Modeller (Denklemler No)	Kaynaklar	Jang ve Matsubara (2005)	Fu ve Chung (1997)	Jiang ve ark.(2004)	Barea ve ark. (2005)	Xu (2001)	Soma Shekar (2004)	Ochs ve ark. (2008)
Numuneler		ZrO ₂ -4mol%Y ₂ O ₃	Çimento pasta +silicafume	Bronz parçacıklar	Mullite (çamur gibi)	Bakır lehim laminete	Bakırlı numune	EGG cam lifi
Akışkan		Hava	Hava	Hava	Argon ^d	Hava	Hava	Hava
Sıcaklık farkı, ΔT		290 - 300 ^b	288 - 298 ^b	289 - 294	468 - 478 ^b	300-335	300-500	328-338
Sıcaklık, T (K)		295	293	291,5 ^b	473	317,5	400	333
Ortalama lif çapı, d _d (μm)		1,2874 ^c	10	500-710	38,766 ^c	480	274,32	2000-4000(tip I)
Gözeneklilik ε		0,09	0,0207	0,402	0,47	0,689	0,627	0,61
Kalınlık, Δx (mm)		0,3	2	11,73	1,5^b	8	4	70
Katı bileşen iletkenlik k _d		2,2 ^b	1,19	54	5,1	365,15	385,15	1,16
Akışkan bileşen iletkenlik k _s		0,0259	0,02575	0,0256	0,0385	0,0275	0,0335	0,0287
Verilen efektif ısı iletkenlik k_e		1,9	0,32	0,798	1,4	49,7	61,2	0,07
(2.40) Hidrolik çap (μm)		0,1000	0,166013908	319,4259	27,0000	835,1990	362,1647	3685,3298
(2.59) Taşınım ile ısı iletkenlik (W/mK)		0,0000000000024	0,000000000045	0,00048899	0,00000015	0,00933034	0,00253481	0,42756426
(2.71) Difüzyon ile ısı iletkenlik (W/mK)		0,00006764	0,00001558	0,00015149	0,00032017	0,00178116	0,00881089	0,00044567
(2.72) Difüzyon katsayısı (m ² /s)		0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900
(2.81) Işınım ile ısı iletkenlik (W/mK)		0,00000050	0,00000081	0,00068065	0,00055202	0,00028568	0,00024771	0,02629155
(2.42) Durgun ilet. ısı iletkenlik (W/mK) ^a		1,4746	1,0991	2,4871	0,4249	0,5272	1,0965	0,1214
(2.1) Seri Model		0,2564	0,6136	0,0635	0,0813	0,0400	0,0535	0,0463
(2.11) Maxwell Model		0,5868	0,8940	0,1391	0,1628	0,0648	0,0934	0,0776
(2.34) Russell Model		0,5996	0,8955	0,1616	0,1926	0,0853	0,1197	0,0948
(2.28) Efektif Ortam Teori Model		1,9085	1,1542	21,4727	1,5748	0,3984	23,2095	0,1956
(2.41) Topl. efektif ısı iletkenlik (W/mK)		1,4747	1,0992	2,4884	0,4257	0,5386	1,1081	0,5758
Fark %		-22,3867	+243,4873	+211,8297	-69,5912	-98,9163	-98,1894	+722,5018

a: Geometrik model verileridir.

b: Kabul edilen değerlerdir.

c: Denklem (2.40)'a göre elde edildi.

d: Argon yerine hava özellikleri kullanıldı.

Çizelge.3.9. Literatürde kalınlığı ve/veya sıcaklığı belirsiz malzemelere matematik modelin uygulaması

Modeller (Denklemler No)		Kaynaklar	Kohout ve ark. (2004)	Vargas ve McCarthy (2002)	Carson ve ark. (2004)	Gonzo (2002)	Liang ve Qu (1999)	Seo ve ark. (2005)	Xue ve Xu (2005)	Nait-Ali ve ark. (2007)	Gori ve ark. (2001)
Numuneler		Cam küresel parçacıklı	SS-304 Numune	EPS boncuk/guar.	MgO	Gaz-katı kompozit	C/P lifli laminate	AL ₂ O ₃	Alümina Polikristal	Cam Boncuklar	
Akışkan		Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Su	Hava	Hava	
Sıcaklık farkı, ΔT		293-303 ^b	293-303 ^b	274-293	408-418 ^b	373-1773	288-298 ^b	288-298 ^b	295-305 ^b	295-305 ^b	
Sıcaklık, T (K)		298	298	283,5	413	1073	293 ^b	293 ^b	300 ^b	300 ^b	
Ortalama lif çapı, d _d (μm)		200	6000	25000	200	359,1188 ^c	13	0,5	80	1000	
Gözeneklilik ε		0,39	0,41	0,543	0,42	0,78	0,65	0,96	0,49	0,36	
Kalınlık, Δx (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Katı bileşen iletkenlik k _d		0,8	15	0,035 / 0,6	18,58	6,79	0,46	46	15	1,05	
Akışkan bileşen iletkenlik k _s		0,026	0,02614	0,025	0,0345	0,0717	0,02575	0,604	0,026	0,026	
Verilen efektif ısı iletkenlik k_e		0,14	0,67	0,2262	0,32536	1,68	0,71	1,1	3	0,153	
(2.40)	Hidrolik çap (μm)	100,4280	3274,7110	23329,9345	113,7473	1000,0000	18,9618	9,4248	60,3679	441,7865	
(2.59)	Taşınım ile ısı iletkenlik (W/mK)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
(2.71)	Difüzyon ile ısı iletkenlik (W/mK)	0,00029238	0,00030738	0,00078283	0,00029325	0,06839739	0,00048929	0,00000013	0,00036677	0,00026946	
(2.72)	Difüzyon katsayısı (m ² /s)	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	0,00001900	3,352.10 ⁻⁹	0,00001900	0,00001900	
(2.81)	Işınım ile ısı iletkenlik (W/mK)	0,00051346	0,01674283	0,10270222	0,00154810	0,23867465	0,00009215	0,00004580	0,00031490	0,00230453	
(2.42)	Durgun il. ısı iletkenlik (W/mK) ^a	0,2104	1,1075	0,1066	1,3234	0,1952	0,0705	0,7183	0,6680	0,2781	
(2.1)	Seri Model	0,0635	0,0634	0,0443	0,0818	0,0917	0,0383	0,6288	0,0534	0,0697	
(2.11)	Maxwell Model	0,1231	0,1371	0,0757	0,1753	0,1301	0,0582	0,6765	0,1071	0,1414	
(2.34)	Russell Model	0,1372	0,1594	0,0883	0,2048	0,1735	0,0693	0,8717	0,1289	0,1569	
(2.28)	Efektif Ortam Teori Model	0,3629	5,8116	0,1646	6,9253	0,1882	0,0896	0,6825	4,0299	0,5110	
(2.41)	Toplam efektif ısı iletkenlik (W/mK)	0,2112	1,1245	0,2101	1,3252	0,5023	0,0710	0,7183	0,6686	0,2806	
	Fark %	+50,8489	+67,8392	-7,1035	+307,3049	-70,1018	-89,9937	-34,6958	-77,7117	+83,4196	

a: Geometrik model verileridir. b: Kabul edilen değerlerdir.

c: Denklem (2.40)'a göre elde edildi.

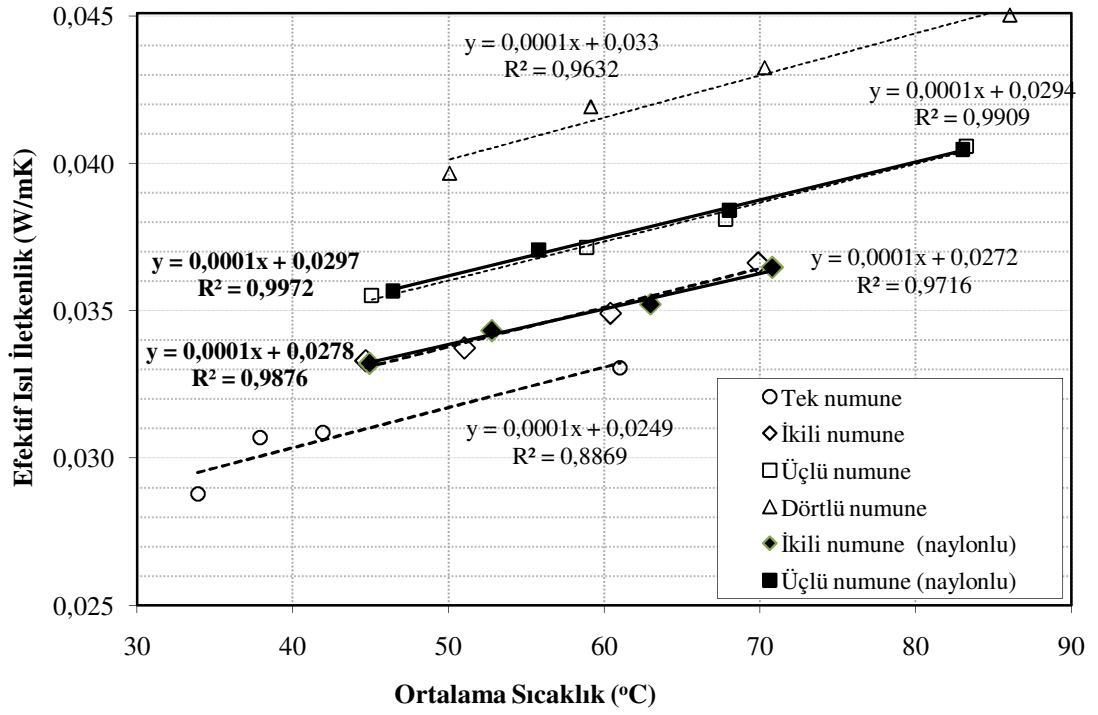
Yapılan hesaplamalar ve sonuçları, geliştirilen matematik modelin literatürdeki çalışmalara uygulanmasıyla oluşmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, durgun ortamın iletimle ısı iletkenliğinin farklılığı efektif ısı iletkenlik sonuçlarını etkilemektedir. Burada durgun ortamın iletimle ısı iletkenliği geometrik model verileri ile belirlendi. Bu hesaplamalar ve değerlendirmeler, matematik model için olumludur. Ayrıca hesaplamalar, farklı akışkanları, farklı gözenekli ortamları, farklı kalınlıkları, farklı iletkenlikli malzemeleri içeren deneysel verileri içermektedir. Bazı malzemelerde (Çizelge 3.8 ve 3.9) matematik modelden efektif ısı iletkenlik verilerinde farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılığın nedeni, en büyük paya sahip durgun ortamdaki iletimle ısı iletkenliğidir. Bu ise, seri veya paralel model aralığında değişebilmektedir. Bunun yanında, numunenin iletkenliği/yalıtkanlığı, gözeneklilik kadar önemli görülebilir.

Isı iletkenliği oluşturan temel parametreler incelendiğinde, durgun ortamdaki ısı iletkenlik, taşınım, difüzyon ve ışınım ile oluşan eşdeğer ısı iletkenliktir. Difüzyon ve taşınım ile oluşan ısı iletkenlik, akışkana ve özelliklerine bağlı parametrelerdir. Bunun dışında, gözenekliliğe ve numunenin kalınlığına doğrudan önemli derecede bağlıdır. Bu modelde kalınlık etken, önemli parametre iken gözenek hidrolik çapıda bu etki kadar önemlidir. 0,46 hidrolik çap katsayısı kullanıldığında, sonucu arttıran bir etkiye sahiptir. Bu yüzden doğal taşınım ile ısı iletkenlik, toplam ısı iletkenliğe göre daha az bir etkide elde edildi. Sonuçlardan, doğal taşınım ile ısı iletkenlik ihmal edilebilir düzeylerde gözükmemektedir. Ancak iletkenliğin varlığı, doğal taşınım ile ısı iletkenliği önemli hale getirmektedir. Bu yüzden geliştirilen matematik model, ısı iletkenliği düşük yani yalıtım malzemesi özelliğinde numunelerde anlamlı sonuçlar verebilmektedir. Sonuçların doğruluğu ise, durgun ortamın ısı iletkenliğinin doğru tanımı ile gerçekleştirilebilir. Bu, düşük gözeneklilikteki malzemelerden görülebilir. Ayrıca, sıcaklık farkı ve sıcaklığın varlığı gözenekli ortam içerisinde önemli etkide bulunmaktadır. Difüzyon ve ışınım ile olan ısı iletkenlik, bunların etkisi altındadır. Difüzyon katsayısı ise, bütün malzemelerde standart sıcaklıkta hava için aynı değere sahip olduğu görülmektedir. Bu değer, sıcaklık gibi diğer özellikler ile anlamlıdır.

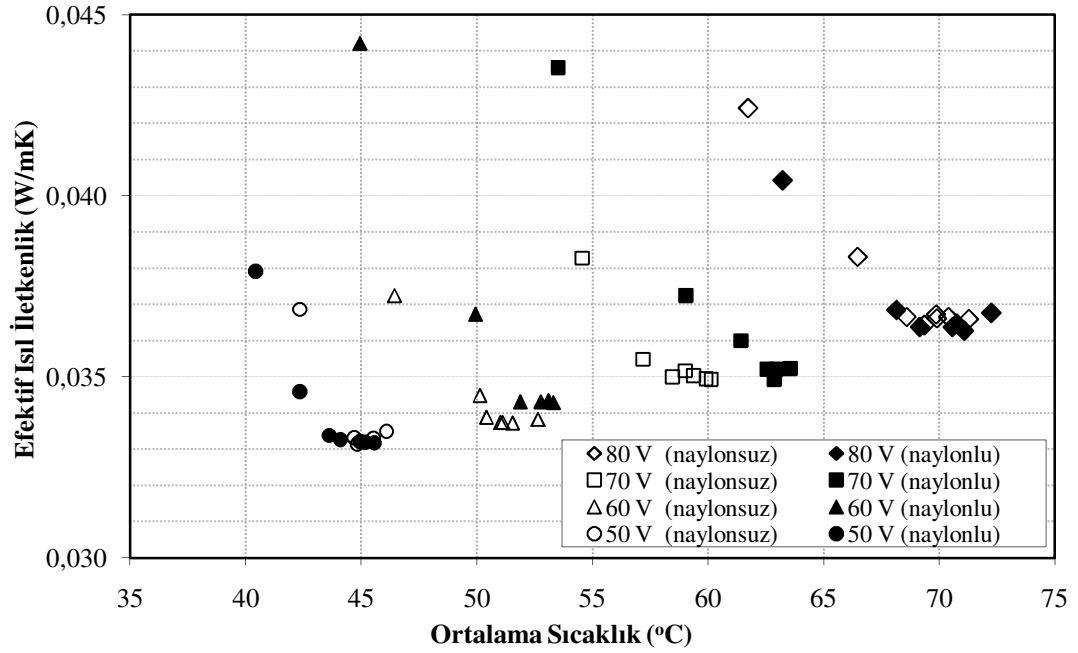
3.3. Mevcut Sıcak Plaka Tesisatı

Mevcut sıcak plaka deney tesisatında doğal taşınımın etkisi, ısı iletkenlik ölçümlerine göre değerlendirildi. Ölçümler, çift numune yöntemiyle sıcak plaka ve iki soğutucu plaka aralarına yerleştirilerek gerçekleştirildi. Bu amaçla gerekli homojenlikte dört farklı kalınlıkta numune seçilerek farklı güçlerde ısı iletim katsayıları hesaplandı. Ölçülen numunelerin ısı iletkenliği kontrol edilerek test edildi. Sonuçlar, farklı ortalama sıcaklıklar, alt/üst numunelerdeki sıcaklık farkları, farklı kalınlıklar açısından incelendi ve değerlendirildi. Ayrıca, numunelerin yoğunlukları hesaplanarak yoğunluğun etkili olup olmadığı belirlendi. Sıcaklık farkından dolayı oluşan doğal taşınımın etkisini gözlemlemek amacıyla araya naylon yerleştirilmiş halde ve naylonsuz halde ölçümler yapıldı. Bu sonuçlar, değerlendirildi. Bunun yanı sıra, soğutucu ve ısıtıcı temas yüzeyleri ile oluşan numune sıcaklık farkıyla doğal taşınımın varlığı test edildi.

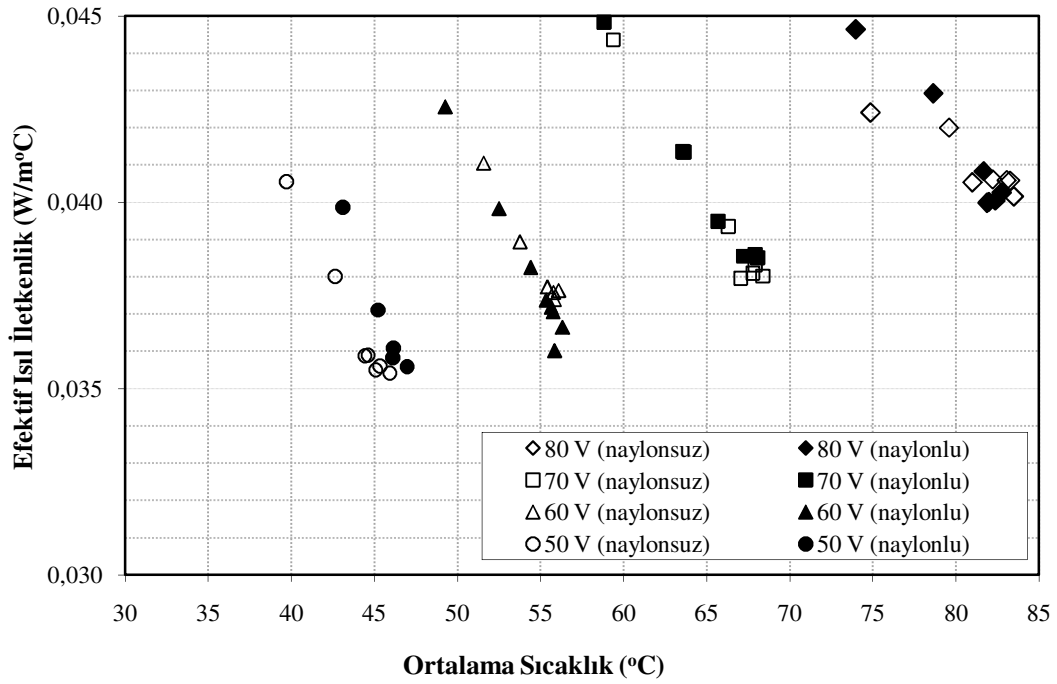
45x45 cm boyutlarında cam yünü malzemeleri tekli, ikili, üçlü ve dördü tabakalı numuneler halinde ölçüldü. Bu numunelerin kalınlıkları ise, sırasıyla 15,99 mm, 31,21 mm, 44,83 mm, 59,90 mm'dir. Ölçümlerden, ortalama sıcaklıkla ısı iletkenliğinin değişimi Şekil.3.2, 3.3 ve 3.4'deki grafiklerden görülmektedir. Sıcaklıkla net olarak ısı iletkenliğinin değiştiği görülmektedir. Bu sonuç, literatürdeki birçok çalışmadan çıkarılan sonuçlarla uyumludur. Şekil.3.2'de tekli, ikili, üçlü ve dördü numunelerden elde edilen ortalama sıcaklıkla ısı iletkenliğinin değişimi verilmektedir. Bu grafikten, aynı ortalama sıcaklıkta kalınlıkla efektif ısı iletkenliğinin net olarak değiştiği görülebilmektedir. İkili ve üçlü numunenin naylonlu ve naylonsuz halde yapılan ölçümleri, Şekil.3.3 ve 3.4'de verilmektedir. Bu şekillerde, farklı güçlerde saatte bir alınan sıcaklık ve efektif ısı iletkenlik verileri mevcuttur. Herbiri, tek bir ölçümü ifade etmektedir. Şekil.3.3 ve 3.4'den, hem ikili hem üçlü numunede araya konulan naylonun aynı sıcaklıkta ısı iletkenliği değiştirmediği görülmektedir. Araya koyulan naylonun numunedeki doğal taşınımın varlığını tespit etmek için yeterli olmadığı görüldü.



Şekil.3.2. Farklı kalınlığa sahip camyünü numuneler için, ortalama sıcaklıkla efektif ısı iletkenliğinin değişimi

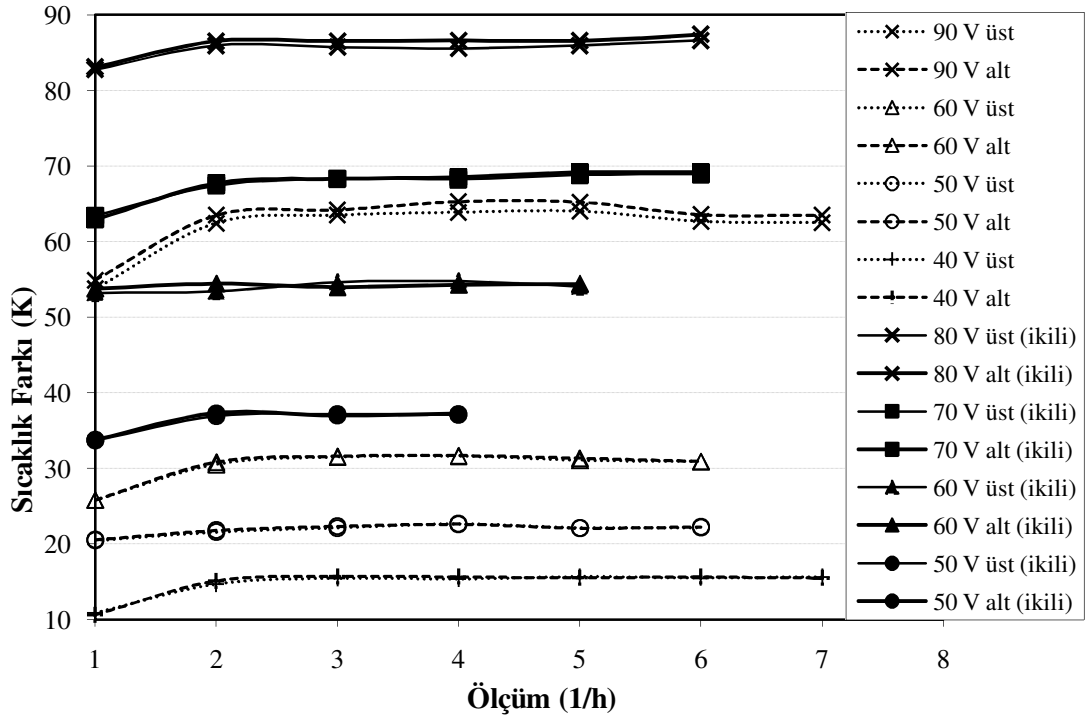


Şekil.3.3. Nylon takviyeli ve takviyesiz "ikili camyünü numunede" efektif ısı iletkenliğinin elde edilmesi

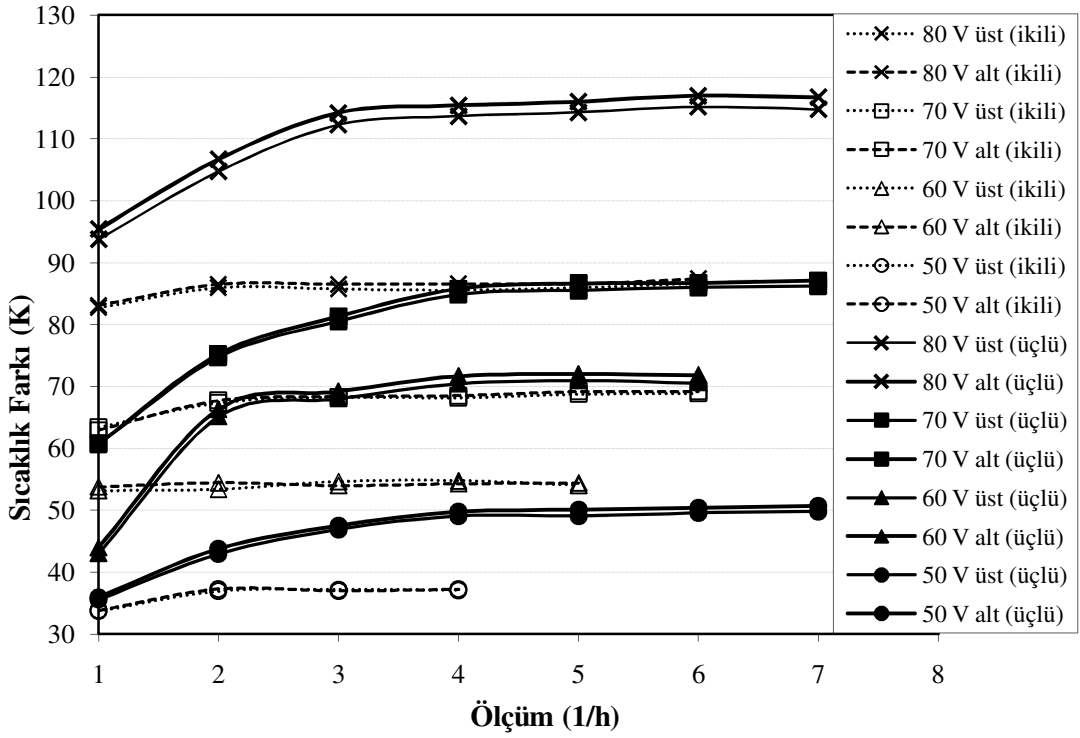


Şekil.3.4. Naylon takviyeli ve takviyesiz “üçlü camyünü numune” efektif ısı iletkenliğinin elde edilmesi

Ölçüm tesisatı, çift numuneli ölçüm yapmaktadır. Burada, üst numunenin alt tarafı sıcak üst tarafı soğuk iken alt numunenin üst tarafı sıcak alt tarafı soğuktur. Bu sıcak ve soğuk farkından dolayı üst numunede doğal taşımının varlığı tekli, ikili, üçlü ve dörtlü camyünü numunelerin herbiri için tespit edilebilir. Bu, Şekil. 3.5, 3.6 ve 3.7’de efektif ısı iletkenlik ölçümlerinden görülebilir. Şekil.3.5, 3.6 ve 3.7, tekli/ikili, ikili/üçlü ve üçlü/dörtlü camyünü numunelerin alt ve üst numune sıcaklık farkları karşılaştırılmaktadır. Bu şekillerde, farklı güçlerde saatte bir alınan sıcaklık ve efektif ısı iletkenlik verileri verilmektedir. Buradan, doğal taşımının varlığı daha net görüldü. Şekil.3.5’de tekli ve ikili numuneler arasında incelendiğinde, aynı ortalama sıcaklıkta ikili numunenin sıcaklık farkı daha fazladır. Burada, alt numunelerin sıcaklık farkları sırasıyla ikili numunede 60,3 °C ve üçlü numunede 62,9 °C’dir. Aynı ortalama sıcaklığa (yaklaşık 61°C), tekli numunede 40,14 W (90 V) ve ikili numunede 25,04 W (70 V) ısı verilerek ulaşıldı. Şekil.3.6’da ikili ve üçlü numuneler incelendiğinde, sıcaklık farkının üçlü numune için daha fazla olduğudur. Bu sıcaklıkta, ikili numunede sıcaklık farkı 70,2 °C, üçlü numunede 71,3 °C olarak belirlendi. Yaklaşık 59,5 °C ortalama sıcaklığa, ikili numunede 25,04 W (70 V) ile ulaşırken, üçlü numune 18,85 W (61 V) ile ulaşıldı.

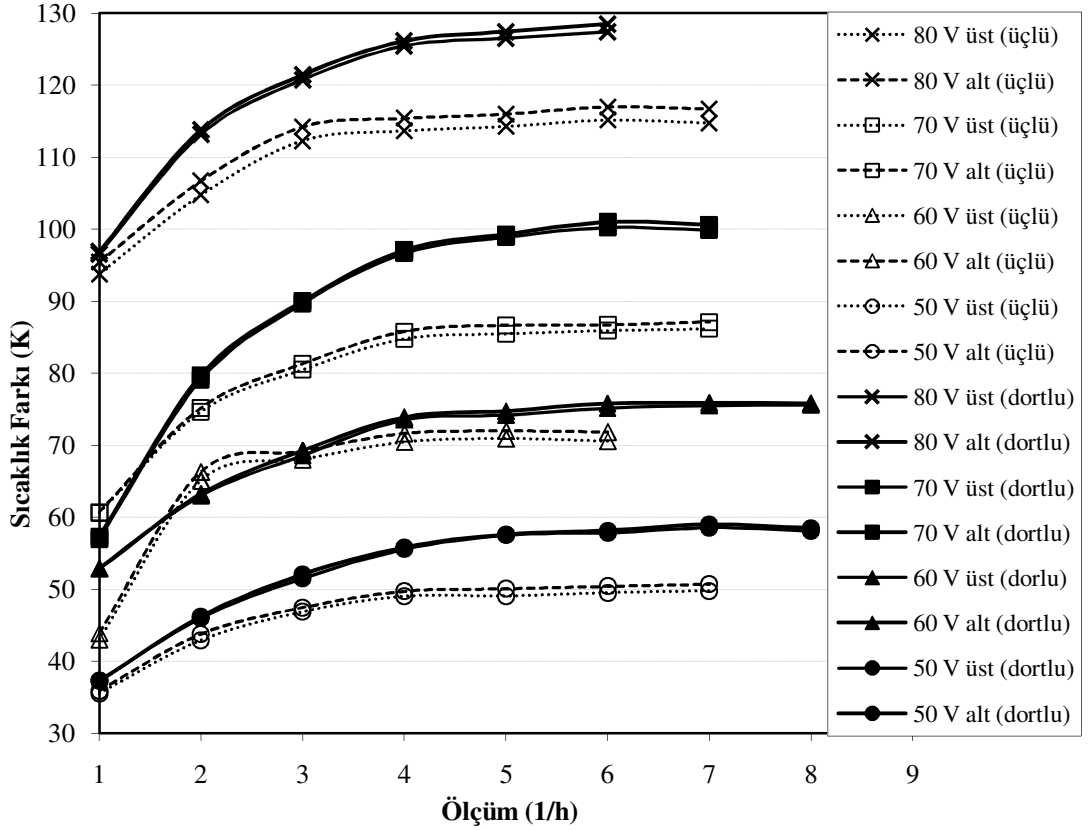


Şekil.3.5. Tekli ve ikili camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması



Şekil.3.6. İkili ve üçlü camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması

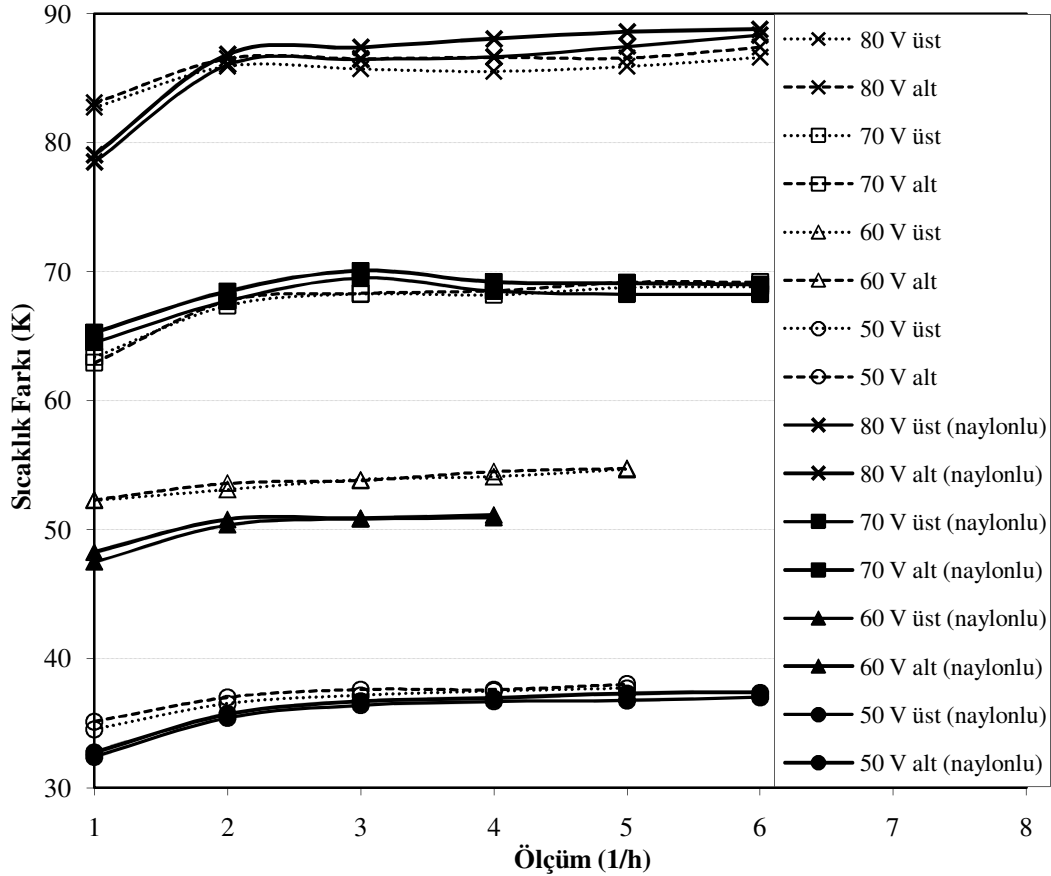
Şekil.3.7’de üçlü ve dörtlü camyünü numunenin üst ve alt sıcaklık farkları karşılaştırılmaktadır. Aynı ortalama sıcaklıkta, dörtlü numunenin sıcaklık farkı daha fazladır. Burada alt numunenin sıcaklık farkları, üçlü numunede 71.5 °C ve dörtlü numunede 75.5 °C’dir. Yaklaşık 59,2 °C ortalama sıcaklığa üçlü numunede 18,85 W (61 V) ile ulaşılrken, dörtlü numunede 16,84 W (58 V) civarında ulaşıldı.



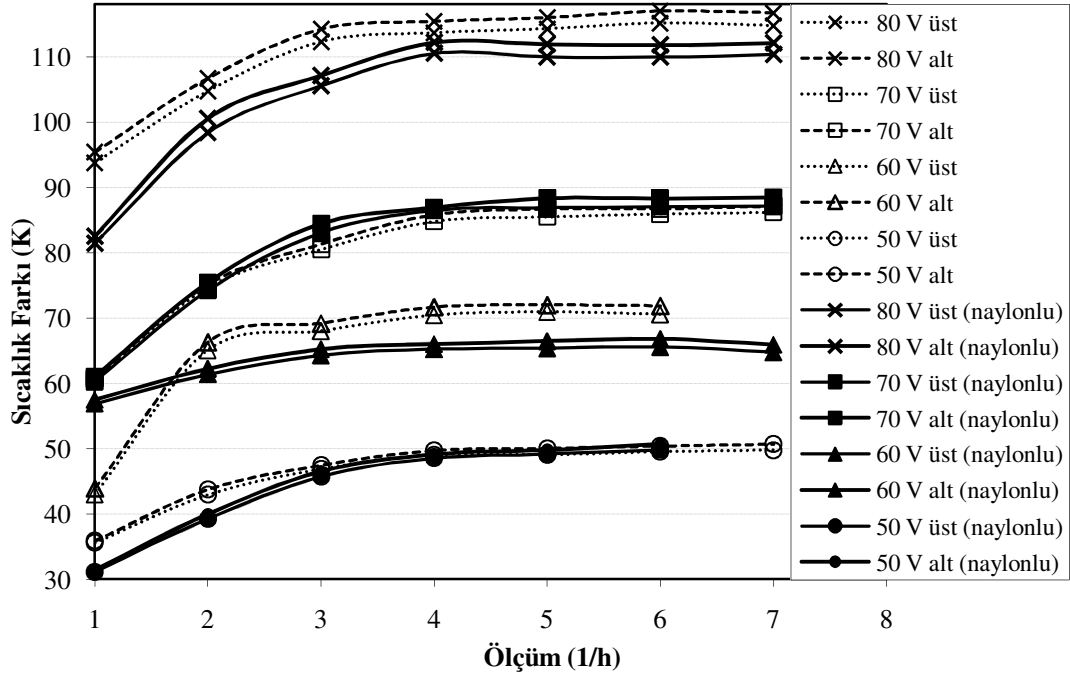
Şekil.3.7. Üçlü ve dörtlü camyünü numunenin alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması

Ortalama sıcaklık yükseldiğinde, iki farklı numuneler arasındaki sıcaklık farklarından doğal taşınımın etkisi gözlemlendi. Ayrıca, aynı numunenin yüksek sıcaklıklarda sıcaklık farkları incelendiğinde bu etki görülebilir. Şekil.3.5, 6 ve 7’de, tüm numunelerin 90 V civarındaki alt ve üst numune sıcaklık farkları farklıdır. Burada, üst numunenin üzerinde soğuk tabaka ve altında sıcak tabaka bulunduğundan doğal taşınım gerçekleşir. Bundan dolayı, sıcaklık farkı alt numuneye göre düşüktür. Buradan, doğal taşınımın etkisi ortalama yüksek sıcaklıkta (verilen güç ile birlikte) görülebilmektedir.

Sıcaklık farkları üzerine, araya naylon koyulup koyulmamasının etkisi de araştırıldı. Bu etki, Şekil.3.8 ve 3.9’da ikili ve üçlü camyünü numunede görülmektedir. İkili numuneye naylon yerleştirmenin ısı iletkenlik üzerine etkisi, Şekil.3.2’de gözlemlenmemektedir. Ancak, Şekil.3.8’de ikili numunede sıcaklık farkının naylonsuz halde 0,4 °C yüksek olduğu görüldü. Buradan, naylonun doğal taşınımı engellediği söylenebilir. Bu inceleme, 44,82 °C ortalama sıcaklıkta ve 12,62 W (50 V) civarında yapıldı. Aynı şekilde, naylonlu ve naylonsuz halde üçlü numune sıcaklık farkları incelendi (Şekil.3.9). Naylonsuz halde sıcaklık farkı, 4,86 °C daha yüksek bulundu. Bu inceleme, yaklaşık 83 °C ve 32,85 W (80.57 V) civarında yapıldı. Ayrıca, 60 V civarında da sıcaklık farklılığı gözlenmektedir.



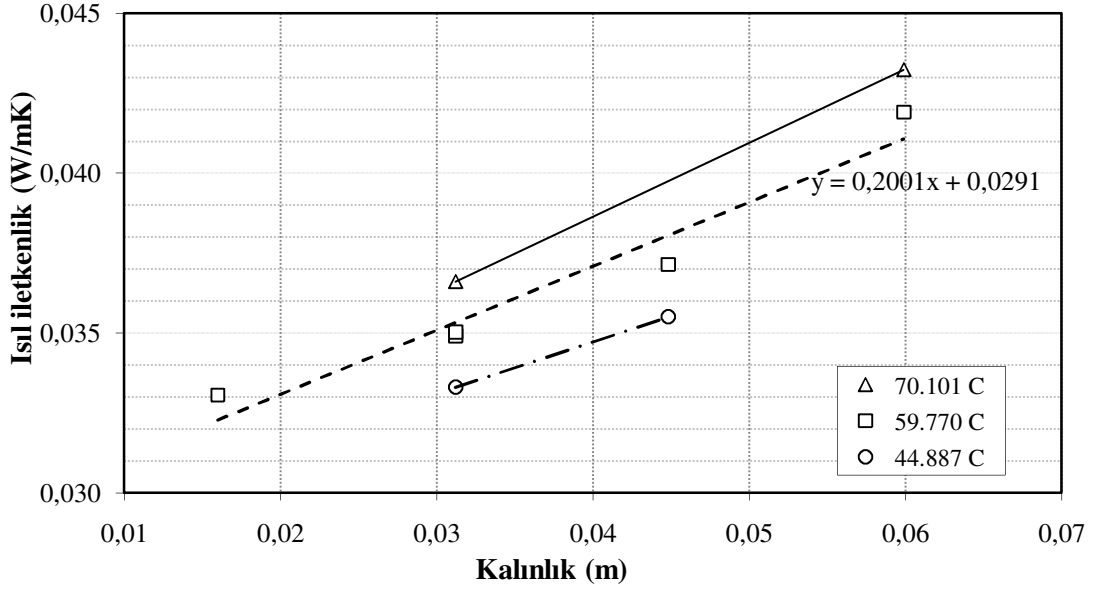
Şekil.3.8. Naylon takviyeli ve takviyesiz “ikili camyünü numunenin” alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması



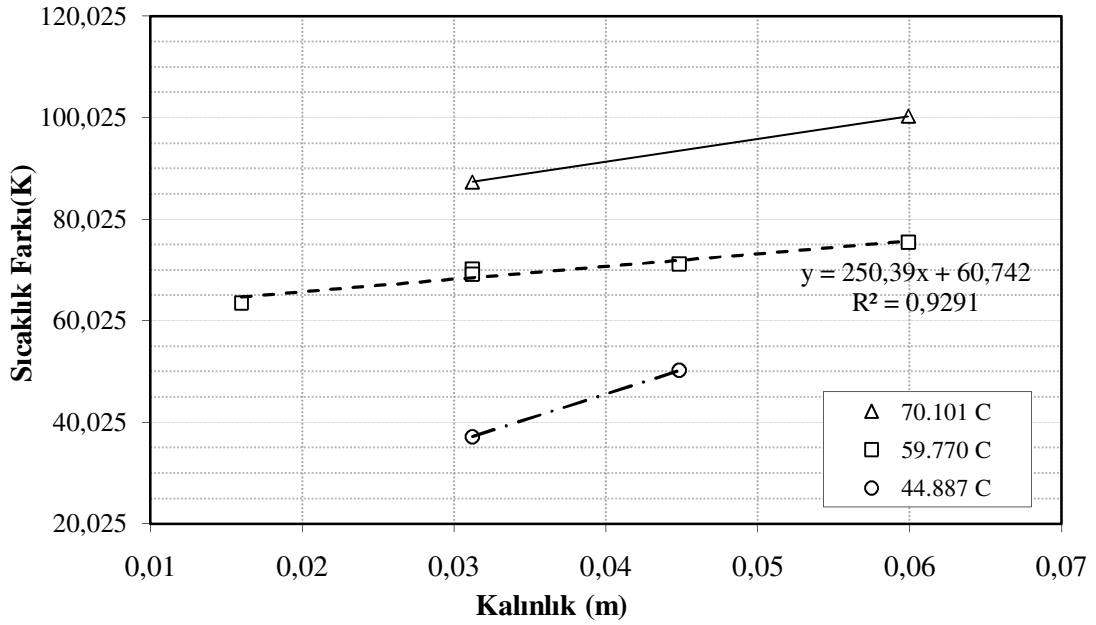
Şekil.3.9. Nylon takviyeli ve takviyesiz “üçlü camyünü numunenin” alt ve üst sıcaklık farklarının karşılaştırılması

Sonuçlar incelendiğinde; farklı kalınlıklı numuneler (tekli/ikili, ikili/üçlü, üçlü/dörtlü) arasında ve nayeon varlığı olup olmamasına göre yapılan sıcaklık farkından, doğal taşınım gözlemlendi. Bu durum, farklı kalınlıklı camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinden (aynı ortalama sıcaklıkta) Şekil.3.2’de de görülmektedir. Nayeonlu ve nayeonsuz halde ısı iletkenliklerde çok büyük farklılık gözlenmemiş olmasına rağmen sıcaklık farklarıyla daha net gözlemlendi. Doğal taşınımın etkisi, farklı numunelerin ve aynı numunenin sıcaklık farklarındaki farklılık ile belirlendi. Ayrıca, kalınlıkla efektif ısı iletkenliğinin değişiminde de görülebilir. Bu ise, aynı ortalama sıcaklıkta Şekil.3.2’de tekli, ikili, üçlü ve dörtlü camyünü numuneler arasında efektif ısı iletkenliğinin arttığı görülmektedir. Bu durum, aynı ortalama sıcaklıklarda Şekil.3.10 (a)’da verilerek netleştirilebilir. Burada, yoğunluğun ve doğal taşınımın etkisi olduğu düşünülebilir. Numunelerin kalınlıkla kütlesi orantılı olarak değiştiğinden, yoğunluğun değişmediği ve etki etmediği söylenebilir. Homojen dağılımlı olan tüm numunelerde, yoğunluk yaklaşık 100 kg/m^3 olarak belirlendi. Yalnız tekli numunede yoğunluk 100 kg/m^3 ’den %6 sapmaktadır. Sıcaklık farkının etkisi, aynı ortalama sıcaklıkta kalınlığa bağlı olarak Şekil.3.10 (b)’de görülebilir. Eğimlerden, kalınlığın etkisi kadar sıcaklık farkının

etkisinin olabileceği söylenebilir. Ayrıca, doğal taşınımın etkisi yanında, ortalama sıcaklık artarken ısı iletkenlik değişiminin arttığı da görüldü.



(a)



(b)

Şekil.3.10. Ortalama sıcaklıklar için (a) kalınlıkla efektif ısı iletkenliğin ve (b) kalınlıkla sıcaklık farkının değişimi

3.4. EP500 Isıl İletkenlik Cihazında Ölçülen Efektif Isıl İletkenlik

Gözenekli tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli tabakalı ortamlar arasında farklı emisivite değerlerine sahip malzemeler konularak efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü. Bu ölçümlerde, strafor, cam yünü, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş gibi tabakalı ortamlar ve alüminyum folyo, alüminyum, bakır, bakır folyo, kağıt, strech naylon, gibi takviyeler kullanıldı. Aynı zamanda, iletimle olan ısı transferi yanında taşınım ve ışınımı gözlemek amacıyla düşük ve yüksek sıcaklıklarda ölçümler yapıldı. EP500 muhafazalı sıcak plaka ölçüm cihazında, 0 °C ve 40 °C aralığında belirli işletme sıcaklıklarında ve 5 K, 10 K ve 15 K üç farklı işletme sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Bu inceleme, araya emisivitesi düşük ve yüksek malzemeler konulmadan yapılan ölçümleri de içermektedir. Farklı tabakalı ortamların efektif ısı iletkenlikleri, takviyesiz, takviyeli, takviye sayısı, takviye cinsi ve konumu açısından değerlendirildi. Elde edilen sonuçlardan yansıtıcı özelliğın etkisi yanında sıcaklık farkının etkisinde ele alındı.

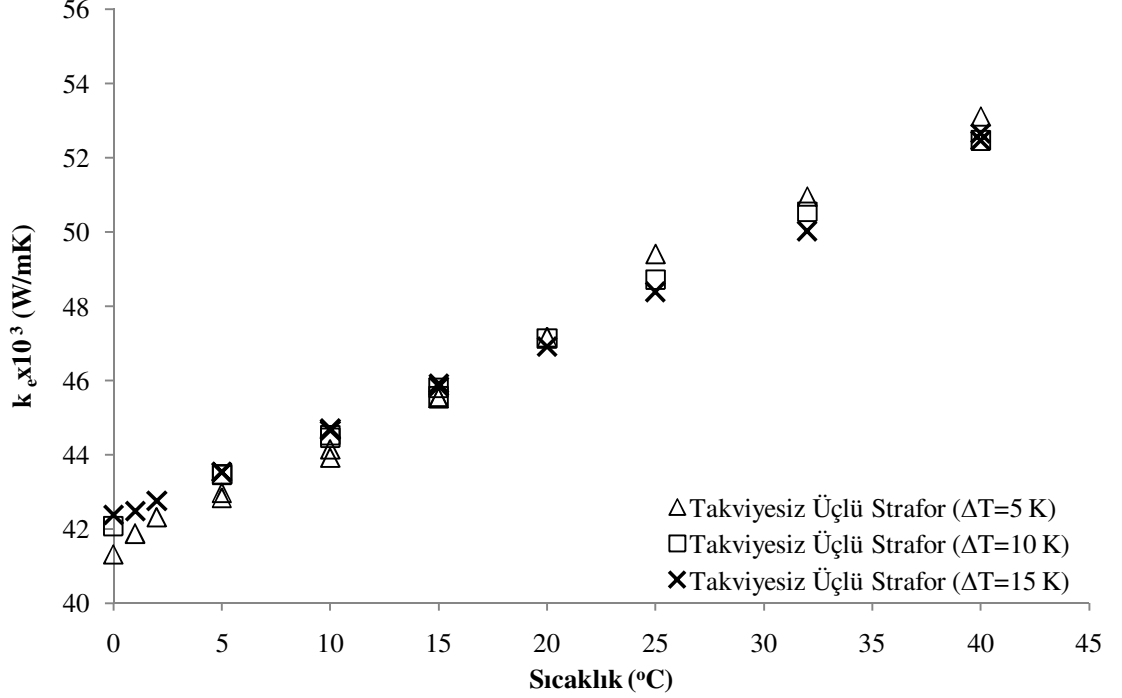
3.4.1. Takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenlikleri

Gözenekli tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli tabakalı numunelerin efektif ısı iletkenlikleri, arasında farklı emmisivite değerlerine sahip takviyeler konulmadan ölçüldü. Bu ölçümler, eps (strafor), camyünü, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş tabakaların efektif ısı iletkenliklerini içermektedir.

3.4.1. 1. Takviyesiz EPS (strafor) numunesinin efektif ısı iletkenliğı

Üçlü tabakaya sahip strafor malzemenin arasında takviye koyulmadan, farklı sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Şekil.3.11'de, farklı işletme sıcaklıklarında ele alındı. Şekil.3.11 incelendiğinde, sıcaklık farkının efektif ısı iletkenliğe etkisinin düşük düzeyde kaldığı görülmektedir. Ayrıca, tek tabakalı strafor malzemesinin sıcaklıkla efektif ısı iletkenliğın değışimine benzemektedir. Bu durum,

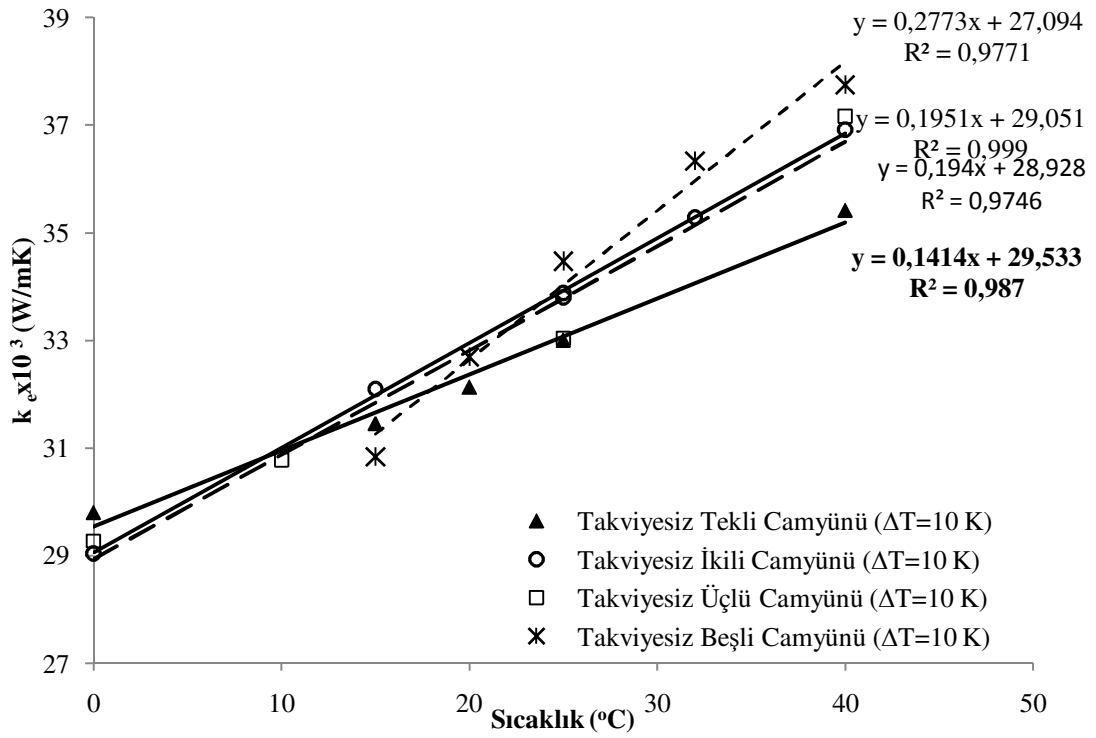
tabakalı yoğunluğun ve malzeme özelliğinin tek tabakaya göre değişmediğinin bir göstergesidir.



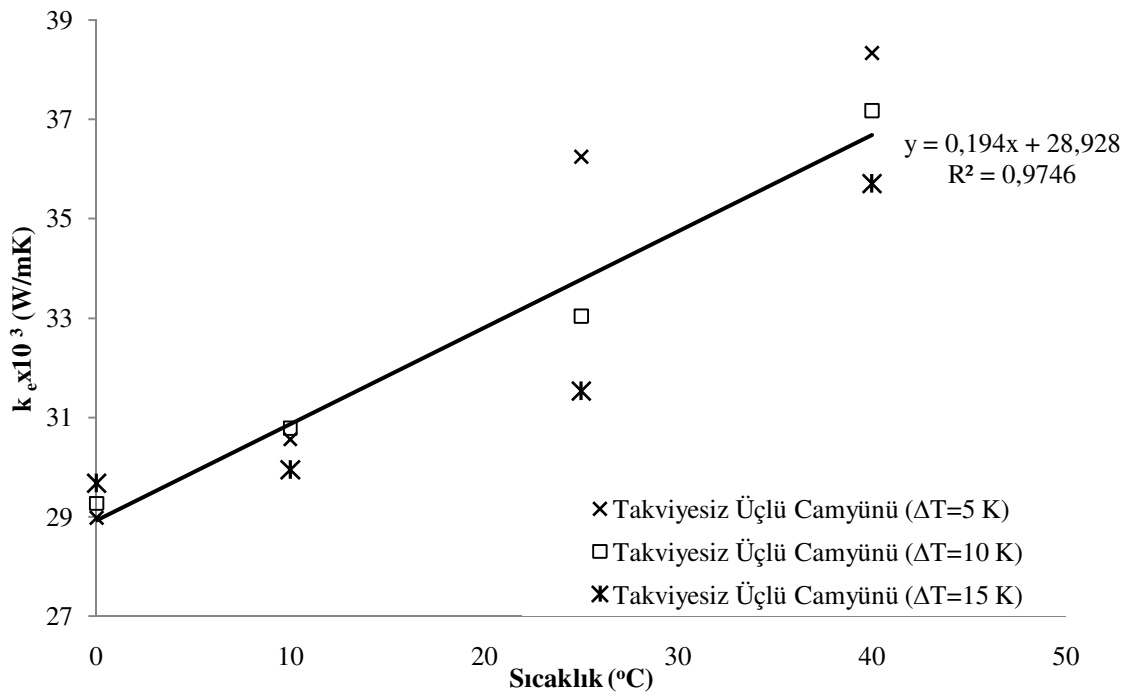
Şekil.3.11. Takviyesiz üçlü strafor numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

3.4.1.2. Takviyesiz camyünü numunelerinin efektif ısıl iletkenliği

Camyünü tabakalar arasında herhangi bir takviye yapılmadan, efektif ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirildi. Takviyesiz tekli, ikili, üçlü ve beşli tabakalardan oluşan camyünü numunelerinin efektif ısıl iletkenlikleri belirlendi. Şekil.3.12’de, 10 K sıcaklık farkı için 0 ve 40 °C sıcaklık aralığında verilmektedir. Burada, kalın çizgi takviyesiz tekli camyününü ve büyük kesik çizgi ise takviyesiz üçlü camyününü temsil etmektedir. Üçlü camyünü numunesinin, 5 ve 15 K sıcaklık farkları için de efektif ısıl iletkenlikleri ölçüldü. Takviyesiz üçlü camyünü numunesinin efektif ısıl iletkenlikleri, Şekil.3.13’de sıcaklık farkı açısından verilmektedir.



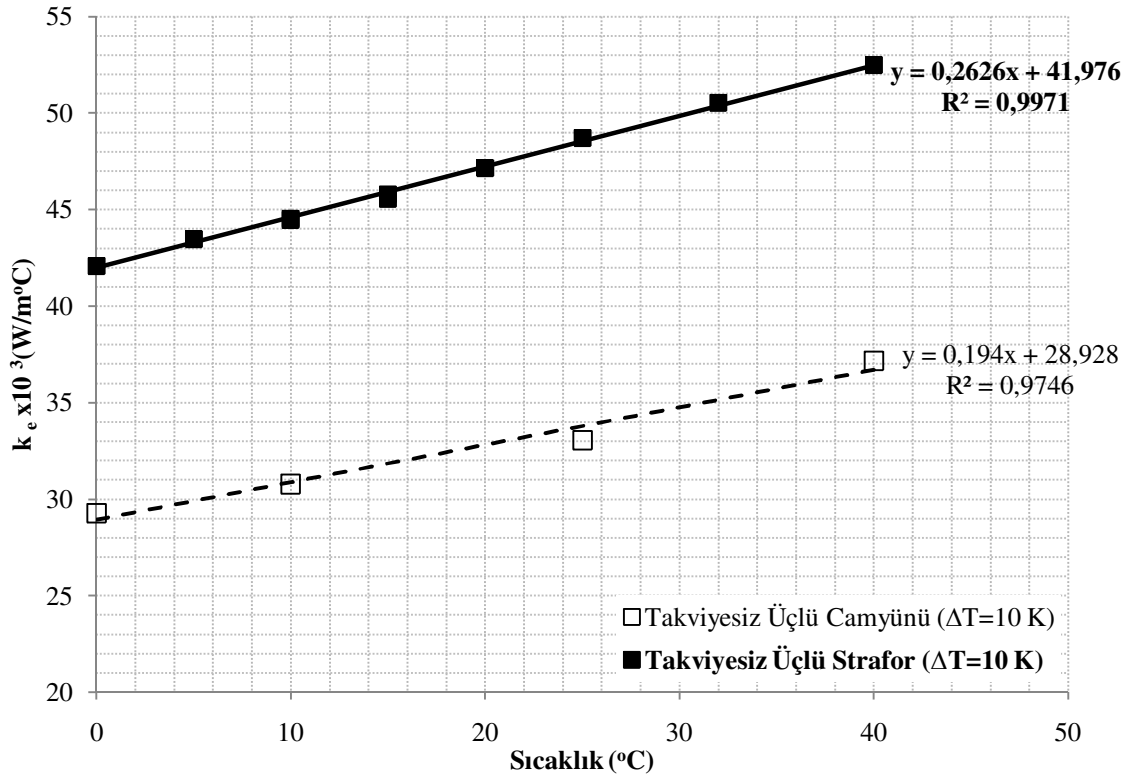
Şekil.3.12. Al folyo takviyesiz tekli, ikili, üçlü ve beşli camyünü numunelerinin 10 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması



Şekil.3.13. Takviyesiz üç farklı (tekli, ikili ve üçlü) camyünü numunesinin farklı sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Şekil.3.12 incelendiğinde, takviye edilmeyen camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin değişmediği görülebilir. Aynı şekilde, Şekil.3.13’de üçlü camyünü numunesi için sıcaklık farkının yaklaşık olarak %5 hata aralığında benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, tabakalı numunelerin özelliklerinin/yoğunluklarının değişmemesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, alüminyum folyo takviyesi yapılmadan elde edilen ölçüm sonuçlarının benzer sonuçlar verdiği kabul edilebilir.

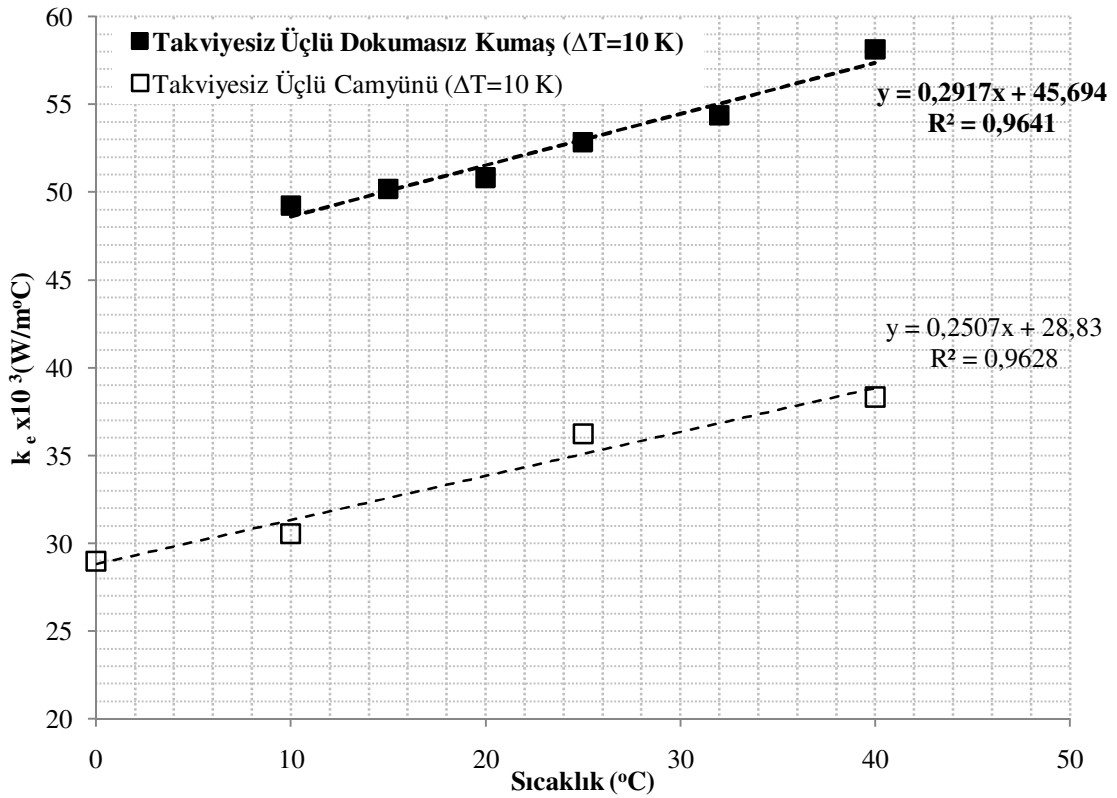
Üçlü tabakalar arasından iki farklı ana malzemenin efektif ısı iletkenlikleri, karşılaştırıldı. Burada camyünü ve strafor ana malzemeleri ele alındı. Takviyesiz olarak camyünü ve straforun ısı iletkenlikleri, Şekil.3.14’de karşılaştırılmaktadır. Burada, kapalı hücreli olan strafora camyünün efektif ısı iletkenliğinden daha yüksek bulundu. Bu sonuç, camyünün kalınlığının 49 mm ve straforun kalınlığının 87.5 mm olmasından kaynaklanmamakta olup efektif ısı iletkenliğinin farklılığı malzemeye irdelenebilir.



Şekil.3.14. Takviyesiz üçlü strafor ve üçlü camyünü numunelerinin farklı sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

3.4.1.3. Takviyesiz dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliği

Takviyesiz üçlü camyünü numunelerinin kalınlığında dokumasız filtre kumaş numunesi oluşturularak efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Bu efektif ısı iletkenlikler, 10 K sıcaklık farkı için Şekil.3.15’de verilmektedir. Ayrıca, şekilde takviyesiz üçlü camyünü numunesi ile karşılaştırıldı. Sıcaklık farkı, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ölçümlerden yaklaşık olarak benzer sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu yüzden, takviyesiz bu numunenin efektif ısı iletkenlikleri sıcaklık farkı açısından ele alınmadı.



Şekil.3.15. Takviyesiz üçlü dokumasız (nonwoven) filtre kumaş ile takviyesiz üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

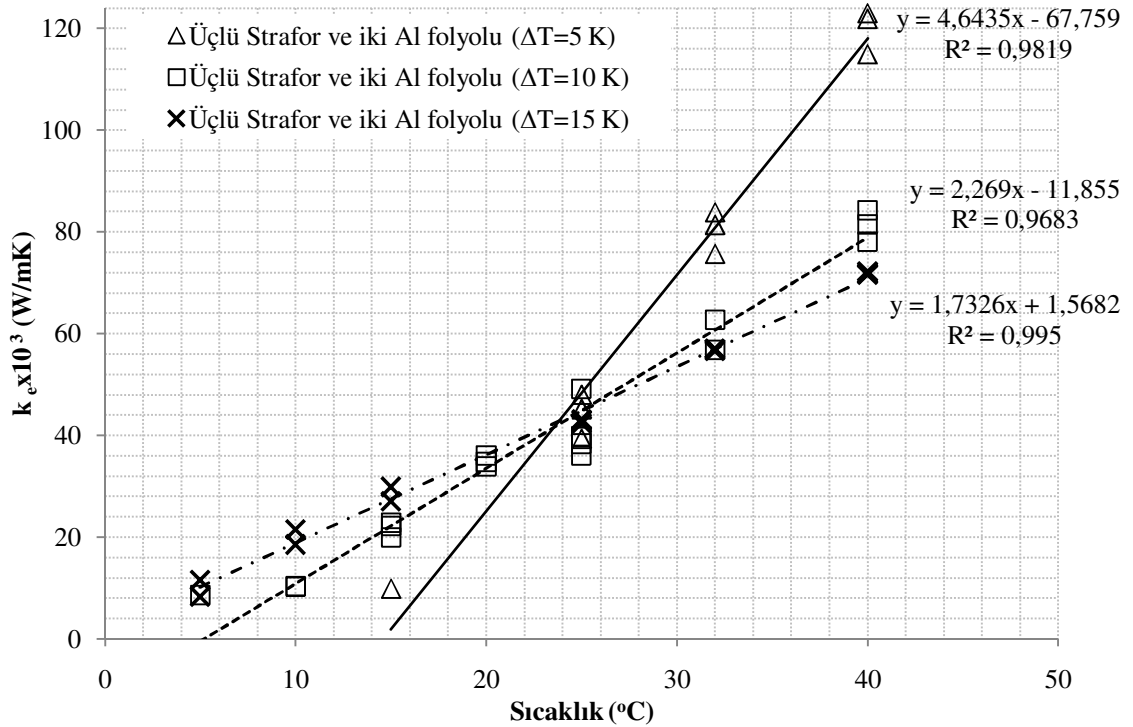
3.4.2. Takviyenin efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

Gözenekli ortamlar arasına yerleştirilen takviyelerin, efektif ısı iletkenlikler üzerine etkisi incelendi. İlk olarak, üçlü strafor katmanları arasına alüminyum folyo

takviyeler konularak ölçümler gerçekleştirildi. Ayrıca, tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli camyünü katmanlar arasında farklı emmisivite değerlerine sahip malzemeler konularak ölçümler yapıldı. Son olarak, dokumasız (nonwoven) filtre kumaş tabakalar arasında bakır veya alüminyum folyo takviyeler konularak ta ölçümler gerçekleştirildi. Bu ölçümler, 10 K sıcaklık farkı için 0 °C ve 40 °C sıcaklık aralığındaki belirli işletme sıcaklıklarında yapıldı. Ayrıca, bazı numunelerde 5 K ve 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlik değerleri tespit edildi.

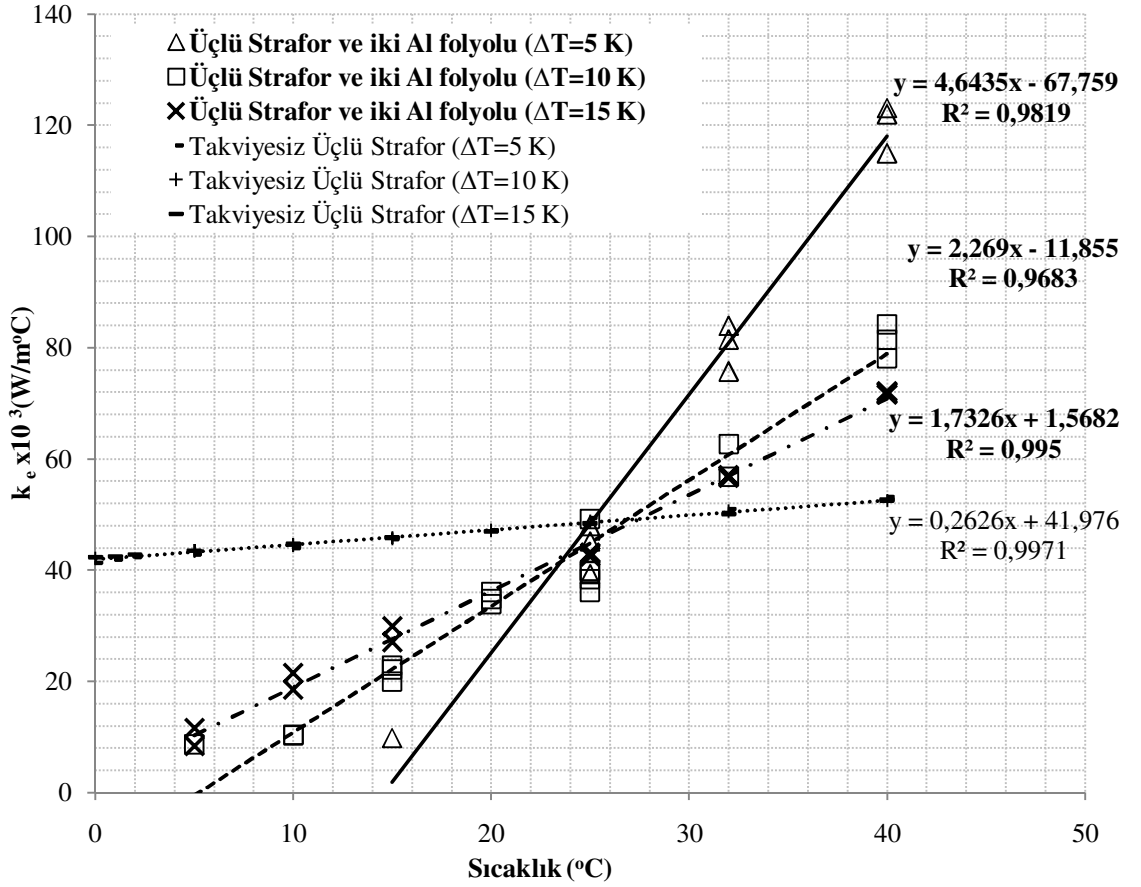
3.4.2.1. Takviyeli üçlü strafor numunesinin efektif ısı iletkenliği

Üçlü tabakaya sahip strafor malzemenin arasında alüminyum folyo takviyesi konulduğunda farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Şekil.3.16'da 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliğe etkisi ele alındı.



Şekil.3.16. İki Al folyo takviyeli üçlü strafor numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

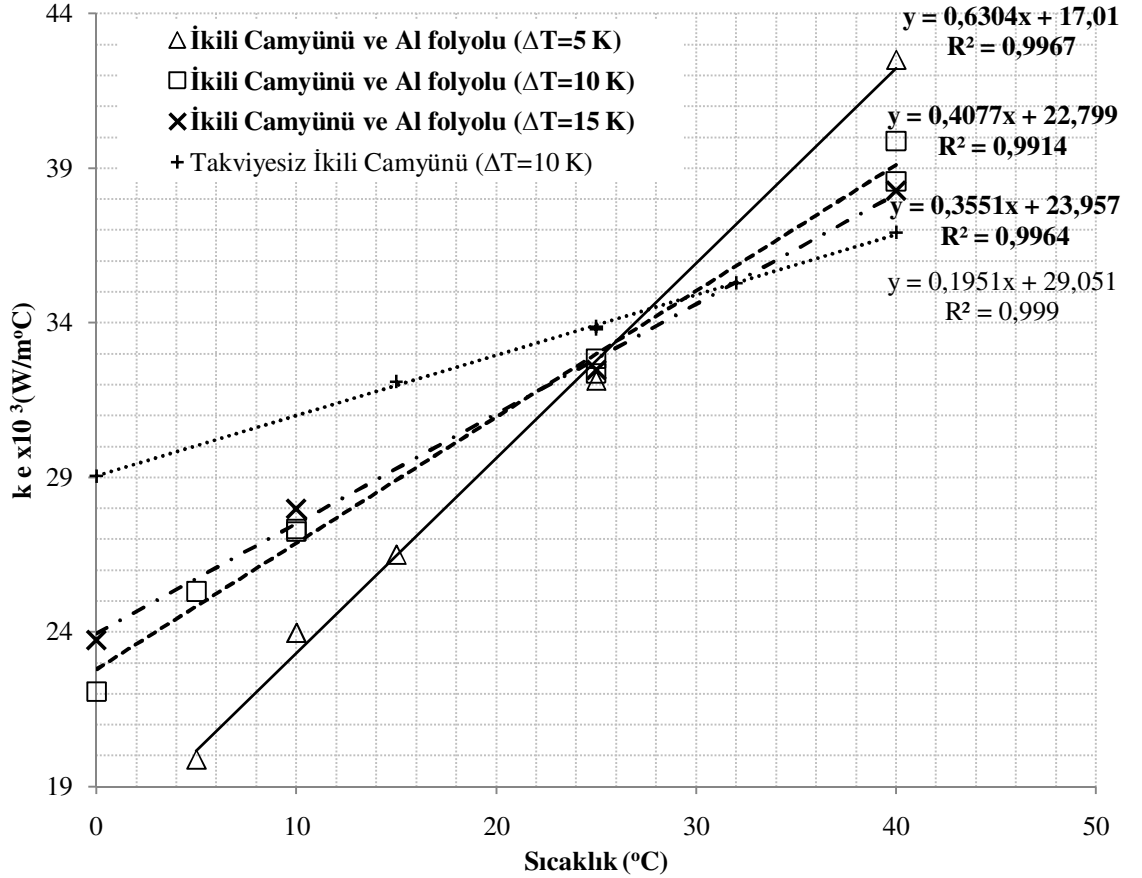
Şekil.3.16. incelendiğinde, sıcaklık farkının efektif ısı iletkenliğe etkisi düşük ve yüksek sıcaklıklarda etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık farkı azaldığında, 40 °C sıcaklıkta efektif ısı iletkenlik %57,48 oranında artmışken düşük sıcaklıkta iletkenliğin havanın iletkenliğinin altına indiği görüldü. Ancak bu sıcaklıkta, sıcaklık farkı arttığında efektif ısı iletkenlik yaklaşık % 8,3 oranında azaldı. Düşük sıcaklıkta ise, iletkenliğin havanın iletkenliği civarında olduğu görülebilir. Yansıtıcı tabakalı takviye etkisinin bir sonucu olduğu, hem Şekil.3.16'dan hem de Şekil.3.17'den anlaşılmaktadır. Ayrıca sıcaklık farkının homojen malzemede önemsiz olduğu görülürken, aslında takviyeli malzemelerde bu farkın önemli olduğu söylenebilir.



Şekil.3.17. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü strafor numunelerinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

3.4.2.2. Takviyeli ikili camyünü numunesinin efektif ısıl iletkenliği

İkili camyünü tabakaları arasına alüminyum folyonun yerleştirilmesiyle, bu tabakalı numunenin efektif ısıl iletkenliğinin takviye nedeniyle ne şekilde değiştiği tespit edildi. Yapılan ölçümlerden, ikili camyünü efektif ısıl iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda değişimi Şekil.3.18’de verildi. Şekil.3.18 incelendiğinde, yansıtıcı malzemenin ilave edilmesi efektif ısıl iletkenliği önemli oranda değiştirmedığı anlaşılmaktadır.



Şekil.3.18. Al folyo takviyeli ikili camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

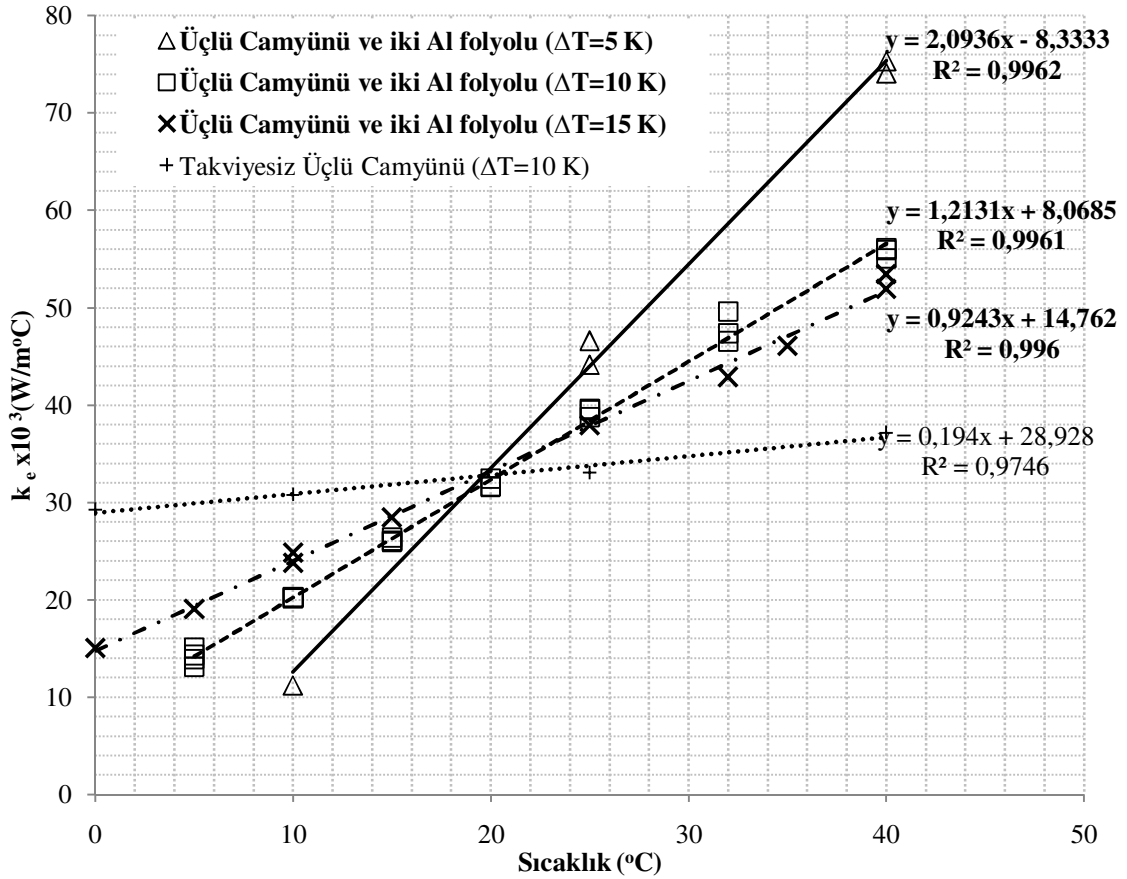
İkili camyünü numunesi, $28 \text{ }^\circ\text{C}$ kritik işletme sıcaklığından sonra takviyesiz camyünü numuneleri gibidir. $40 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta elde edilen efektif ısıl iletkenlik değerleri, ortalama 5 K sıcaklık farkında $0,0425 \text{ W/mK}$, 10 K sıcaklık farkında $0,039225 \text{ W/mK}$

ve 15 K sıcaklık farkında 0,03827 W/mK'dir (Şekil.3.18). Takviyesiz ölçülen efektif ısı iletkenlik değeri ise, ortalama 0,03692 W/mK olarak belirlendi. 10 K sıcaklık farkında aralarındaki farklılık % 5 aralığındadır. Ancak, sıcaklık farkı nedeniyle takviyeli numunelerdeki efektif ısı iletkenlik değerinin yaklaşık %15,11 daha fazla olduğu görüldü. Aynı şekilde bu farklılık, ortam şartlarının (25 °C) altında ve üstünde sıcaklıklarda daha etkin değişiklik göstermektedir. Örneğin 10 °C sıcaklık için 10, 15 K sıcaklık farklarında 0,027285 ve 0,02798 W/mK olarak gözlenirken 5 K sıcaklık farkında 0,02396 W/mK efektif ısı iletkenlik değeri elde edildi. Bu takviyesiz numunenin efektif ısı iletkenliğine göre düşüktür. Bu %12,33 daha düşük efektif ısı iletkenliktir. Bu farklılık, daha düşük sıcaklıkta ve sıcaklık farkında artmaktadır. Bu sıcaklıklarda, daha iyi bir yalıtım malzemesi olabileceği söylenebilir.

3.4.2.3. Takviyeli üçlü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği

Üçlü camyünü tabakaları arasına alüminyum folyo yerleştirilerek efektif ısı iletkenlikler belirlendi. Burada, takviyenin ne şekilde etkilediği araştırıldı. Yapılan ölçümlerden, 5, 10 ve 15 K sıcaklık farkları için üçlü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenlik değerlerinin farklı sıcaklıklarda değişimi Şekil.3.19'da belirlendi. Bu şekil incelendiğinde, alüminyum folyo malzemenin ilave edilmesi efektif ısı iletkenliği önemli oranda etkilediği ve değiştirdiği anlaşıldı. Bu değişim, ortam şartlarının (20 °C) altında ve üstünde sıcaklıklarda belirgin hale gelmektedir. 10 ve 40 °C sıcaklıklarda elde edilen efektif ısı iletkenlik değerlerinin değişimi incelendiğinde, 5 K sıcaklık farkının en büyük etkiyi oluşturduğu anlaşılmaktadır. Şekil.3.19'dan takviyeli üçlü numunenin efektif ısı iletkenlikleri, 10 °C sıcaklık için 5 K sıcaklık farkında 0,01122 W/mK, 10 K sıcaklık farkında 0,02022 W/mK ve 15 K sıcaklık farkında 0,024335 W/mK tespit edildi. 40 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında bu değerler, sırasıyla 0,07472 W/mK , 0,054 W/mK ve 0,0527 W/mK olarak ölçüldü. Bu sonuçlar, takviyesiz ölçülen efektif ısı iletkenlik değerleri ile karşılaştırıldığında 20 °C ortam sıcaklığı üzerinde daha iletken bir malzeme iken 20 °C altında daha yalıtkan bir malzeme vermektedir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda (10 ve 40 °C), takviyesiz numunenin efektif ısı iletkenliğine (havanın ısı iletkenliğine) göre % 101,02 (174,08) daha yüksek ısı iletkenlik ve % 63,54 (55,01) daha düşük ısı iletkenlik demektir. Bu düşük

sıcaklıklarda daha iyi bir yalıtım malzemesi olabileceğini gösterdi. Havanın ısı iletkenliği 10 ve 40 °C sıcaklıklarda 0,02494 ve 0,02726 W/mK'dir. Bu sıcaklıklarda, takviyesiz numunenin efektif ısı iletkenlikleri ise 0,03078 W/mK ve 0,03717 W/mK'dir.

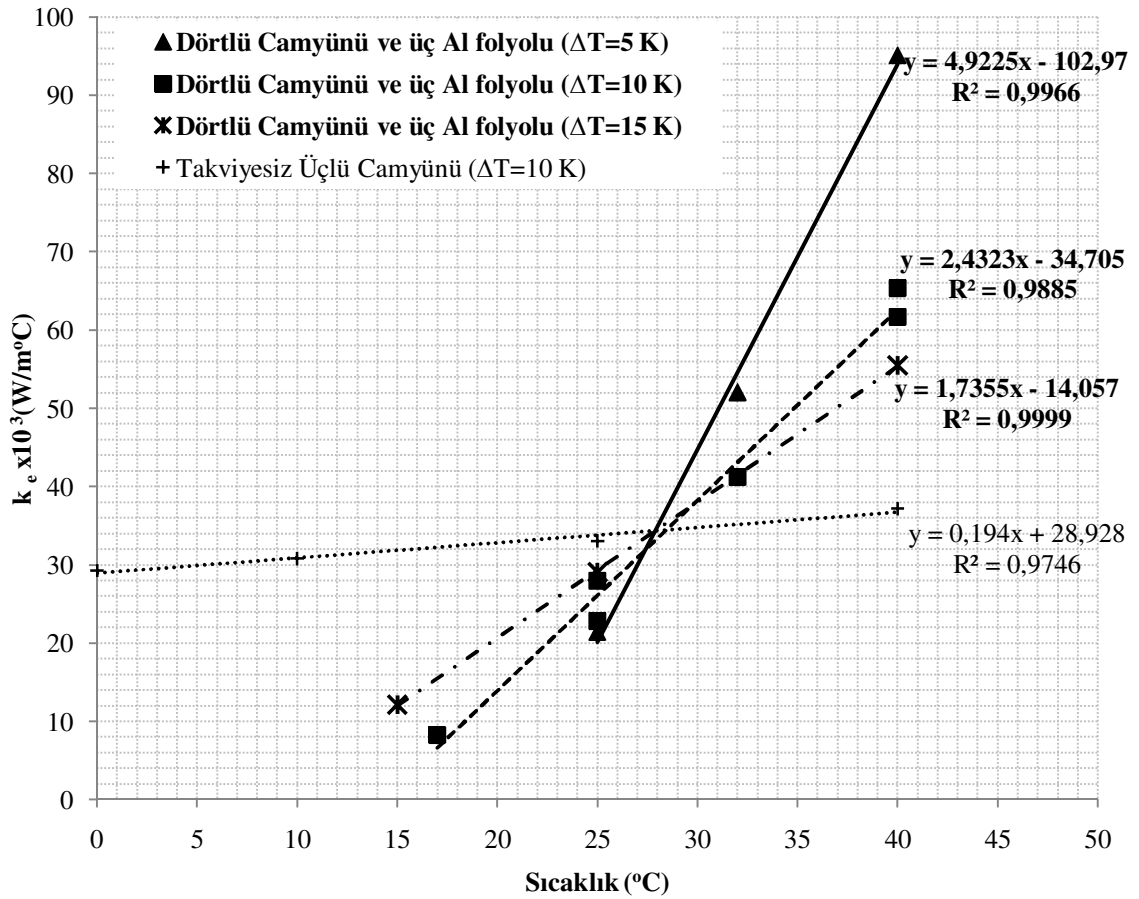


Şekil.3.19. İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

3.4.2.4. Takviyeli dörtlü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği

Dörtlü camyünü tabakaları arasında alüminyum folyonun yerleştirilmesiyle oluşan tabakalı numunedeki efektif ısı iletkenlik, farklı sıcaklıklarda incelendi. Bu sıcaklıklarda ölçülen efektif ısı iletkenlik değerlerinin 5, 10 ve 15 K sıcaklık farkları için Şekil.3.20'de değişimi verilmektedir.

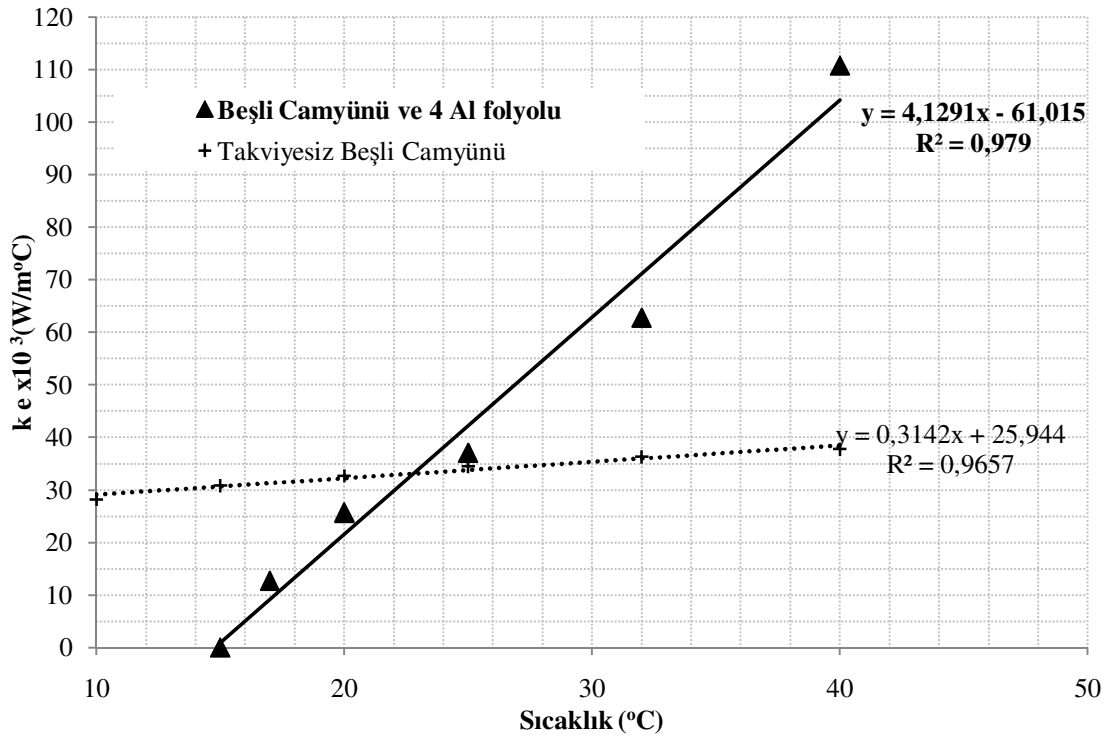
Şekil.3.20 incelendiğinde, alüminyum folyo malzemenin ilave edilmesinin yüksek sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliği önemli oranda etkilediği ve değiştirdiği anlaşıldı. Bu değişim, 28 °C kritik işletme sıcaklığının üstünde daha belirgindir. Bu işletme sıcaklığının altındaki düşük sıcaklıklarda ölçüm sonuçları ile takviyeli dörtlü numunenin ısı özelliği genişletilebilir. Daha önceki ikili, üçlü tabakalı numunelerde yapılan ölçümler gibi bu şekilde de 5 K sıcaklık farkının efektif ısı iletkenlik değerlerinin değişimde önemli etkiye sahip olduğu anlaşıldı. 40 °C’de 5 K sıcaklık farkında 0,0951 W/mK efektif ısı iletkenliğe, 10 K sıcaklık farkında 0,06347 W/mK ve 15 K sıcaklık farkında 0,05548 W/mK değerlerine ulaşıldı.



Şekil.3.20. Üç Al folyo takviyeli dörtlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

3.4.2.5. Takviyeli beşli camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği

Beşli camyünü tabakaları arasına dört alüminyum folyonun yerleştirilmesiyle oluşan tabakalı numunedeki efektif ısı iletkenlik, farklı sıcaklıklarda incelendi. Bu ölçülen efektif ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi, Şekil.3.21’de verilmektedir.



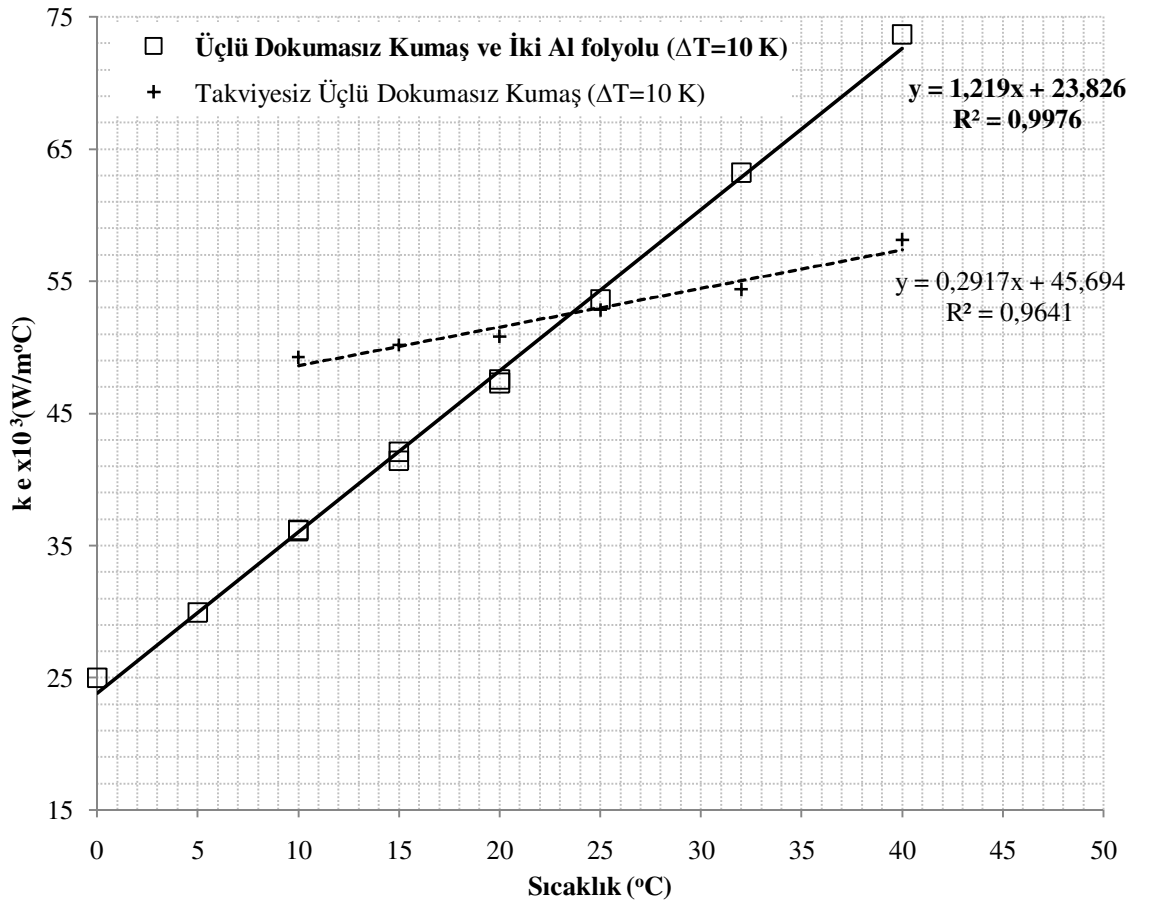
Şekil.3.21. Dört Al folyo takviyeli beşli cam yünü numunesinin efektif ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi (10 K sıcaklık farkı)

Şekil.3.21 incelendiğinde, alüminyum folyo malzemenin ilave edilmesinin yüksek sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliği önemli oranda etkilediği ve değiştirdiği anlaşıldı. Bu değişim, yaklaşık 23 °C işletme sıcaklığının üstünde daha belirgindir. Bu işletme sıcaklığının altındaki düşük sıcaklıklarda, daha iyi efektif ısı iletkenliğe ulaşılmaktadır. Daha önceki üçlü ve dörtlü tabakalı camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerin aralığında bir efektif ısı iletkenlikte gözükmektedir. 10 K sıcaklık farkı için 17 °C sıcaklıkta 0,01273 W/mK ve 20 °C sıcaklıkta 0,0257 W/mK efektif ısı iletkenlik değerleri ölçüldü. Takviyesiz üçlü camyünü numunesine göre, 20 °C sıcaklıkta %21,38 daha düşük efektif ısı iletkenlikte dir. Ancak, takviyeli üçlü ve dörtlü

camyününe göre, aynı sıcaklıkta % 59,9 daha düşük ve % 45,75 daha yüksek efektif ısı iletkenliğindedir. 40 °C sıcaklıkta ise, takviyeli beşli camyünü numunesi 0,11 W/mK efektif ısı iletkenliğindedir. Aynı sıcaklıkta bu numunenin efektif ısı iletkenliği, takviyesiz numuneye göre % 193,37 arttığı tespit edildi.

3.4.2.6. Takviyeli üçlü dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliği

Üçlü tabakaya sahip dokumasız filtre kumaş malzemenin arasına alüminyum folyo takviyesi konularak efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü. Bu ölçümler, farklı sıcaklıklar için Şekil.3.22’de verilmektedir. 5 K ve 15 K sıcaklık farkları için ölçümler, farklı numunelerde benzer eğilimler gösterdiğinden gerçekleştirilmedi.



Şekil.3.22. İki Al folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil.3.22. incelendiğinde, sıcaklığın efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi takviye nedeniyle görülebilir. Burada, 10 °C sıcaklıkta efektif ısı iletkenlik %24,574 oranında azalmışken düşük sıcaklıkta havanın iletkenliğinin altına indiği görüldü. Ancak sıcaklık arttığında, 40 °C sıcaklıkta efektif ısı iletkenlik yaklaşık % 26,73 oranında artmaktadır. Buradan, yansıtıcı takviye malzemesinin etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Kritik işletme sıcaklığı, üçlü camyünü numunesine göre değişmektedir. Burada, kritik işletme sıcaklığı 23 °C civarında iken üçlü camyünü numunesinde 20 °C'dir. Malzeme farklılığının da işletme sıcaklığı üzerine etkisi görülmektedir. Bu durum, kritik işletme sıcaklığının altında ve üzerinde kullanılacak bir malzemenin ısı iletkenliğini etkileyeceği için önemlidir.

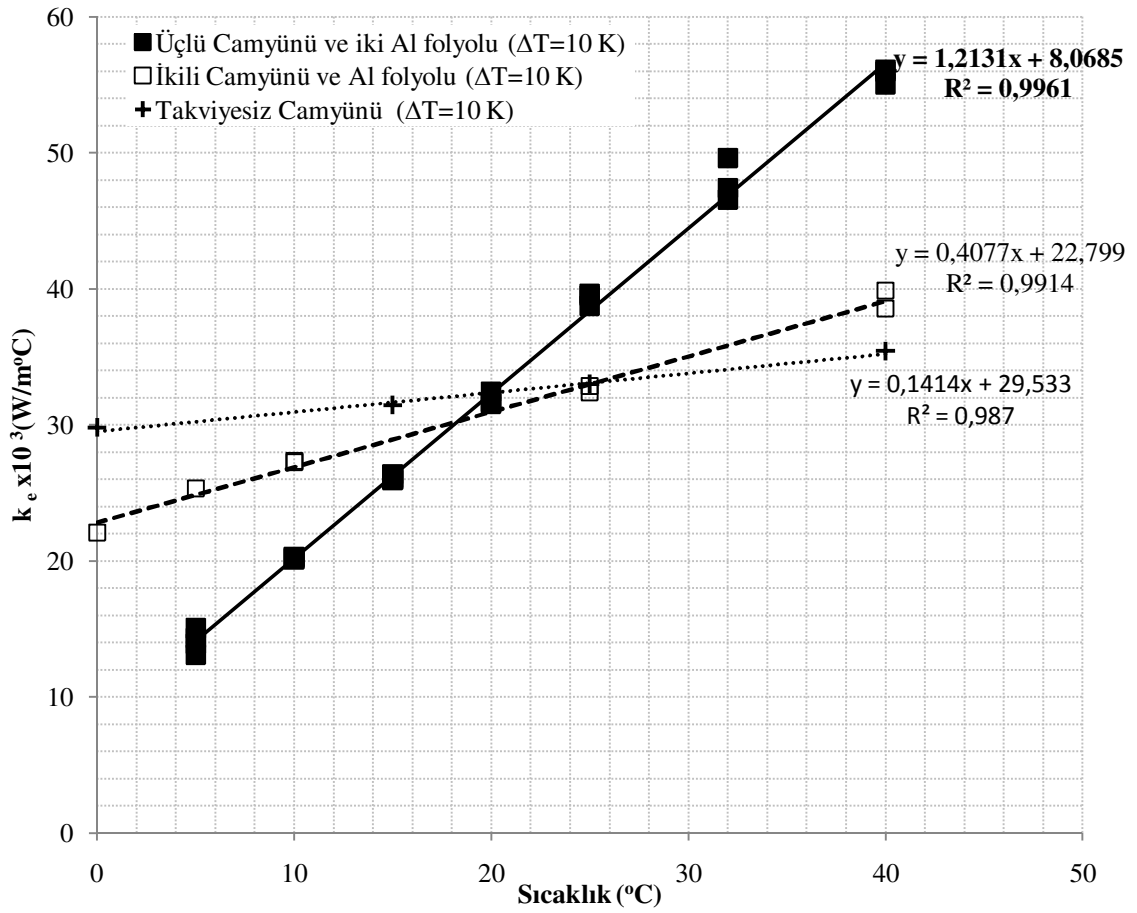
3.4.3. Tabaka ve takviye sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

Gözenekli ikili, üçlü, dörtlü ve beşli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri, tabaka sayısına bağlı takviye sayılarında incelendi. Bu numuneler, tabaka sayısının artışıyla orantılı takviye sayısı artırılarak hazırlandı. Burada, ikili camyünü numunesi için tek, üçlü camyünü numunesi için iki, dörtlü camyünü numunesi için üç ve beşli camyünü numunesi için dört alüminyum folyo takviyesi kullanıldı. Bunların, kendi aralarında değerlendirilmesi yapıldı.

3.4.3.1. Takviyeli ikili ve üçlü camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması

Takviyeli ikili ve üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri, Şekil.3.23'de karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma, farklı sıcaklıklarda yapıldı. Şekil.3.23 incelendiğinde, yansıtıcı malzemenin ve tabakanın efektif ısı iletkenlik üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. Takviyeli ikili camyünü numunesinin kritik işletme sıcaklığı 25 °C iken, üçlü camyünü numunesinin 20 °C'ye düşmektedir. Bu, kullanılacak takviyeli malzemenin kullanım sıcaklığı açısından önemlidir. 20 °C işletme sıcaklığından sonra, takviyeli ikili camyünü numunesi takviyeli üçlü camyününe göre daha iyi efektif ısı özelliklere sahip olmaktadır. Ancak, bu sıcaklığın altında üçlü camyünü numunesi daha iyi efektif ısı iletkenliğe sahiptir. Takviyeli ikili camyünü

numunesi efektif ısı iletkenliği, 10 K sıcaklık farkında 10 ve 40 °C sıcaklıkta, 0,027285 ve 0,03922 W/mK'dir. Takviyeli üçlü camyünü numune efektif ısı iletkenliği ise, yaklaşık olarak 0,02020 W/mK ve 0,05569 W/mK olarak bulundu. Bu, bu sıcaklıklarda %25,96 daha düşük ve %41,99 daha yüksek efektif ısı iletkenlik demektir. Bu farklılık daha düşük ve yüksek sıcaklıkta artmaktadır. Daha iyi bir yalıtımın belirli sıcaklıklarda sağlanabileceği görölmektedir.



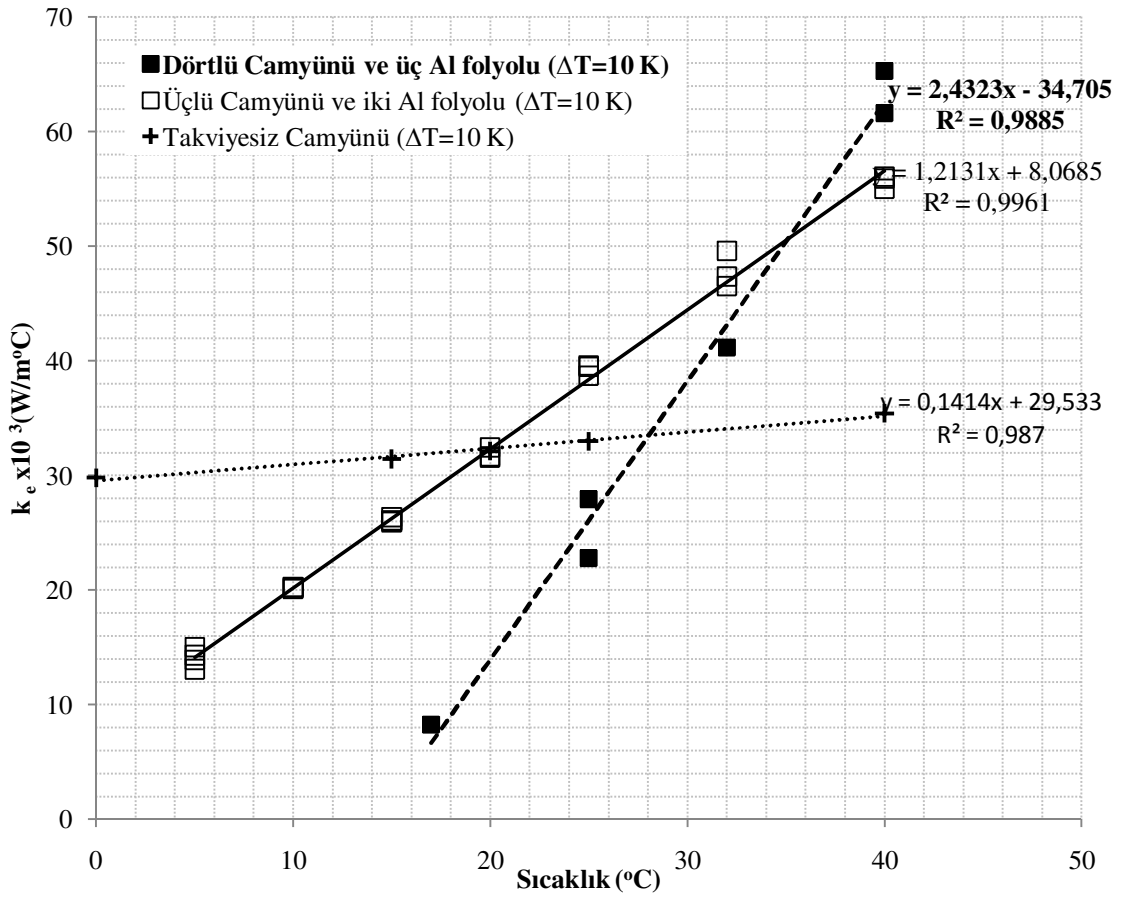
Şekil.3.23. Al folyolu ikili camyünü ve iki Al folyolu üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Takviyeli ikili camyünü numunesi efektif ısı iletkenliği, 40 °C sıcaklıkta 5 K sıcaklık farkında 0,0425 W/mK, 10 K sıcaklık farkında 0,03922 W/mK ve 15 K sıcaklık farkında 0,03827 W/mK'dir. Aynı şekilde bu farklılık, ortam şartlarının (25 °C) altında sıcaklıklarda da gözlendi. Örneğin 10 °C sıcaklık için 10, 15 K sıcaklık farklarında 0,027285 ve 0,02798 W/mK olarak gözlenirken 5 K sıcaklık farkında 0,02396 W/mK

efektif ısı iletkenlik değeri elde edildi. Bu farklılık daha düşük sıcaklıkta ve sıcaklık farkında artmaktadır. Daha iyi bir yalıtımın belirli sıcaklıklarda sağlanabileceği görölmektedir.

3.4.3.2. Takviyeli üçlü ve dörtlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması

Takviyeli üçlü ve dörtlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri, farklı sıcaklık da karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma, Şekil.3.24'de takviyesiz numuneye göre yapıldı.



Şekil.3.24. İki Al folyolu üçlü camyünü ile üç Al folyolu dörtlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değışimi ve karşılaştırması

Takviyeli üçlü camyünü numunesi efektif ısı iletkenliği, 10 K sıcaklık farkında 15 ve 40 °C sıcaklıkta, 0,02613 W/mK ve 0,05569 W/mK'dir. Takviyeli dört camyünü

numune efektif ısı iletkenliği ise, yaklaşık olarak 0,00826 W/mK ve 0,06347 W/mK olarak bulundu. Bu, bu sıcaklıklarda %68,38 daha düşük ve %13,97 daha yüksek efektif ısı iletkenlik demektir. Bu farklılık daha düşük ve yüksek sıcaklıkta artmaktadır. Daha iyi bir yalıtımın belirli sıcaklıklarda sağlanabileceği görülmektedir. Takviyeli üçlü camyünü numunesinin kritik işletme sıcaklığı 20 °C iken, üçlü camyünü numunesinin 28 °C'ye düşmektedir. Bu, takviyeli malzemenin kullanım sıcaklığı açısından önemlidir.

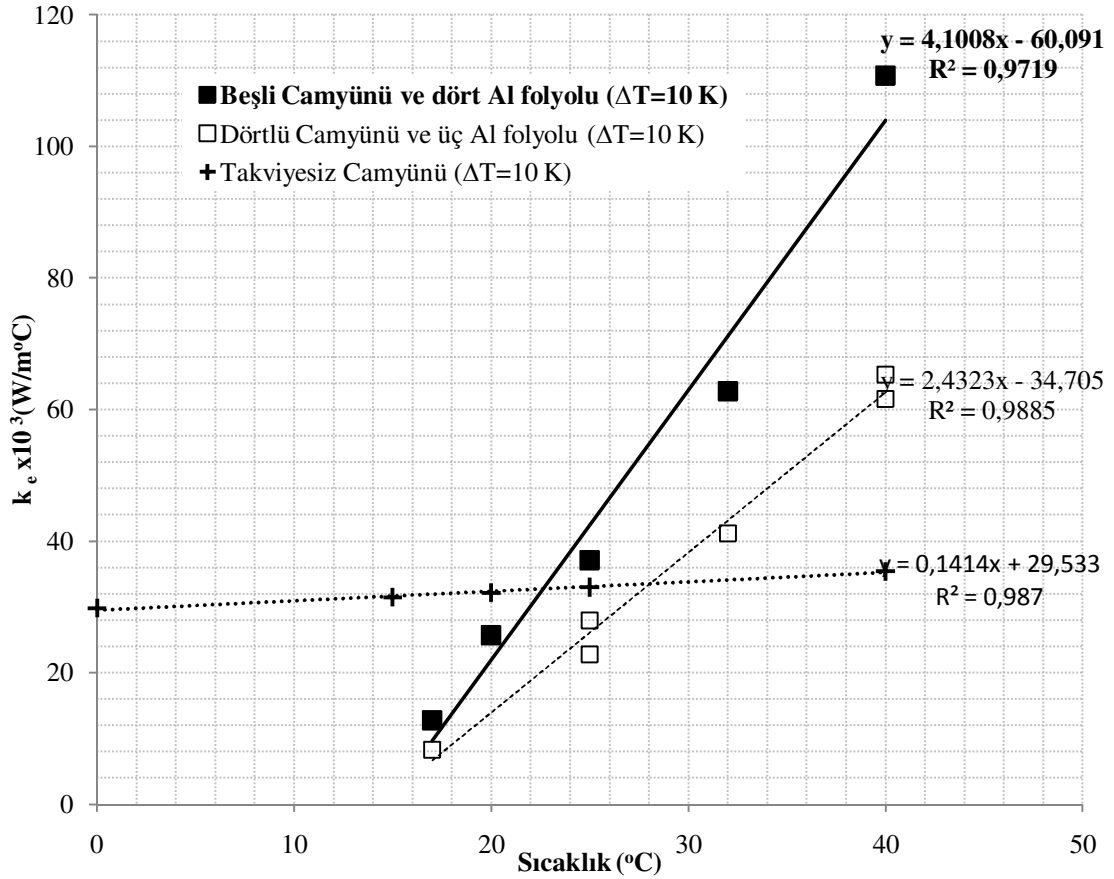
Takviyeli dör t l ü camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliği, takviyeli üçlü camyünü numunesine göre sıcaklık farkıyla artmaktadır. 40 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikler, sırasıyla 0,0951 W/mK, 0,0634 W/mK ve 0,05548 W/mK olarak ölçüldü. Bu farklılık, daha düşük sıcaklıkta ve sıcaklık farkında artmaktadır. Bu durum, 32 °C işletme sıcaklığı ve altındaki sıcaklıklarda, değişmektedir. 25 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenlikler, sırasıyla 0,02145 W/mK, 0,02538 W/mK ve 0,02904 W/mK olarak ölçüldü. 10 K sıcaklık farkı için, takviyeli üçlü camyünü numunesine göre %54,83 daha düşük efektif ısı iletkenlik elde edildi.

Tabaka ve takviye sayısının artışıyla, düşük sıcaklıklarda daha iyi efektif ısı iletkenliklere ulaşılabilirken yüksek sıcaklıklarda tam tersi durum söz konusudur. Yüksek sıcaklıklarda, yansıtıcının ışı nım özelliği etkisiyle efektif ısı iletkenlik değerleri etkilenmektedir. Ancak kritik işletme sıcaklıkları altında bu numunelerin efektif ısı iletkenlikleri, ışı nım özelliğinden, hatta taşınım ısı iletkenlik ve difüzyonla ısı iletkenlik özelliğinden farklı bir parametrenin etkisinde kaldığını göstermektedir.

3.4.3.3. Takviyeli dör t l ü ve beşli camyünü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştı rması

Takviyeli üçlü ve dör t l ü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri, farklı sıcaklıklarda karşılaştı rıldı. Bu karşılaştı rma, Şekil.3.25'de takviyesiz camyünü ile yapıldı. Şekil incelendiğinde, takviyeli beşli camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliklerinin bütün sıcaklıklarda yükseldiği görülmektedir. Takviyeli dör t l ü camyünü numunesi efektif ısı iletkenliği, 10 K sıcaklık farkında 17 ve 40 °C sıcaklıkta, 0,00826 W/mK ve 0,06347 W/mK'dir. Takviyeli beşli camyünü numune efektif ısı iletkenlikleri

iletkenliği ise, yaklaşık olarak 0,01273 W/mK ve 0,11075 W/mK olarak bulundu. Bu, bu sıcaklıklarda %54,11 ve %74,49 daha yüksek efektif ısıl iletkenlik demektir. Bu farklılık daha düşük sıcaklıkta azalmakta ve yüksek sıcaklıkta artmaktadır. Daha iyi bir yalıtımın belirli sıcaklıklarda sağlanabileceği görölmektedir. Takviyeli dörtlü camyünü numunesinin kritik işletme sıcaklığı 28 °C iken, üçlü camyünü numunesinin 23 °C'ye düşmektedir. Bu, takviyeli malzemenin kullanım sıcaklığı açısından önemlidir.

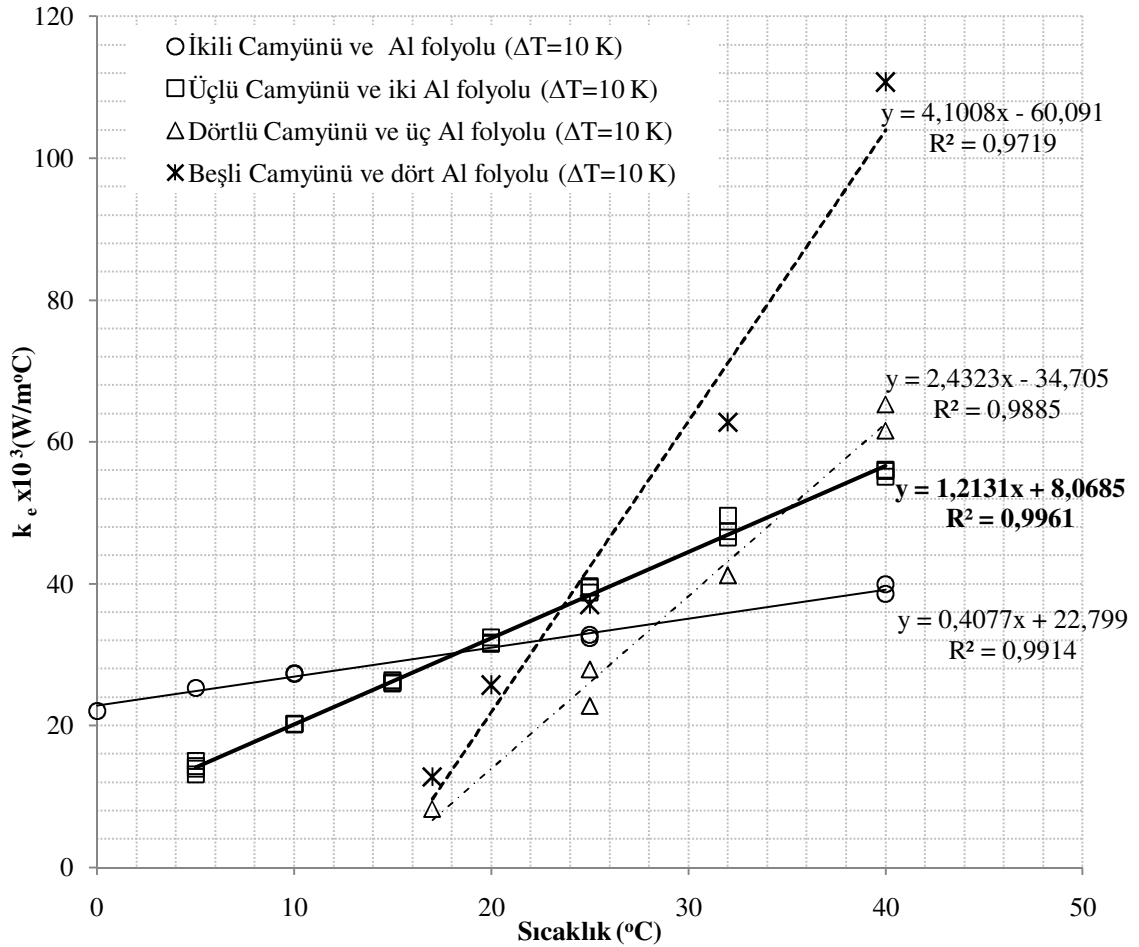


Şekil.3.25. Üç Al folyolu dörtlü camyünü ile dört Al folyolu beşli camyünü numunelerinin efektif ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Takviyeli dörtlü camyünü numunesinin efektif ısıl iletkenlikleri, sıcaklık farkı açısından ele alındı. 40 °C sıcaklıkta ve 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında sırasıyla 0,0951 W/mK, 0,0634 W/mK ve 0,05548 W/mK'dir. 25 °C sıcaklıkta ise, 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında sırasıyla 0,02145 W/mK, 0,02538 W/mK ve 0,02904 W/mK'dır. Sıcaklık farkı, takviyeli numunenin efektif ısıl iletkenliğini arttıran ve azaltan bir etkiye sahiptir. 17 ve 40 °C sıcaklık aralığında, efektif ısıl iletkenlik değerleri yansıtıcı ve tabaka nedeniyle yüksektir.

3.4.3.4. Takviyeli camyünü numunelerin efektif ısıl iletkenliklerinin karşılaştırması

Takviyeli ikili, üçlü, dördü ve beşli camyünü numunelerinin efektif ısıl iletkenlikleri, karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma, 10 K sıcaklık farkı için Şekil.3.26'da yapıldı.



Şekil.3.26. Takviyeli camyünü numunelerinin 10 K sıcaklık farkında efektif ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

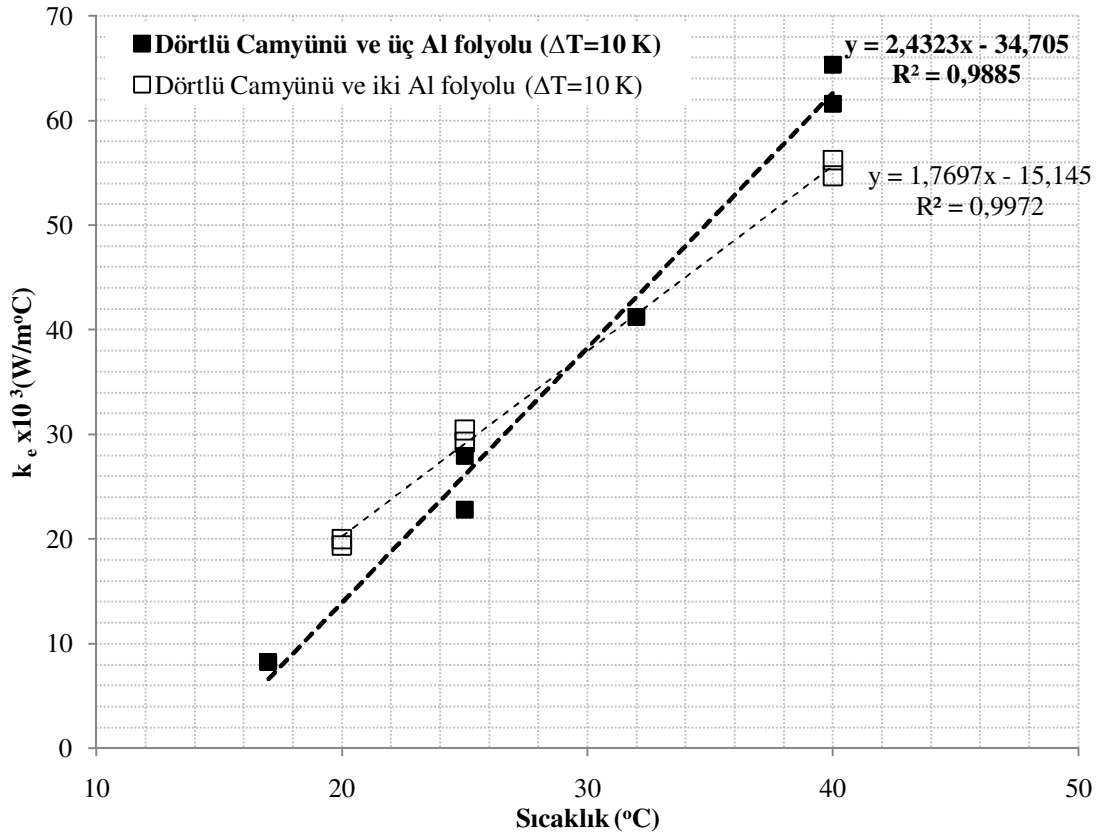
Şekil incelendiğinde, ortalama 25 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta efektif ısıl iletkenlik değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Ancak, diğer sıcaklıklarda farklı etkiler oluşmaktadır. Tabaka ve takviye sayısının artışıyla, düşük sıcaklıklarda daha iyi efektif ısıl iletkenliklere ulaşılabilirken yüksek sıcaklıklarda tam tersi durum söz konusudur. Ancak, bu durum kritik işletme sıcaklığına göre efektif ısıl iletkenliklerdeki sapmalar değişebilmektedir. Bu, takviye ve tabaka sayısı ayrı ayrı değerlendirilerek gözlemlenebilir.

3.4.4. Takviye sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

Gözenekli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri, aynı tabaka sayısında farklı takviye sayılarında ele alındı. Takviye sayısının iki, üç ve dört olması durumuna göre camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri incelendi. Burada, sıcaklık farklarının etkisi de ele alınmamaktadır.

3.4.4.1. Dörtlü camyünü numunesinde takviye sayısının etkisi

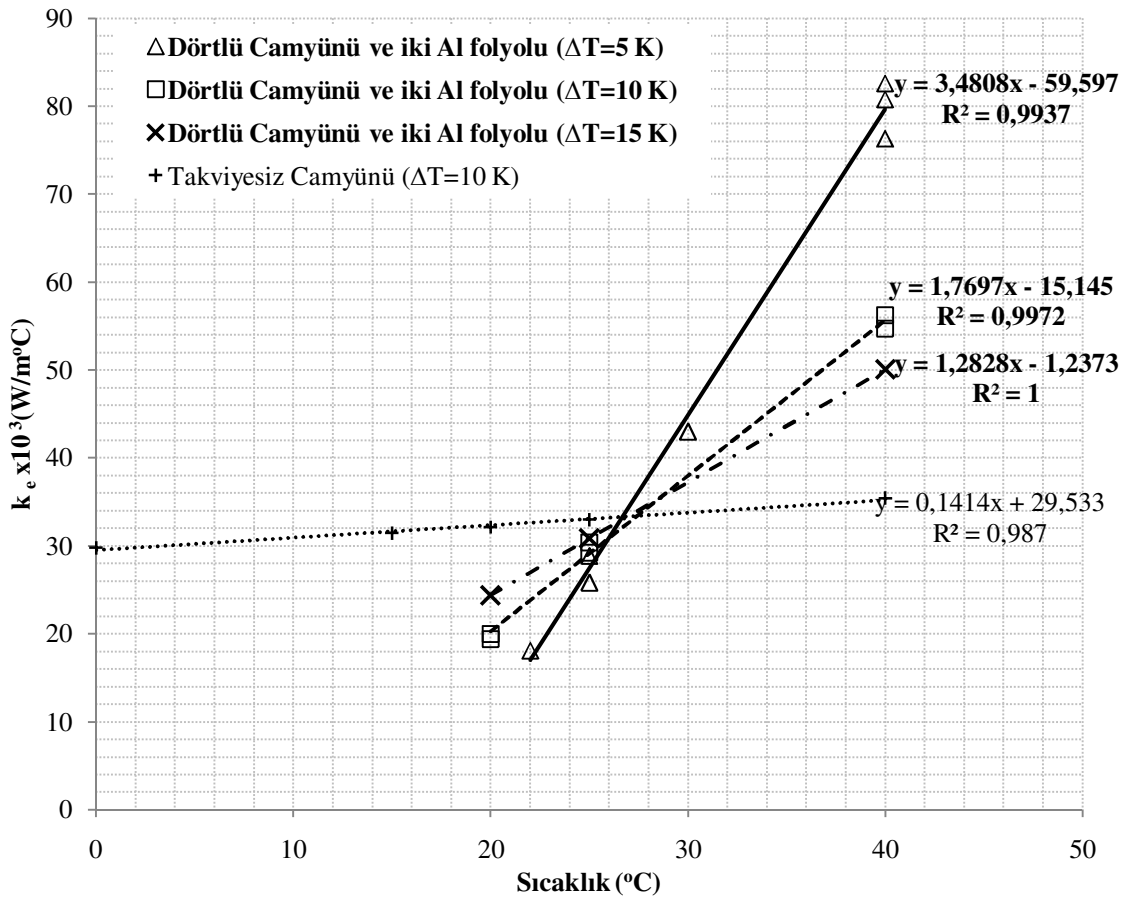
Dörtlü camyünü numune, üç alüminyum folyo yerine iki alüminyum folyo takviyesi yapılarak efektif ısı iletkenliği belirlendi. İki ve üç alüminyum folyolu dörtlü numunede gerçekleştirilen efektif ısı iletkenlik değerleri, Şekil.3.27’de 10 K sıcaklık farkında karşılaştırılmaktadır.



Şekil.3.27. Üç Al folyolu ve iki Al folyolu (ortası takviyesiz) dörtlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırılması

Şekil.3.27 incelendiğinde, takviye sayısının artması yüksek sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliği arttırmaktadır. 30 °C altındaki sıcaklıklarda ise, efektif ısı iletkenliği azaltmaktadır. Takviye sayısı artışıyla, 20 °C sıcaklıkta yaklaşık %29,19 azalma gözlemlendi. 40 °C sıcaklıkta ise, yaklaşık %14,37 artmaktadır. Takviye sayısıyla, düşük efektif ısı iletkenlikler elde edildiği düşünülebilir.

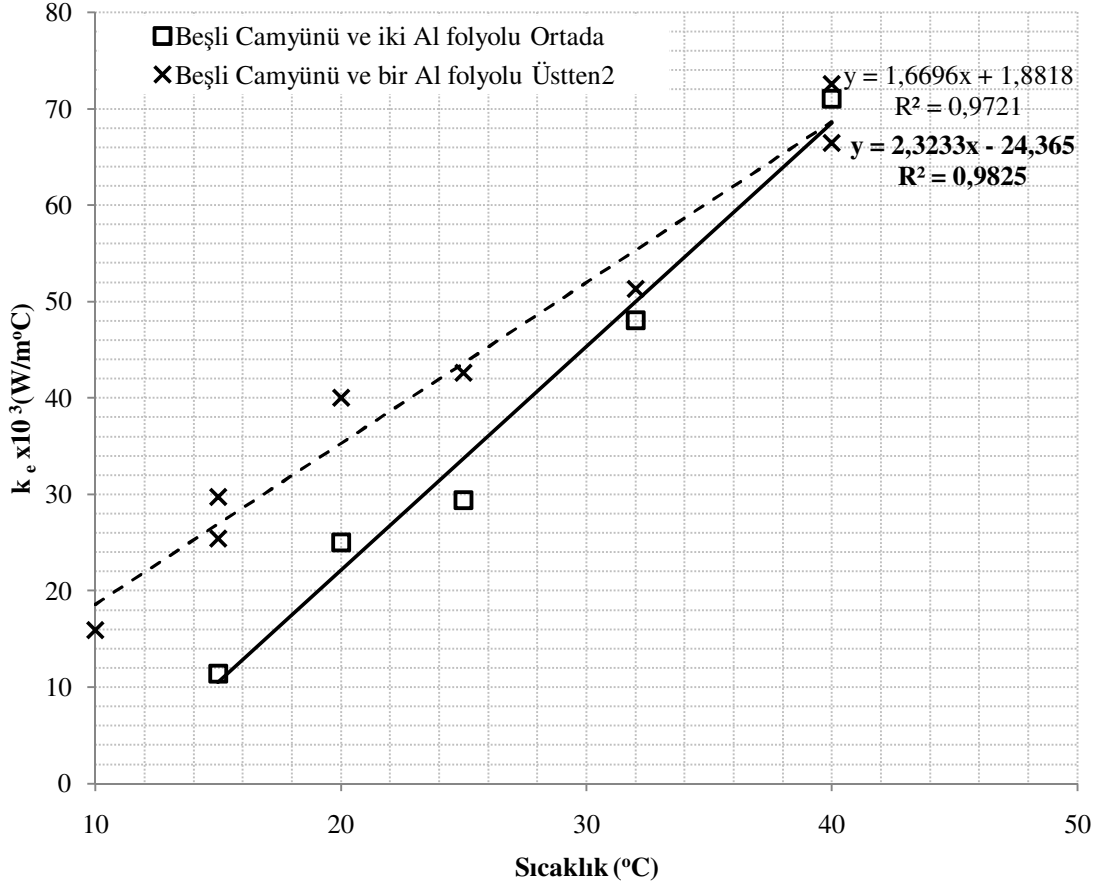
İki Al folyo ve ortası takviyesiz olan numunenin efektif ısı iletkenliği, farklı sıcaklık farklarında ele alınarak Şekil.3.28’de incelendi. Dörtlü numunede iki alüminyum folyo kullanarak numunenin ortasının boşaltılmasıyla, efektif ısı iletkenlik kritik işletme sıcaklığı (28 °C) değişmemektedir. 40 °C sıcaklıkta ve 5 K sıcaklık farkında ortalama 0,07856 W/mK, efektif ısı iletkenlik elde edildi. 20 ve 25 °C işletme sıcaklıklarında takviyesiz numuneye göre % 38,46 daha düşük efektif ısı iletkenlik değerine sahiptir.



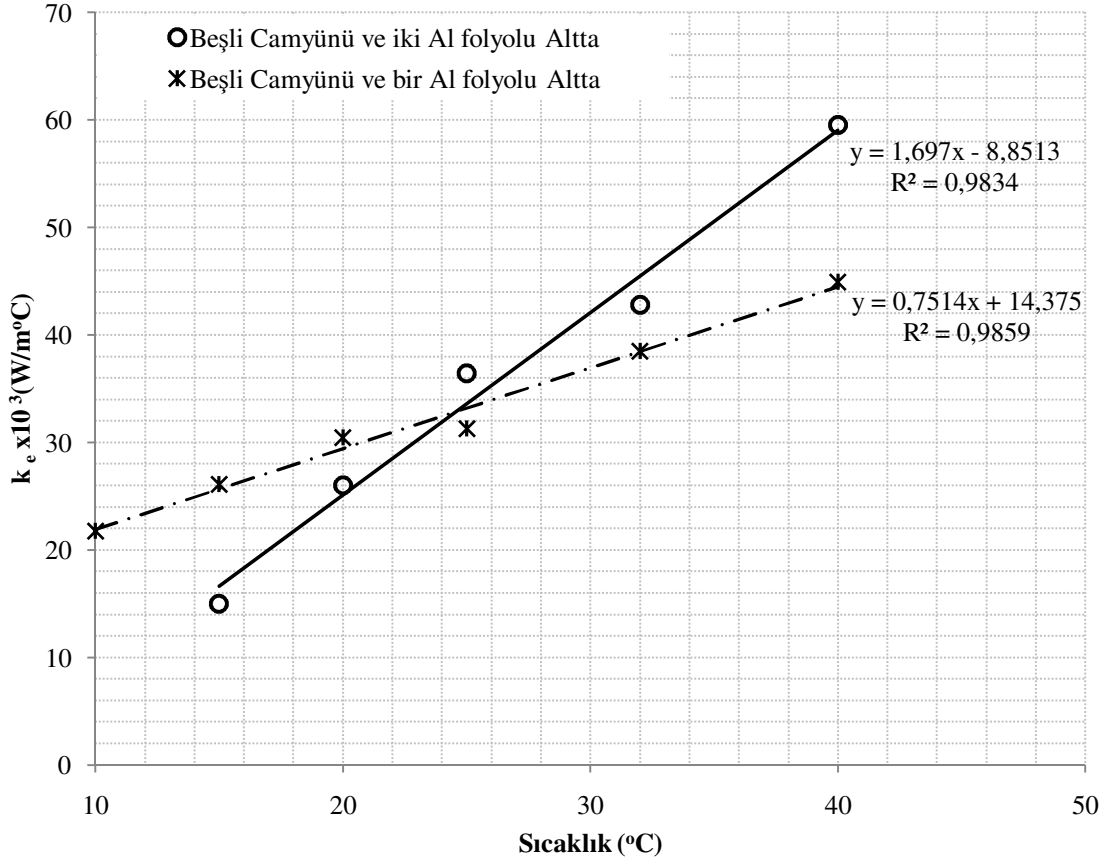
Şekil.3.28. İki Al folyolu (ortası takviyesiz) dörtlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

3.4.4.2. Beşli camyünü numunesinde takviye sayısının etkisi

Beşli camyünü numunesinde, farklı sayılarda takviyeler kullanıldı. İlk olarak, dört alüminyum folyo takviyesi ve ardından sırasıyla bir, iki, üç alüminyum folyo takviyeleri yapıldı. Sonra, efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Bir veya iki alüminyum folyo takviyenin beşli camyünü numunede farklı konumlandırılmasıyla elde edilen efektif ısı iletkenlikler, Şekil.3.29’da karşılaştırılmaktadır. Burada, 10 K sıcaklık farkı için sıcaklıkla değişimine göre takviye sayısının etkisi verilmektedir. Bir alüminyum folyo, beşli camyünü numunesinin üstten ikinci-üçüncü tabaka arasına ve alttaki iki tabaka arasına yerleştirildi. Bu numuneler, “1 Al folyolu Üstten2” ve “1 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı. Ayrıca, beşli camyünü numunesinin ortadaki üç tabaka arasına ve alttan üç tabaka arasına iki alüminyum folyo yerleştirildi. Bu numuneler, “2 Al folyolu Üstte”, “2 Al folyolu Ortada” ve “2 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı.



(a)



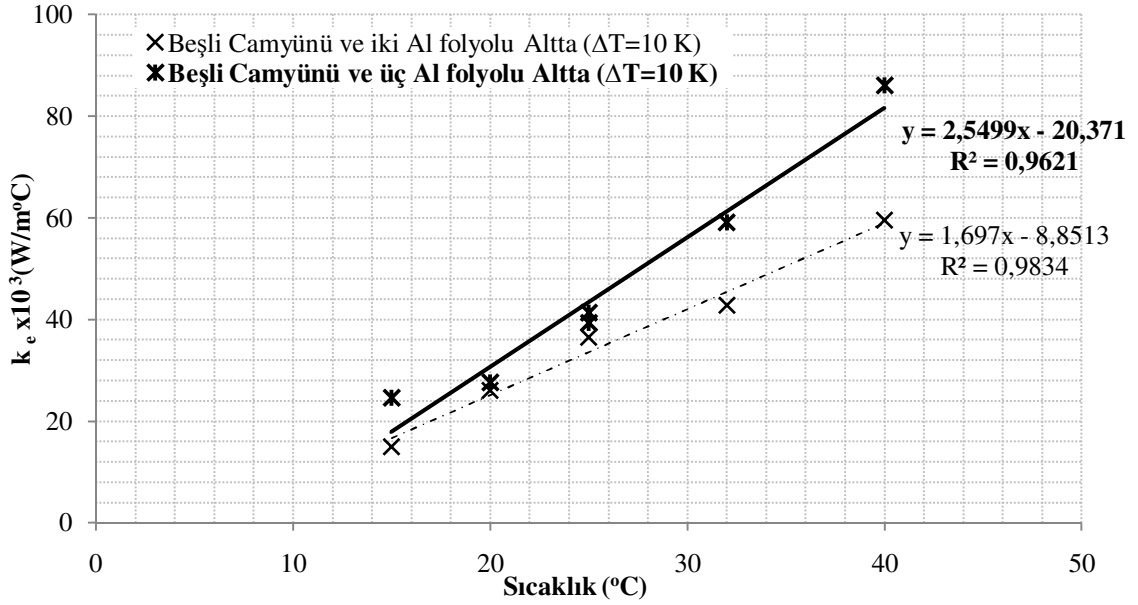
(b)

Şekil.3.29. Tek ve iki alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin farklı konumlandırılmış olarak efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

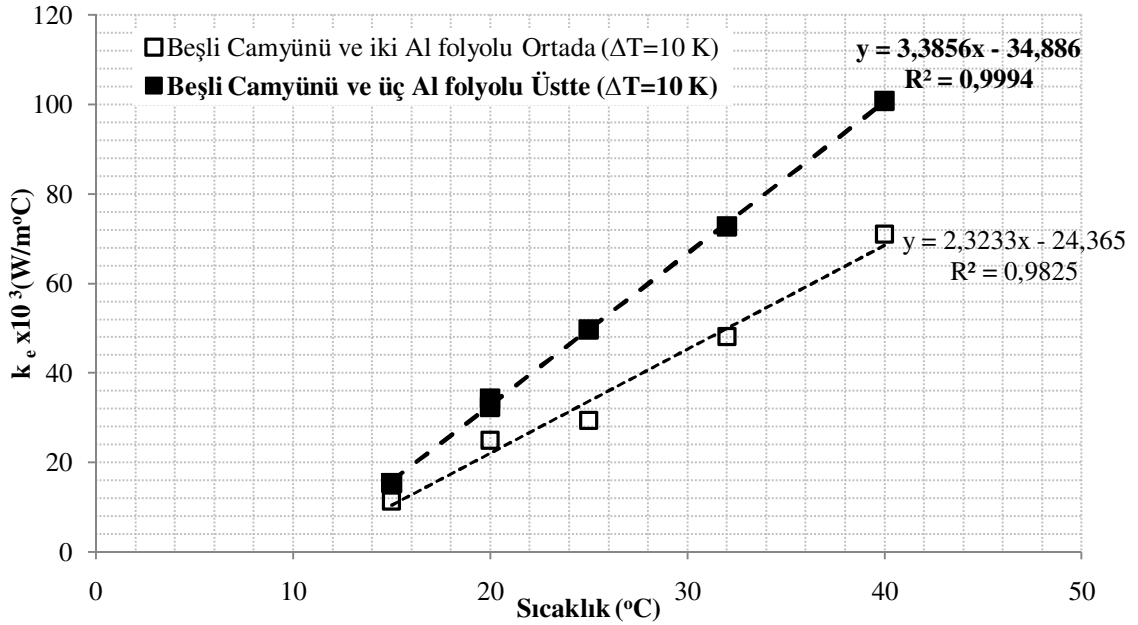
Şekil.3.29 incelendiğinde, takviye sayısının artışının numunenin efektif ısı iletkenliğini azalttığı görülmektedir. Bu durum, “bir Al folyolu Üstten 2” ve “iki Al folyolu Ortada” numunelerde 32 °C sıcaklık altında gözlemlendi. 15 °C sıcaklıkta, %58,72 azalmaktadır. Aynı zamanda, “iki Al folyolu Altta” ve “bir Al folyolu Altta” bulunan numunelerde 25 °C sıcaklık altında değiştiği görülmektedir. 15 °C sıcaklıkta, %42,49 azalmaktadır. Takviye konumunun etkisi ise, beşli camyünü numunesinin ortasına ve altına konulanan takviyeler ele alınarak ihmal edildi. Diğer konumlandırılmalar, takviye konumunun etkisi altında ele alındı.

İki veya üç alüminyum folyo takviyenin beşli camyünü numunesinde konumlandırılmasıyla elde edilen efektif ısı iletkenlikler, Şekil.3.30’da verilmektedir. Burada, 10 K sıcaklık farkı için takviye sayısının etkisi ele alınmaktadır. Beşlicamyünü tabakalarından üstteki iki tabaka arası boş bırakılarak diğer alt tabakalar arasına takviye

edildi. Bu ise “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı. Şekilde, kalın çizgiler üç alüminyum folyolu numuneleri, ince çizgiler iki alüminyum folyolu numuneleri göstermektedir. Ayrıca üstteki tabakalar arasında folyolar yerleştirilirken en alt ve bir üst tabakası boş bırakıldı. Bu numune “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Üstte” olarak adlandırıldı.



(a)

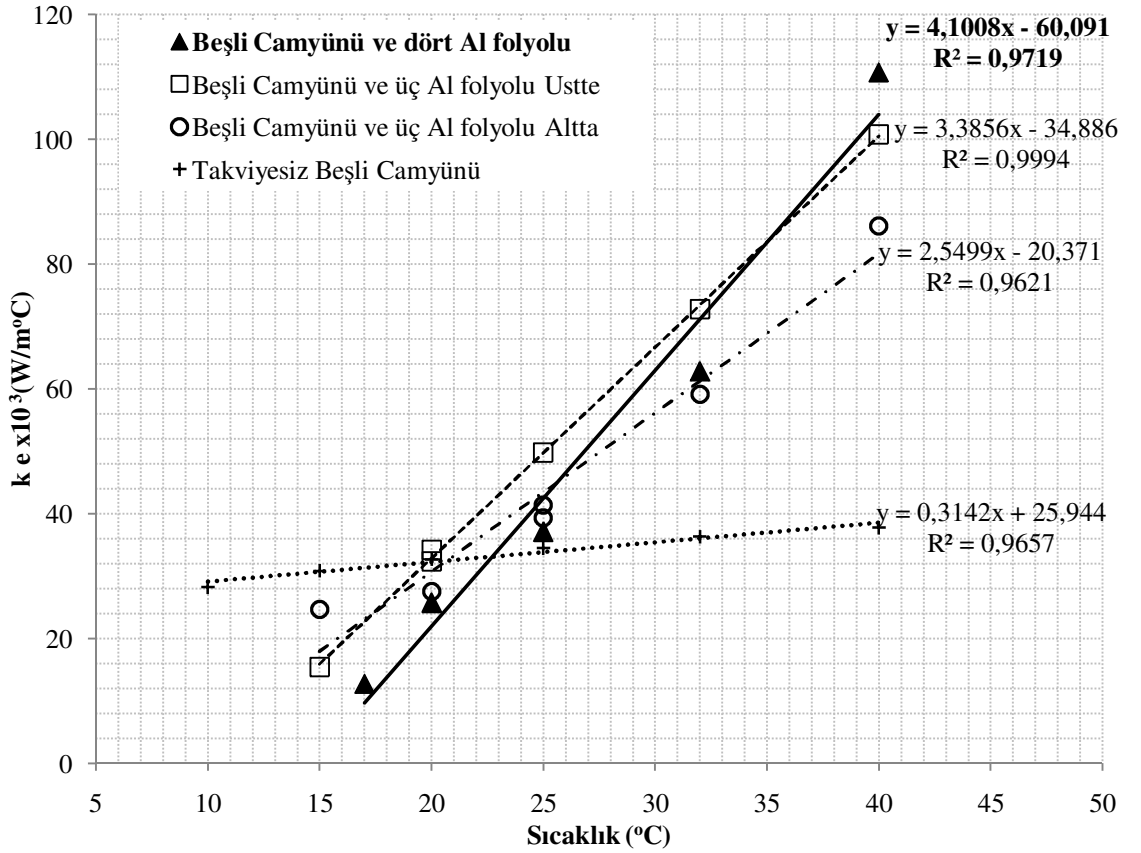


(b)

Şekil.3.30. İki ve üç alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin farklı konumlandırılmış olarak efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

Takviye sayısının etkisi, beşli camyünü numunesinin farklı konumlamaları için takviyeler ele alınarak irdelendi. Beşli camyünü numunesinde üç alüminyum folyonun ortaya takviyesi yapılarak efektif ısı iletkenliği ölçülmedi. Şekil.3.30 incelendiğinde, takviye sayısı artışının numunenin efektif ısı iletkenliğini arttırdığı görülmektedir. Bu artış, 15 °C sıcaklığın üzerinde gerçekleşmekte ve olumsuz hale getirmektedir. Şekil.3.30(a)'da “üç Al folyolu Altta” numunelerin efektif ısı iletkenliği, “iki Al folyolu Altta” numuneye göre 40 °C’de % 44,64 artmaktadır. Ayrıca, Şekil.3.30 (b)’de, “üç Al folyolu Üstte” numunelerin efektif ısı iletkenliği, “iki Al folyolu Ortada” numuneye göre 40 °C’de % 41,99 artmaktadır.

Beşli cam yünü numunesinde, üç ve dört alüminyum folyonun kullanılmasıyla yapılan ölçümlerde karşılaştırıldı. Şekil.3.31’de “Beşli Camyünü ve 4 Al folyolu”, “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Üstte” ve “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Altta” numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri verilmektedir.



Şekil.3.31. Beşlicam yünü tabakalı numunelerde üç ve dört alüminyum folyo takviyesine göre efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması (10 K sıcaklık farkı)

Şekil.3.31 incelendiğinde, takviye sayısının artışının numunenin efektif ısı iletkenliğini 32 °C sıcaklık altında azalttığı görülmektedir. Ancak, üzeri sıcaklıkta yüksek efektif ısı iletkenlik vermektedir. Burada, takviye sayısının artışı 40 °C sıcaklıkta % 9,8 veya % 22,27 daha yüksek efektif ısı iletkenliğe neden olmaktadır. Buna karşın, takviye sayısının artışıyla 25 °C sıcaklıkta % 8,04 veya % 25,48 daha düşük efektif ısı iletkenliğe ulaşıldı. Ayrıca, 15 °C sıcaklıkta ortalama % 94,23 daha düşük efektif ısı iletkenlik elde edildi.

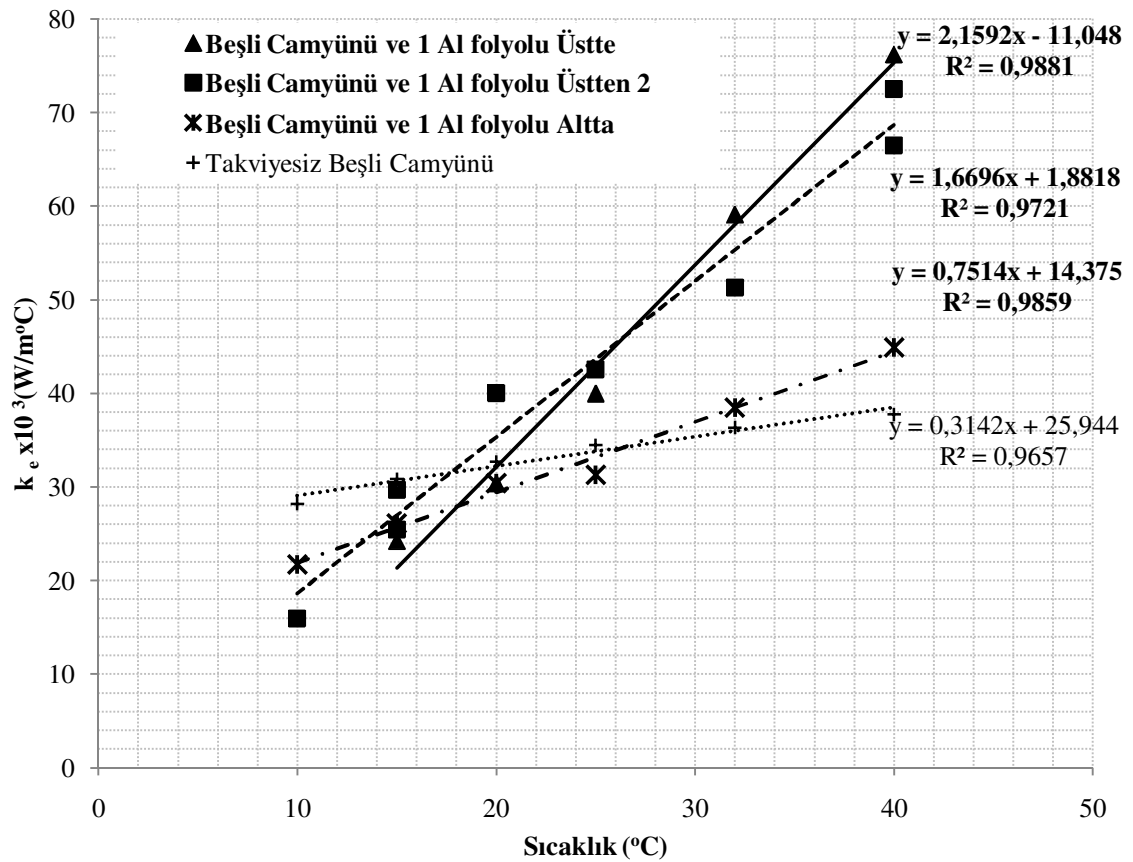
Aynı tabaka sayısında takviye sayısının artışıyla, yüksek sıcaklıklarda (40 °C) efektif ısı iletkenlikler artmaktadır. Ancak, düşük sıcaklıklarda efektif ısı iletkenlik değeri belirli sıcaklıklarda artmakta yada azalmaktadır. Bu, takviye sayısının değişimine bağlı gözlenmektedir. Burada, 25 °C ve altı sıcaklıklarda takviye sayısı önemli olmaktadır. Efektif ısı iletkenlikteki değişimler, yansıtıcının ışınım özelliği nedeniyle açıklanabilir. Ancak kritik işletme sıcaklıkları altında bu numunelerin efektif ısı iletkenlikleri, ışınım özelliğinden, hatta taşınım ile ısı iletkenlik ve difüzyonla ısı iletkenlik özelliğinden farklı bir parametrenin etkisinde kaldığını göstermektedir.

3.4.5. Takviye konumunun efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

Beşli camyünü numunesi efektif ısı iletkenlik ölçümleri, alüminyum folyonun konumu değiştirilerek gerçekleştirildi. Burada, folyo sayısı sabit tutularak irdelendi. Farklı folyo sayılarında (bir, iki, üç) ele alınarak genişletildi. İlk olarak, beşli camyününde bir alüminyum folyonun farklı konumlarındaki ölçümleri Şekil.3.32’de verilmektedir. Burada, beşli camyünü numunesinin üstteki iki tabakası arasına, üstten ikinci-üçüncü tabaka arasına ve alttaki iki tabaka arasına bir alüminyum folyo yerleştirildi. Bu numuneler, “1 Al folyolu Üstte”, “1 Al folyolu Üstten2” ve “1 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı ve ayrı ayrı değerlendirildi.

Şekil.3.32 incelediğinde; farklı konumlanan alüminyum folyo takviyesinin, beşlicamyünü takviyesiz numuneden farklıdır. Beşli camyünü tabakalı numunede, bir alüminyum folyonun alttan üste konumlandırılmasıyla efektif ısı iletkenlik artmaktadır. Özellikle, 25, 32 ve 40 °C sıcaklıklarda bu farklılık görülmektedir. Bu sıcaklıklarda,

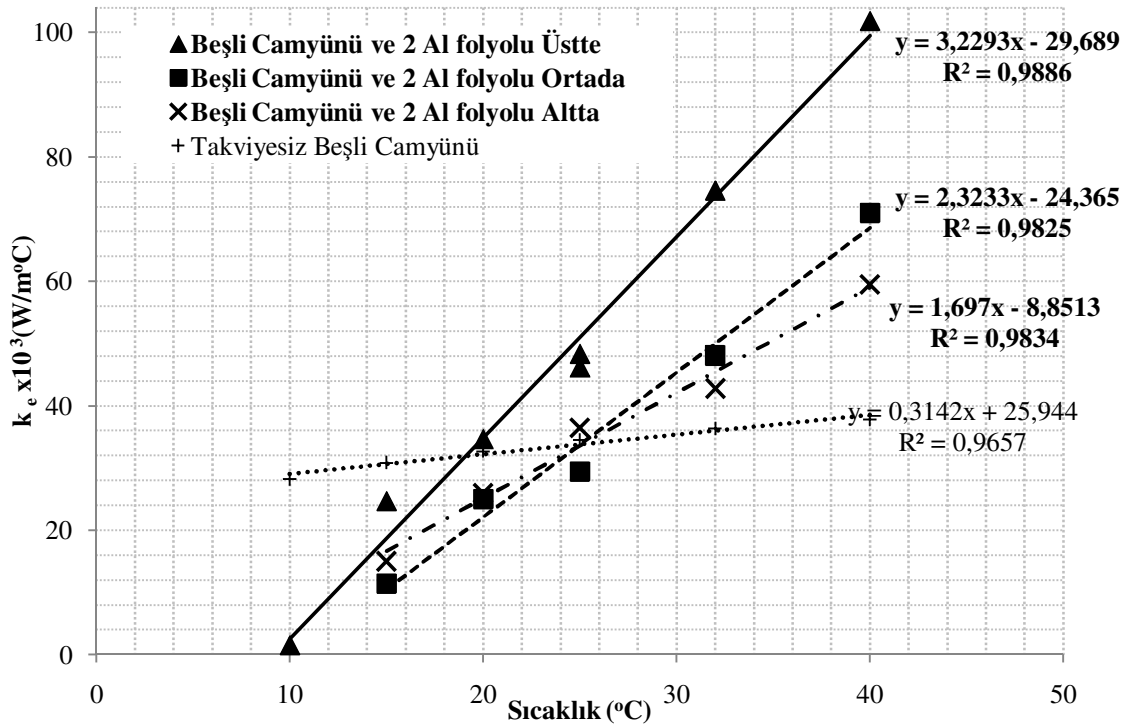
%27,66, %53,48 ve %69,64 artmaktadır. Buradan, “takviye konumu sıcak yüzeye yaklaştıkça efektif ısı iletkenliğinin arttığı” sonucuna varılabilir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliği azalttığı söylenebilir. Efektif ısı iletkenlik, 20 °C sıcaklıkta takviyesiz numuneye göre %6,91 ve 10 °C’de ise %43,49 azalmaktadır. Bununla birlikte bir alüminyum folyonun altta konumlanması, bu sıcaklığın hem altında hem de üstünde uygun sonuçlar verdi. Bu sıcaklığın altında daha düşük efektif ısı iletkenlik elde edilirken bu sıcaklığın üstünde takviyesiz numuneye yakın sonuçlar saptandı.



Şekil.3.32. Farklı konumlandırılmış bir alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Beşli camyününde iki alüminyum folyonun farklı konumlarındaki ölçümleri ise, Şekil.3.33’de verilmektedir. Burada, beşli camyünü numunesinin üstten üç tabaka arasına, ortadaki üç tabaka arasına ve alttan üç tabaka arasına iki alüminyum folyo yerleştirildi. Bu numuneler, “2 Al folyolu Üstte”, “2 Al folyolu Ortada” ve “2 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı ve ayrı ayrı değerlendirildi.

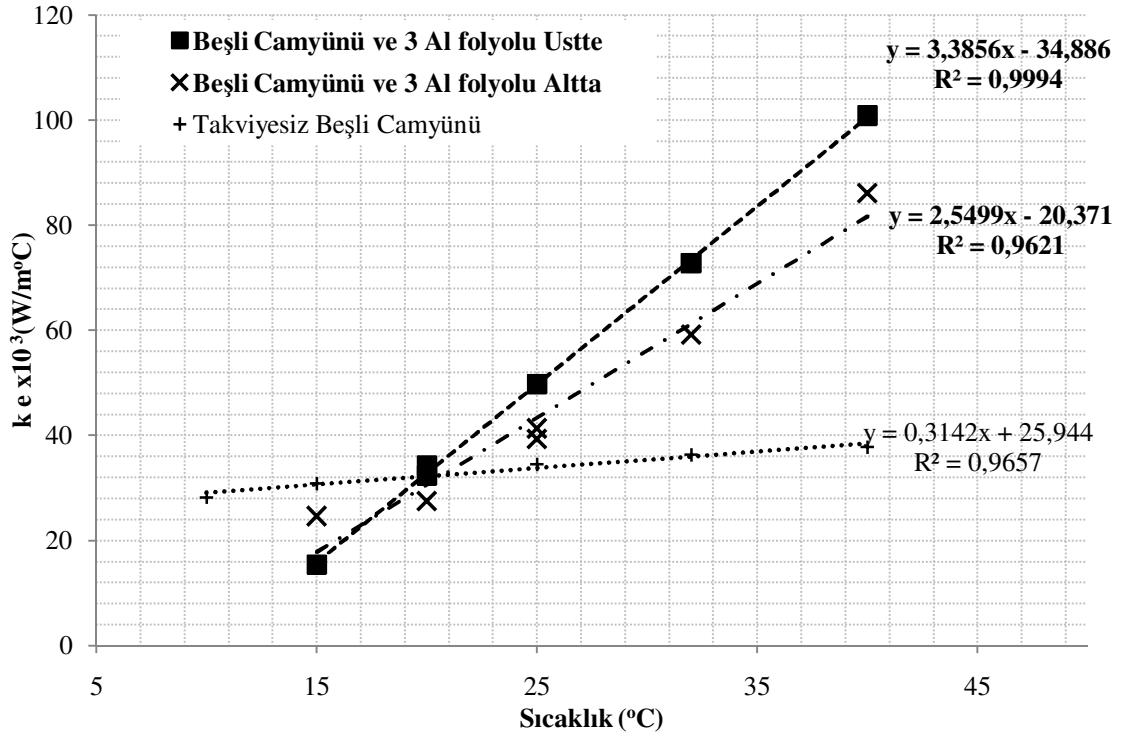
Şekil.3.33 incelediğinde; farklı konumlanan iki alüminyum folyo takviyesi, beşlicamyünü takviyesiz numunede farklı sonuçlar üretmektedir. Beşli camyünü tabakalı numunede, iki alüminyum folyonun alttan üste konumlandırılmasıyla efektif ısı iletkenlik artmaktadır. Özellikle, 25, 32 ve 40 °C sıcaklıklarda bu farklılık görülmektedir. Bu sıcaklıklarda, %32,51, %74,15 ve %71,06 artmaktadır. Bu durum, bir alüminyum folyolu da da gözlemlendi. Tek alüminyum folyolu numuneye göre, efektif ısı iletkenliğinin artışı 40 °C dışında aynıdır. Bu, hem takviye sayısının hem de takviye konumunun etkisini gösterdi. Buradan, “takviye konumu sıcak yüzeye yaklaştıkça efektif ısı iletkenliğinin arttığı” sonucuna varılabilir. Takviye sayısı arttıkça, 40 °C’de bu artışın yükseldiği de görülebilir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliğinin takviyesiz numuneye göre azaldığı söylenebilir. Efektif ısı iletkenlik, 20 °C sıcaklıkta %23,58 ve 10 °C’de ise %94,68 azalmaktadır. Bu farklılıktan, bir alüminyum folyolu numuneye göre daha iyi bir efektif ısı iletkenlik üretildiği görülebilir.



Şekil.3.33. Farklı konumlandırılmış iki alüminyum folyolu beşlicamyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Takviye konumunun etkisi, beşlicamyünü tabakalı numunesinde farklı konumlandırılmış üç alüminyum folyo olarak ele alındı. Bu üç folyo, beşlicamyünü

numunesindeki üstteki tabakalar arasına yerleştirilirken en alt ve bir üst tabaka arası boş bırakıldı. Bu numune “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Üstte” olarak adlandırıldı. Ayrıca bu üç folyo ile farklı bir konumlandırma yapıldı. Beşlicamyünü tabakalarından üstteki iki tabaka arası boş bırakılarak diğer alt tabakalar arasına takviye edildi. Bu ise “Beşli Camyünü ve 3 Al folyolu Altta” olarak adlandırıldı. Bu numuneler, farklı sıcaklıklarda ölçülerek Şekil.3.34’de karşılaştırılmaktadır.



Şekil.3.34. Farklı konumlandırılmış üç alüminyum folyolu beşli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması

Şekil.3.34 incelendiğinde, tabakalı numunede takviyenin konumunun değiştirilmesiyle efektif ısı iletkenlik sonuçlarının değiştiği görülmektedir. Beşlicamyünü tabakalı numunede alüminyum folyonun alt konumdan üst konuma geçilmesiyle efektif ısı iletkenlikler artmaktadır. 25 °C sonrası sıcaklıklar için efektif ısı iletkenlik % 26,55, % 12,98, % 16,29 farkla artmaktadır. Bu, bir ve iki alüminyum folyo takviyesinin konum değiştirmesi sonucu elde edilen efektif ısı iletkenliklerin artışından daha düşüktür. Bu, 32 ve 40 °C sıcaklıklarda görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda (20 °C ve altı) efektif ısı iletkenlik takviyesiz numuneye göre azalmaktadır. Bu, 15 °C sıcaklıkta %50,14 olarak elde edildi.

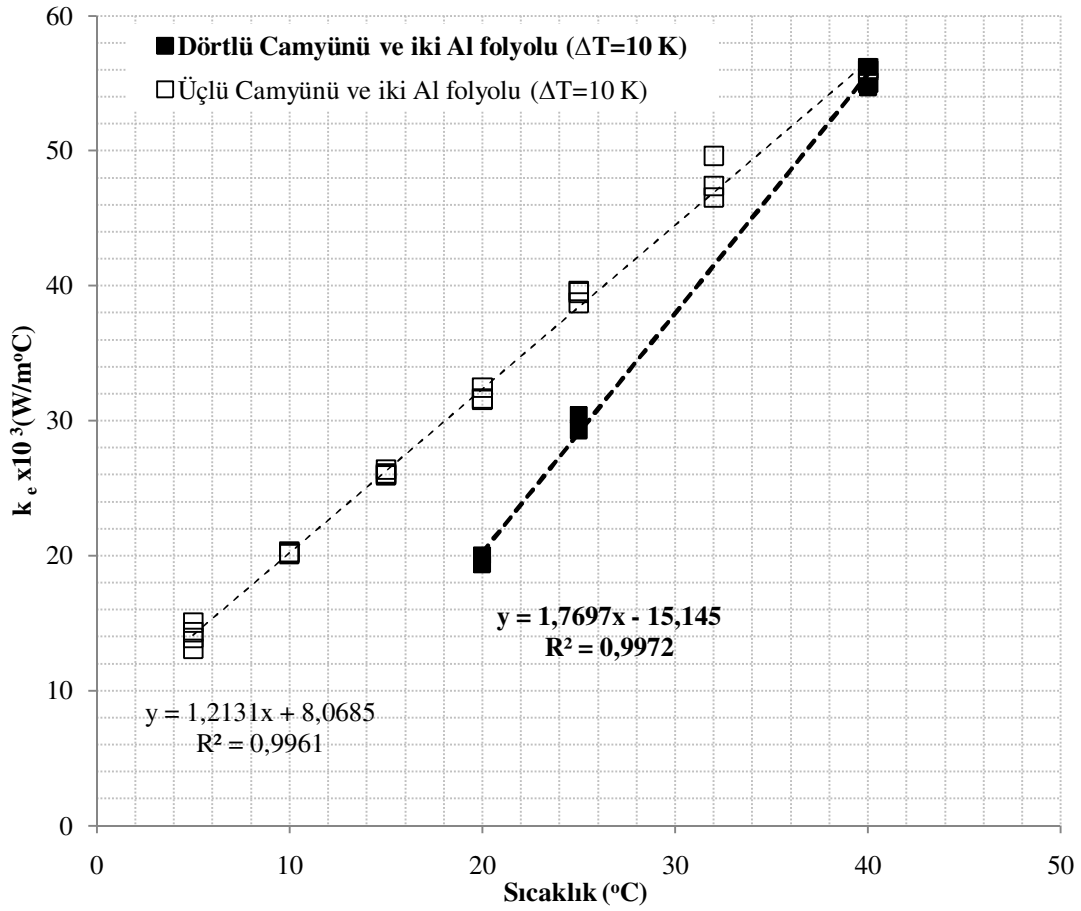
Sonuç olarak, yüksek sıcaklık tarafına yerleştirilen alüminyum folyo, ışınlam nedeniyle daha fazla efektif ısı iletkenliğin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, takviye sayısı arttıkça aynı oranda etki etmediği gibi düşük sıcaklığa doğru (40 °C'den 32 °C'ye) etki oranı azaldığı görüldü. Düşük sıcaklıklarda (20 °C ve altı), efektif ısı iletkenlik takviye konumundan büyük oranda etkilenmemekte ve takviyesize göre daha iyi efektif ısı iletkenlikler elde edildi. Buradan, "takviye konumu sıcak yüzeye yaklaştıkça efektif ısı iletkenliğin arttığı" sonucuna varılabilir. Takviye sayısı arttıkça, 40 °C'de bu artışın değişebildiği sonucu da ilave edilmelidir. Ayrıca, "takviye ile düşük sıcaklıklarda düşük bir efektif ısı iletkenlik elde edilebildiği" sonucu da unutulmamalıdır. Yansıtıcı özellikli bir Al folyo takviyenin ve konumunun efektif ısı iletkenlikte değişime neden görüldü.

3.4.6. Tabaka sayısının efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

İki, üç alüminyum folyo takviyeli farklı kalınlıktaki camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlik ölçümleri, tabaka sayısına göre karşılaştırıldı. Burada, folyo sayısı sabit tutularak farklı camyünü numune tabakaları (üçlü, dörtlü ve beşli) ele alındı. İlk olarak, iki alüminyum folyolu üçlü ve dörtlü camyünü numunelerinin ölçümleri Şekil.3.35'de verilmektedir. Burada, farklı sıcaklık farklarında (5, 10 ve 15 K) değerlendirmeleri de gözlemlendi.

Şekil.3.35 incelendiğinde, takviye sayısı sabit alınarak tabaka sayısının etkisi görülmektedir. Burada, tabaka sayısı arttıkça 32 °C ve altı sıcaklıklarda daha düşük efektif ısı iletkenlikler elde edilmektedir. 10 K sıcaklık farkı için, 20 ve 25 °C sıcaklıklarda dörtlü tabakalı camyünü numunenin efektif ısı iletkenliği %38,12 ve %24,03 daha düşüktür. 20 °C'den düşük sıcaklıklarda ölçümler gerçekleştirilebilseydi, eğrinin eğimine göre daha düşük efektif ısı iletkenliklerin elde edilebileceği söylenebilir. 32 ve 40 °C sıcaklıklarda ise, tabaka artışının önemli oranda efektif ısı iletkenlik değişimi meydana getirmediği görülebilir. Burada, dörtlü tabakalı camyününde üç alüminyum folyo olduğu durum irdelenebilir. Şekil.3.24 ve 3.27'den, takviye sayısının iki yerine üç alüminyum folyo olmasıyla 40 °C'de efektif ısı iletkenliğin yükseldiği, 20°C sıcaklık ve altında azaldığı görüldü. Buna göre, takviye

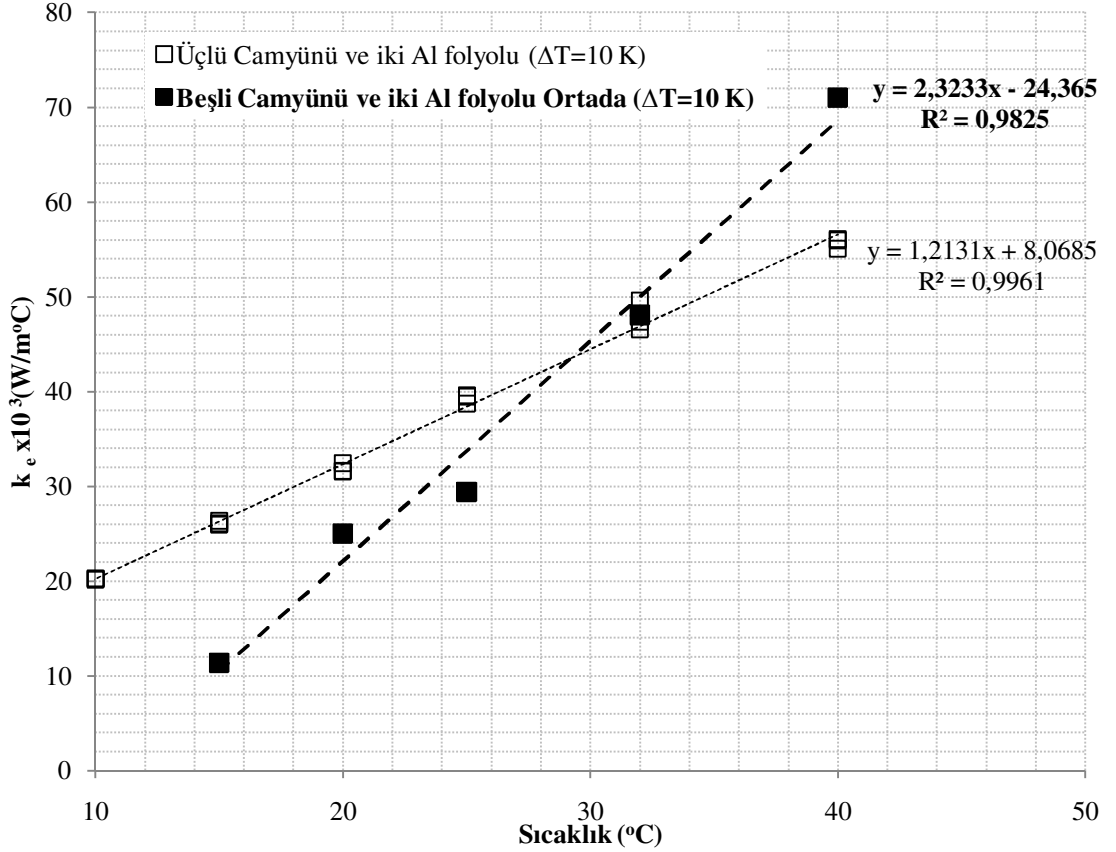
sayısı hem olumlu hem de olumsuz etki edebilmektedir. Burada, iki alüminyum folyolu dördümlü numunede iki folyo arası mesafenin bir tabaka fazla olması unutulmamalıdır. Buradan, tabaka sayısının efektif ısı iletkenliği 32 °C altındaki sıcaklıklarda azalttığı sonucuna varılabilir. 32 °C ve üzeri sıcaklıklarda takviyesiz numuneye göre efektif ısı iletkenliğinin arttığı sonucuna ulaşılabilir.



Şekil.3.35. İki alüminyum folyo ile takviyelenen hem üçlü camyünü numunesinin hem de dördümlü camyünü numunesinin (ortası takviyesiz) efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla karşılaştırılması

Bu ölçüm sonuçları, iki alüminyum folyo takviyeli beşli camyünü numune ile de karşılaştırıldı. Farklı konumlu takviyelendirilmiş beşlicamyünü numunelerin efektif ısı iletkenliği, Şekil.3.36'da iki Al folyo takviyeli üçlü camyünü numune ile karşılaştırılarak verildi. 10 K sıcaklık farkı için, farklı sıcaklıkta ele alındı.

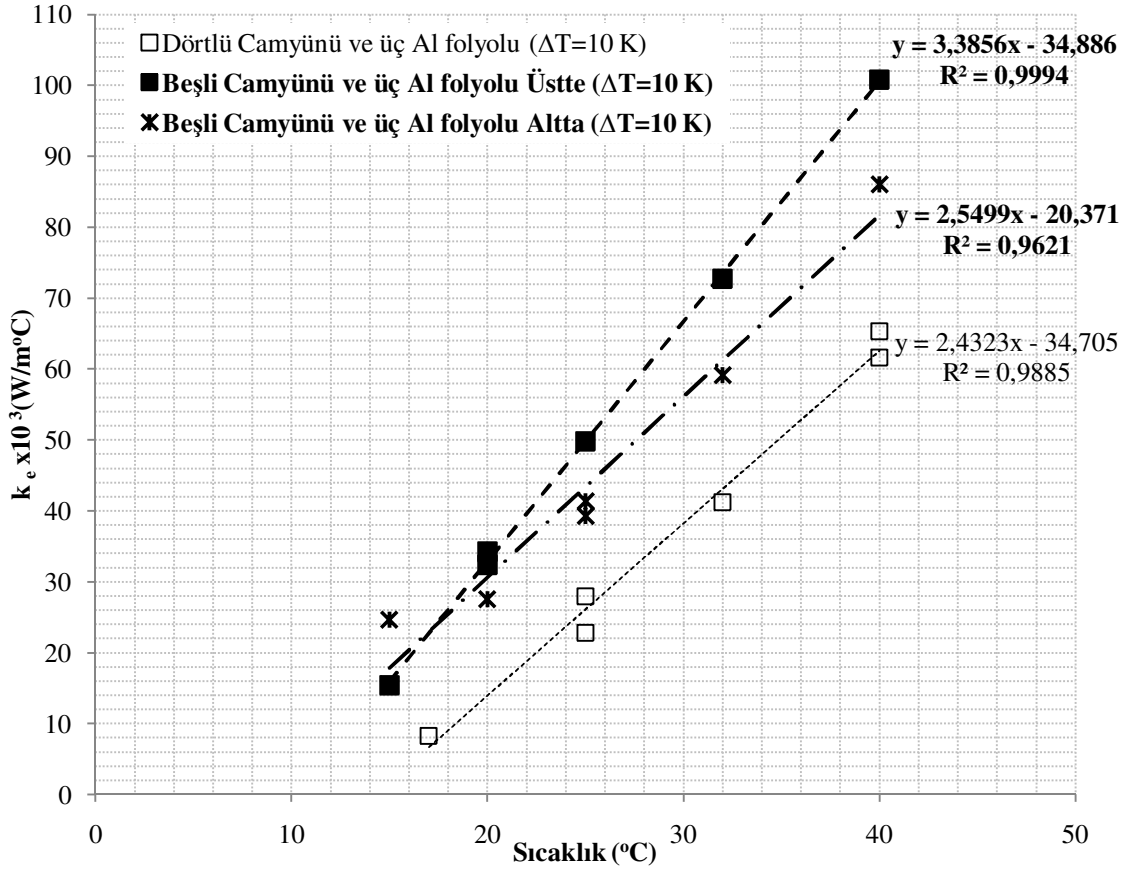
Şekil.3.36 incelendiğinde, aynı takviye sahip (iki alüminyum folyolu) gözenekli ortamda beşli veya üçlü olması efektif ısı iletkenlik sonucunu değiştirdiği görölmektedir. Burada, tabaka sayısı arttıkça 30 °C ve altı sıcaklıklarda daha düşük efektif ısı iletkenlikler elde edilmektedir. 10 K sıcaklık farkı için, 15, 20 ve 25 °C sıcaklıklarda beşli tabakalı numunenin efektif ısı iletkenliği %56,36, %21,49 ve %25,15 daha düşüktür. 32 °C sıcaklıkta, tabaka artışının önemli oranda efektif ısı iletkenlik değişimi meydana getirmediği görölebilir. Ayrıca 40 °C'de efektif ısı iletkenliği %21,57 arttırmaktadır. İki folyo alt tabakalar arasına yerleştirildiğinde ise, iki folyonun ortada yer almasına göre efektif ısı iletkenliğin sıcaklığa göre hem azaldığı hem arttığı göröldü. Üst tabakalar arasında yer aldığında, 10 °C sıcaklıktan sonra efektif ısı iletkenliğin daima arttırdığı gözlemlendi. Bu artış, sıcaklıkla orantılı olmaktadır.



Şekil.3.36. İki alüminyum folyo ile takviyelenen hem dörtlü camyünü numunesinin hem de beşli camyünü numunesinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

Bu ölçüm sonuçları, üç alüminyum folyo takviyeli dörtlü ve beşli camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri ile genişletildi. Farklı konumlu

takviyelendirilmiş beşlicamyünü numunelerin efektif ısı iletkenliği, Şekil.3.37’de üç Al folyo takviyeli dörtlü camyünü numune ile karşılaştırıldı.



Şekil.3.37. Üç alüminyum folyo takviyeli dörtlü cam yünü ile beşlicamyünü numunelerin (farklı konumlu takviyelerle) efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

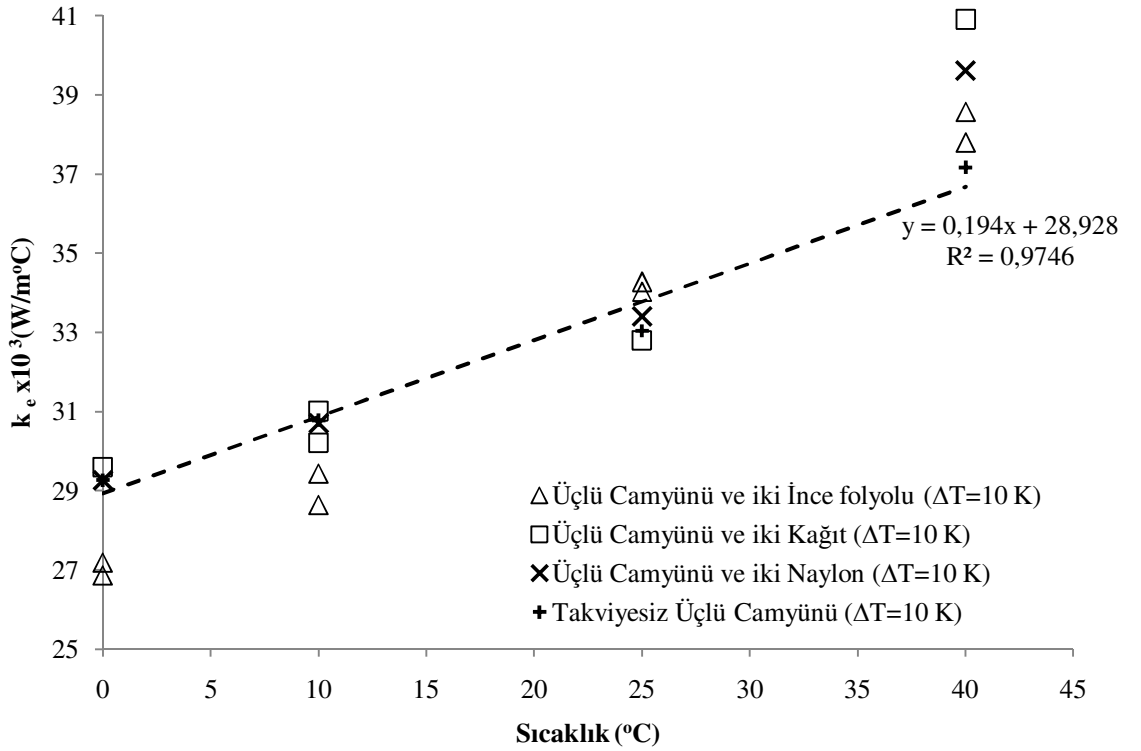
Şekil.3.37 incelendiğinde; aynı takviyeye sahip (üç alüminyum folyolu) numunelerde, dörtlü yerine beşli camyünü kullanılması efektif ısı iletkenliği değiştirmektedir. Efektif ısı iletkenlik, tabakanın beşli olmasıyla artmaktadır. 20 °C ve üzeri sıcaklıklarda efektif ısı iletkenlik, yaklaşık olarak %138, %96, %77, %59 artmaktadır. Üç alüminyum folyo takviyesinin, hem alt sıcaklıkta hem üst sıcaklıkta yer almasıyla efektif ısı iletkenliğin arttığı görülmektedir.

Takviye sayısı sabit alınarak, tabaka sayısının artışı incelendi. Buradan, “tabaka sayısı artışının belirli kalınlığa kadar önemli oranda efektif ısı iletkenliği azalttığı” sonucuna varılabilir. Takviye sayısının artışı, tabaka sayısının artışının önüne geçerek

efektif ısı iletkenliği arttırdığı söylenebilir. Bu ise, “tabaka sayısı artışı ın efektif ısı iletkenliği azaltabileceği yada arttırabileceği” anlamına gelir.

3.4.7. Takviye malzemesinin efektif ısı iletkenlik üzerine etkisi

Üçlü camyünü tabakaları arasına alüminyum folyonun yerine emmisivite özelliği yüksek ince folyo, kağıt ve stretch naylon kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Ayrıca alüminyum levha, paslanmaz elik levha yerleştirilerek Al folyo özelliğinin doğruluğu tespit edildi. Bunun yanı sıra, tabakalı dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinde bakır folyonun etkisi incelendi. Tabakalı numunede emmisivitesi yüksek malzemelerin kullanılması, Şekil.3.38’de farklı sıcaklıklarda 10 K sıcaklık farkı için belirlendi.

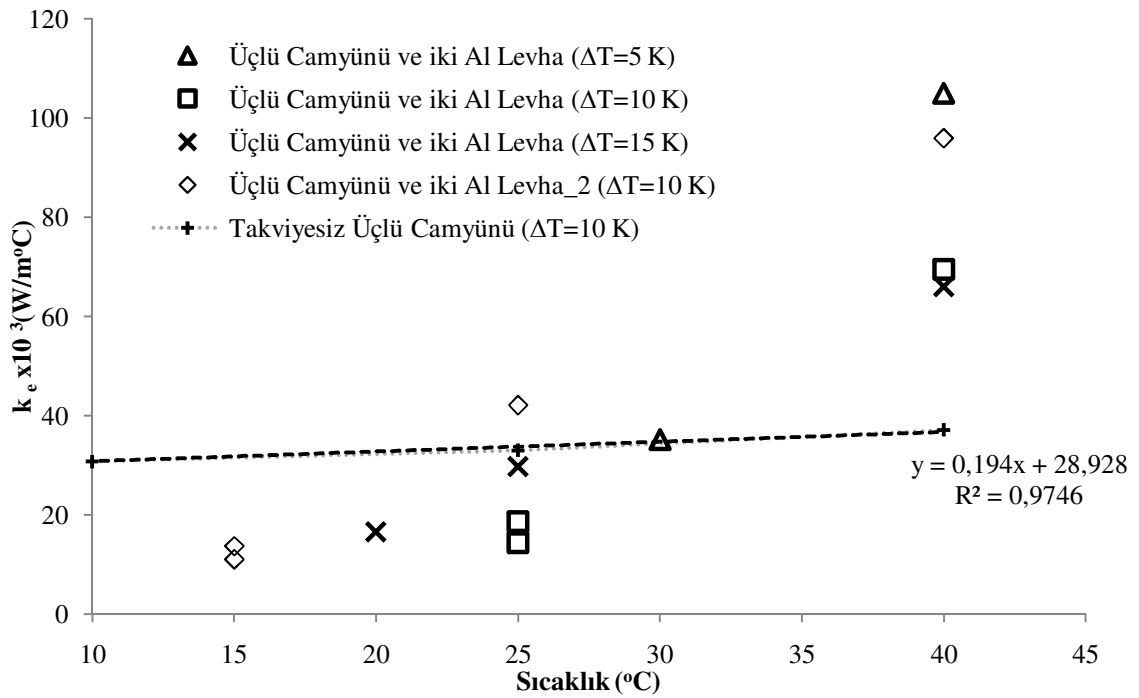


Şekil.3.38. Farklı takviye (ince folyo, kağıt, naylon) cinslerinin üçlü camyünü numunesinde efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

Şekil.3.38 incelendiğinde, emisivitesi yüksek farklı takviyelerin (ince folyo, kağıt, stretch naylon) efektif ısı iletkenlik sonuçlarında önemli bir değişime neden

olmamaktadır. Bu sonuçlar, %5 efektif ısı iletkenlik değişim aralığındadır. Ancak, 40 °C sıcaklıkta stretch naylon ve kağıt takviyeleri kullanıldığında, %6,6 ve %10,06 farklılık gerçekleştirdi. Bu durum, kağıtın emisivite aralığının 0,68-0,90 olmasından kaynaklanabilir. Buradan, önceki şekillerle irdelendiğinde yansıtıcı özellikli bir malzemenin takviye edilmesinin efektif ısı iletkenlikte değişime neden olduğu sonucu çıkarılabilir. Alüminyum folyonun iletkenliğinden kaynaklanmadığını ise, tabakalı numunelerin seri halde yerleştirilmesi gösterebilir. Seri haldeki efektif ısı iletkenliği, gözenekli numuneye yakın bir sonuç elde edilir.

Üçlü camyünü tabakaları arasına alüminyum folyonun yerine yansıtıcı özellikli alüminyum levha, paslanmaz elik levha yerleştirilerek efektif ısı iletkenlikleri tespit edildi. Farklı sıcaklıklarda 5, 10 ve 15 K sıcaklık farkı için elde edilen sonuçlar Şekil.3.39 ve 3.40’da karşılaştırıldı.

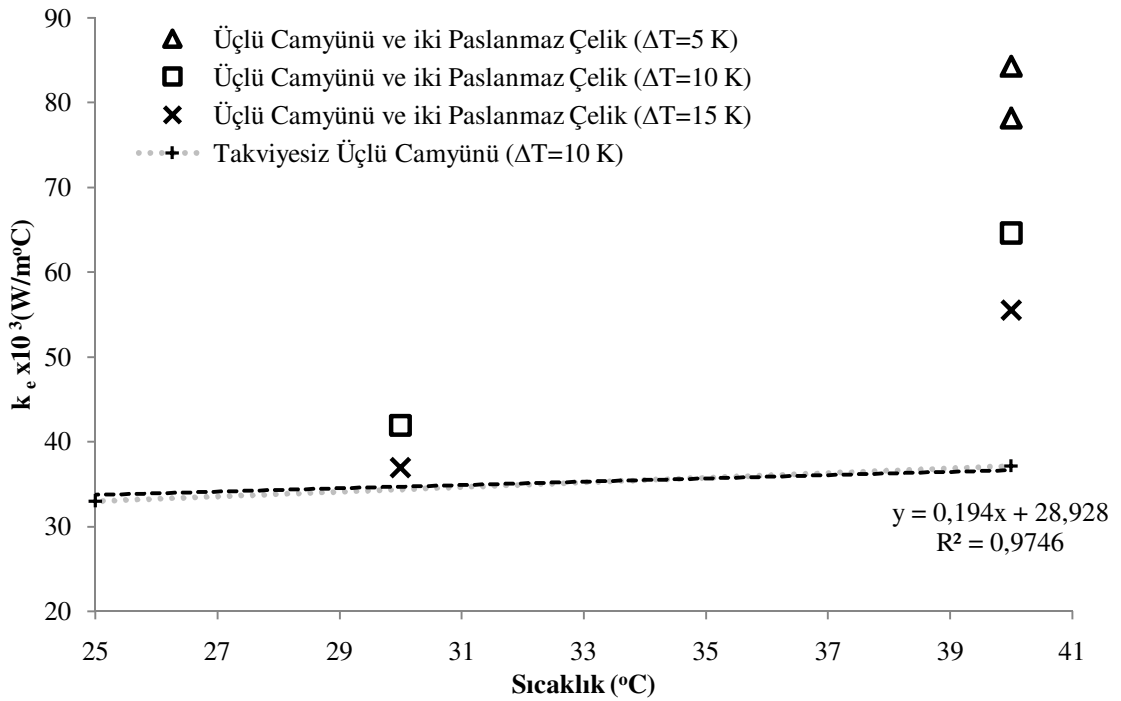


Şekil.3.39. İki alüminyum levha takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

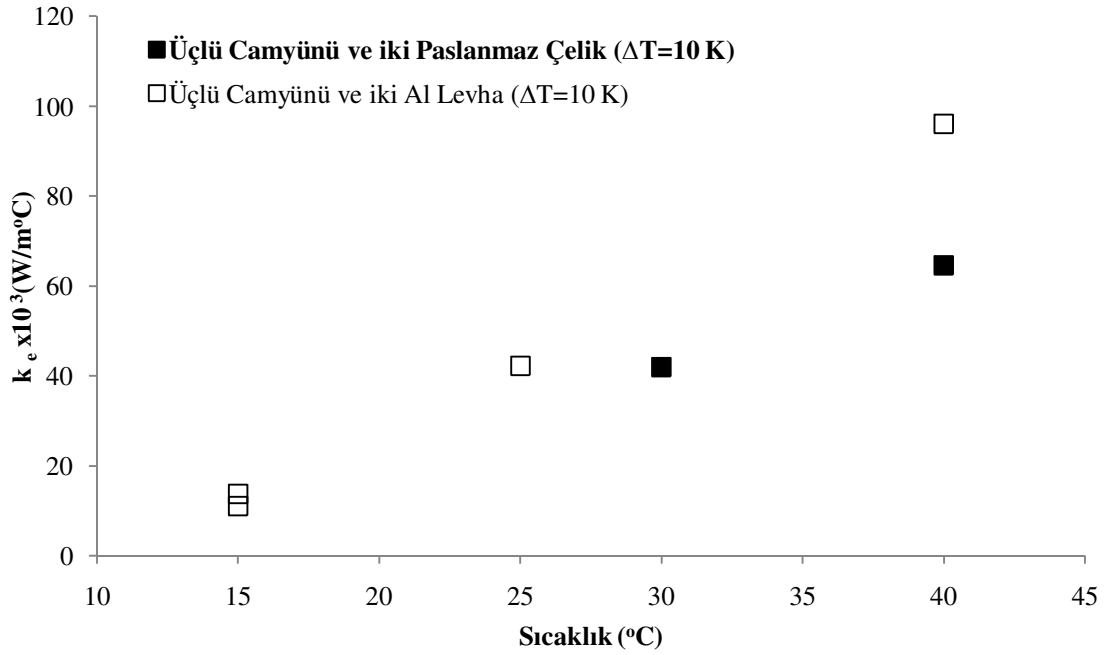
Şekil.3.39 incelendiğinde, alüminyum levha takviyesinin takviyesiz üçlü camyünü numuneye göre yüksek sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliği arttırdığı

görülebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise, daha az bir etkiyle azalışına neden olmaktadır. 10 K sıcaklık farkı için, 15 ve 40 °C sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliğin yaklaşık olarak %59 azalmasına ve %87-158 artmasına neden olmaktadır. Buradan, “yansıtıcı özellikli bir malzeme takviyesinin efektif ısı iletkenlikte azalış yada artışa neden olduğu” sonucu çıkarılabilir.

Emisivitesi düşük paslanmaz çelik levhanın, üçlü camyünü numunesinde kullanılması halindeki efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü. Bu efektif ısı iletkenlikler, Şekil.3.40’da, takviyesiz üçlü cam yünü numunesine göre farklı sıcaklıklarda ele alındı. Üçlü camyünü numunede alüminyum levha ve paslanmaz çeliğin takviye farklılığını görebilmek için, Şekil.3.41’de efektif ısı iletkenlikleri karşılaştırıldı. Ancak, bu değerlendirme sınırlı olarak yapılabilmektedir.



Şekil.3.40. İki paslanmaz çelik takviyeli üçlü camyünü numunesinin 5 K, 10 K, 15 K sıcaklık farklarında efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırılması

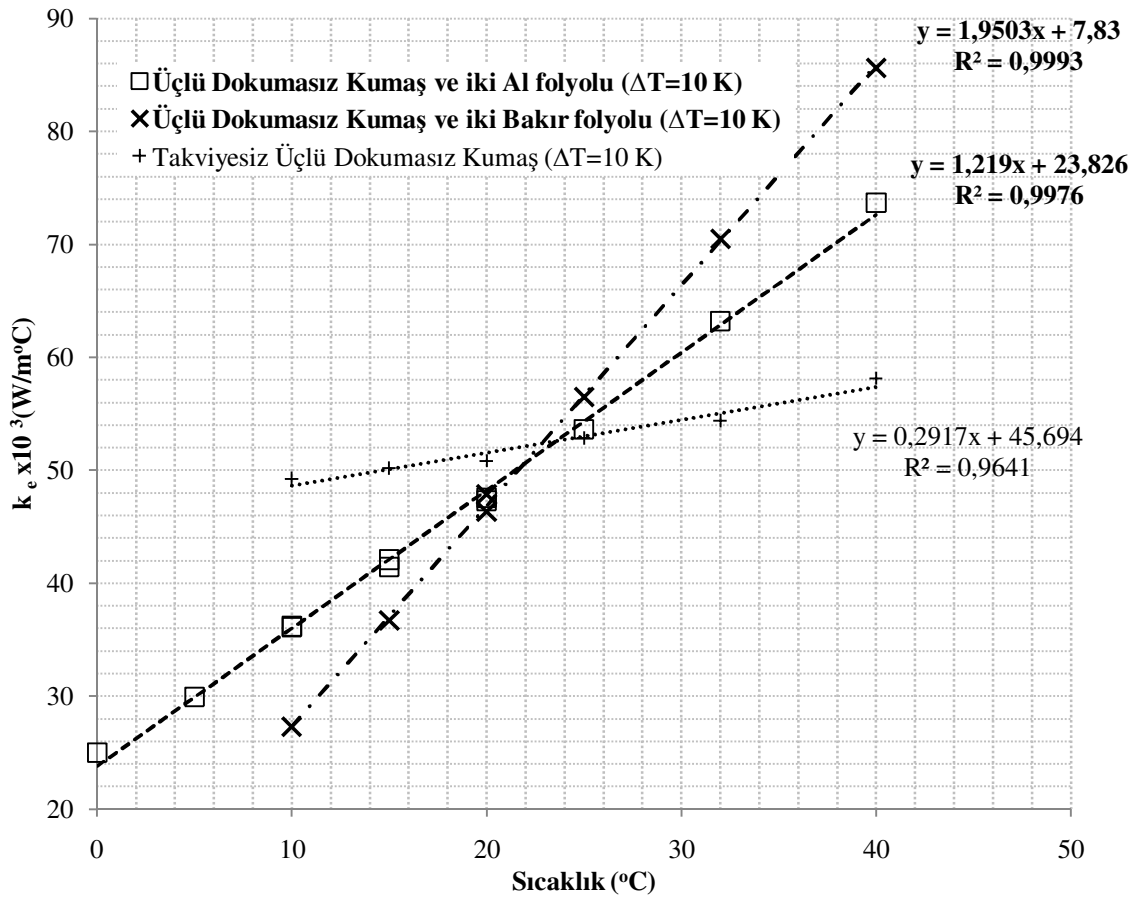


Şekil.3.41. İki paslanmaz çelik takviyeli üçlü camyünü ile iki alüminyum levha takviyeli üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması

Paslanmaz çelik takviyesi, 40 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 15 K sıcaklık farklarında sırasıyla %118,5, %73,87 ve %49,44 efektif ısı iletkenliği artmaktadır. Bu, yansıtıcı özellikli olması nedeniyle etki etmektedir. Ayrıca, bu takviyelerin kritik işletme sıcaklıkları altında ölçülebilmesi efektif ısı iletkenliğe ne ölçüde etkidiği hakkında net bir bilgi verebilir. Şekil.3.41’de ise, paslanmaz çeliğin alüminyumdan daha az ama yine önemli bir efektif ısı iletkenlik değişimine neden olduğu görüldü. Takviye farkının etkisi, 5 ve 10 K sıcaklık farkı için 40 °C sıcaklıkta görülmektedir.

Emisivitesi düşük bakır folyonun, üçlü dokumasız (nonwoven) filtre kumaş numunesinde kullanılması halindeki efektif ısı iletkenlikleri ölçüldü. İlk olarak, iki alüminyum folyolu üçlü dokumasız filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenlikleri Şekil.3.42’de takviyesiz haldeki efektif ısı iletkenlik ile birlikte değerlendirildi. Ardından, iki bakır folyonun üçlü dokumasız numunede efektif ısı iletkenlikleri ile karşılaştırıldı. İki alüminyum folyo takviyesi, 23 °C sıcaklık altında ve üzerinde farklı etkilere neden olmaktadır. 10 K sıcaklık farkı için 10, 15 ve 20 °C sıcaklıkta sırasıyla %46,89, % 16,78 ve % 6,65 efektif ısı iletkenliği azaltmaktadır. Ayrıca, 25, 32 ve 40

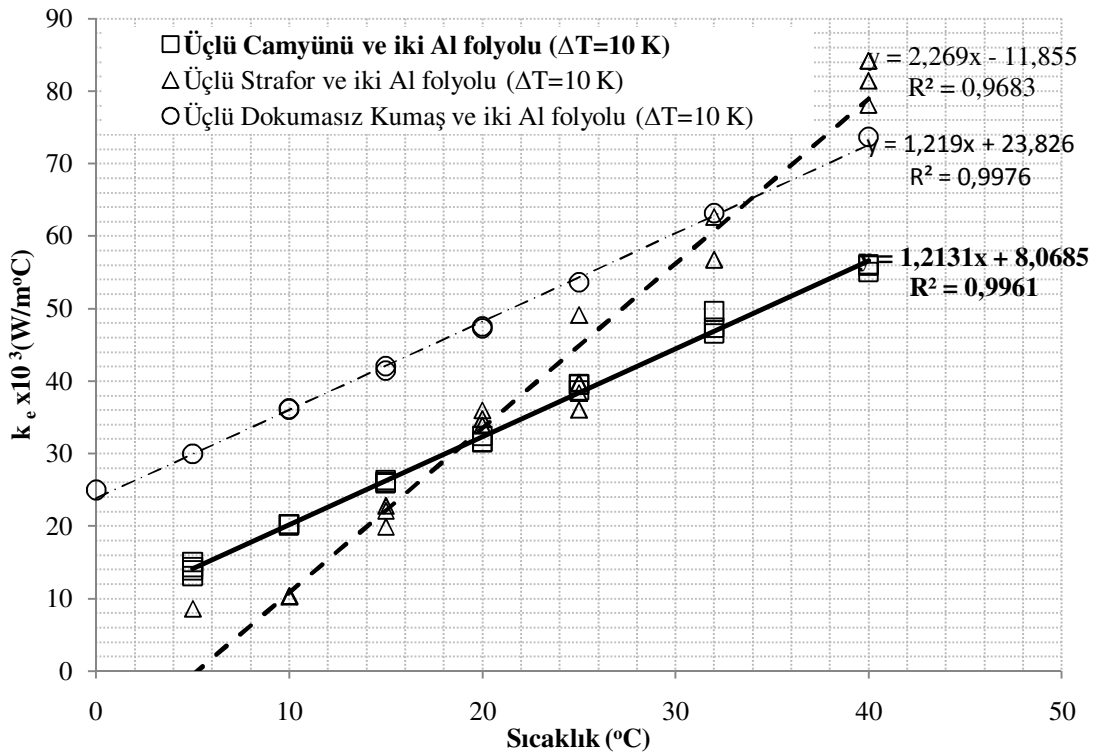
°C sıcaklıkta sırasıyla % 1,53, % 16,22 ve % 26,73 efektif ısı iletkenliği arttırmaktadır. Bu, yansıtıcı özellikli olması nedeniyle. Üçlü dokumasız filtre kumaş numunede iki folyo yerine iki bakır folyo kullanıldığında takviyesiz numunenin efektif ısı iletkenliğinden tüm sıcaklıklarda uzaklaşmaktadır. İki bakır folyo takviyesi, iki alüminyum folyo takviyesine göre 10, 15 ve 20 °C sıcaklıkta sırasıyla % 24,43, % 12,13 ve % 1 efektif ısı iletkenliği daha da azaltmaktadır. Ayrıca, 25, 32 ve 40 °C sıcaklıkta sırasıyla % 5,29, % 11,51 ve % 16,22 efektif ısı iletkenliği daha da arttırmaktadır. Bakır folyonun düşük sıcaklıklarda daha iyi efektif ısı iletkenliğe, yüksek sıcaklıklarda daha kötü efektif ısı iletkenliğe neden olduğu görüldü.



Şekil.3.42. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş ile iki bakır folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması

3.4.8. Takviyeli numunelerde malzeme cinsinin efektif ısı iletkenliğe etkisi

Farklı tabakalar arasına alüminyum folyonun yerleştirilmesiyle oluşan iki farklı tabakalı numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırması yer almaktadır. Burada yapılan ölçümlerde, camyünü tabakası yerine strafor veya dokumasız filtre kumaş numunesi kullanımının etkisi incelendi. İlk olarak, farklı kalınlıklı camyünü ve üçlü strafor tabakalı numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri karşılaştırıldı. Bu sonuçlara, üçlü dokumasız filtre kumaş numunesinin değerleri ilave edildi. Ardından, kalınlıkları aynı ve iki alüminyum folyo takviyeli üçlü dokumasız filtre numunesi ile üçlü cam yünü numunesi efektif ısı iletkenlikler açısından değerlendirildi. İki alüminyum folyo takviyeli farklı numunelerin efektif ısı iletkenlikleri, Şekil.3.43’de verilmektedir.

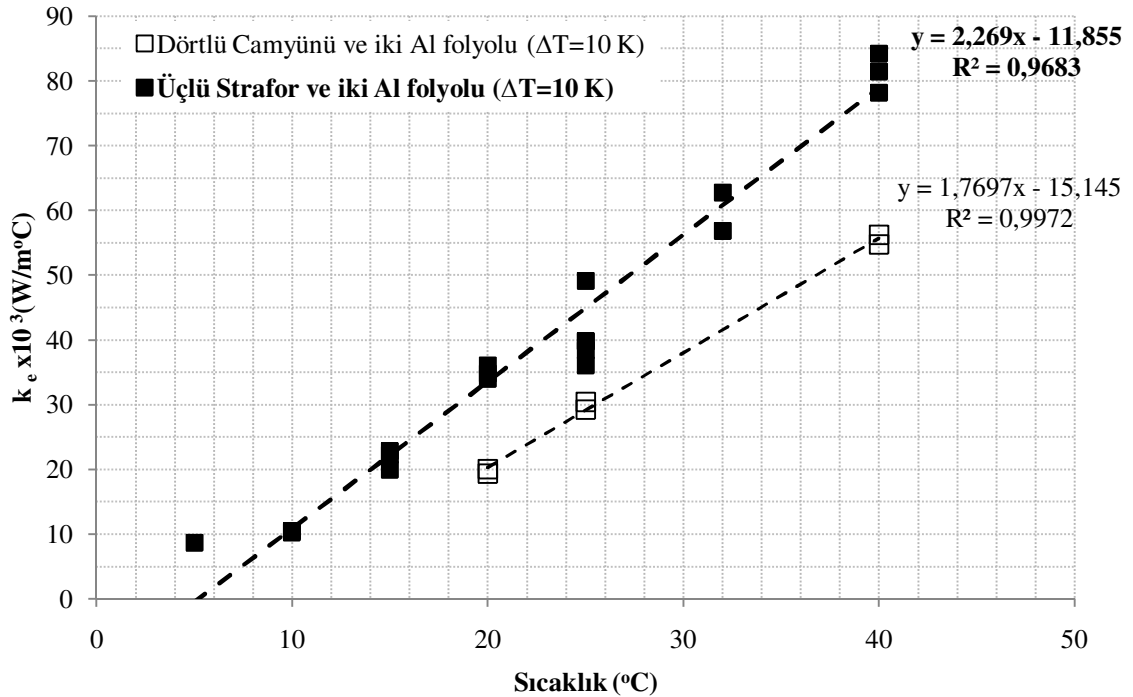


Şekil.3.43. İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü, strafor ve dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla karşılaştırması

Şekil.3.43’de, iki alüminyum folyo takviyeyle üçlü camyününün, dokumasız kumaşın ve straforun efektif ısı iletkenlik eğri eğimleri incelendi. 10 K sıcaklık

farkında eğimi, straforunun daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu ise, düşük sıcaklıklarda (24 °C altı) daha düşük efektif ısıl iletkenlik ve yüksek sıcaklıklarda (24 °C üzeri) daha yüksek efektif ısıl iletkenlik demektir. Her bir sıcaklıkta, oranları farklılık gösterebilir. Buradan, malzeme cinsinin önemli olduğu söylenebilir. Ancak, üçlü straforun tabaka kalınlığı camyünü numunesinden %78,5 daha kalın ve iki takviye arası mesafesi yaklaşık %74,65 daha yüksek olduğu bilinmelidir. Ancak, dokumasız kumaş numunesinin ve camyünü numunesinin kalınlıkları aynı ve takviye mesafeleri yaklaşık olarak 16,7-14,7 mm'dir. Şekil.3.43'de, bu numunelerin eğimleri yaklaşık olarak aynıdır. Ancak, aynı oranda farklı efektif ısıl iletkenliklere sahiptir. Bu ise, malzemenin etkisini göstermektedir. Bu malzemelerin kritik işletme sıcaklıkları, iki alüminyum folyolu üçlü ve dördü camyünü numunesinde 20 °C ve 28 °C iken iki alüminyum folyolu üçlü straforda 23 °C'dir.

Ortası takviyesiz iki alüminyum folyo takviyeli dördü camyünü numunesinin efektif ısıl iletkenlikleri ile iki alüminyum folyo takviyeli üçlü strafor numunesinin sonuçları da Şekil.3.44'de karşılaştırıldı. Bu numunelerin efektif ısıl iletkenlikleri, iki takviye arası mesafenin yaklaşık olarak aynı olması nedeniyle ele alındı.

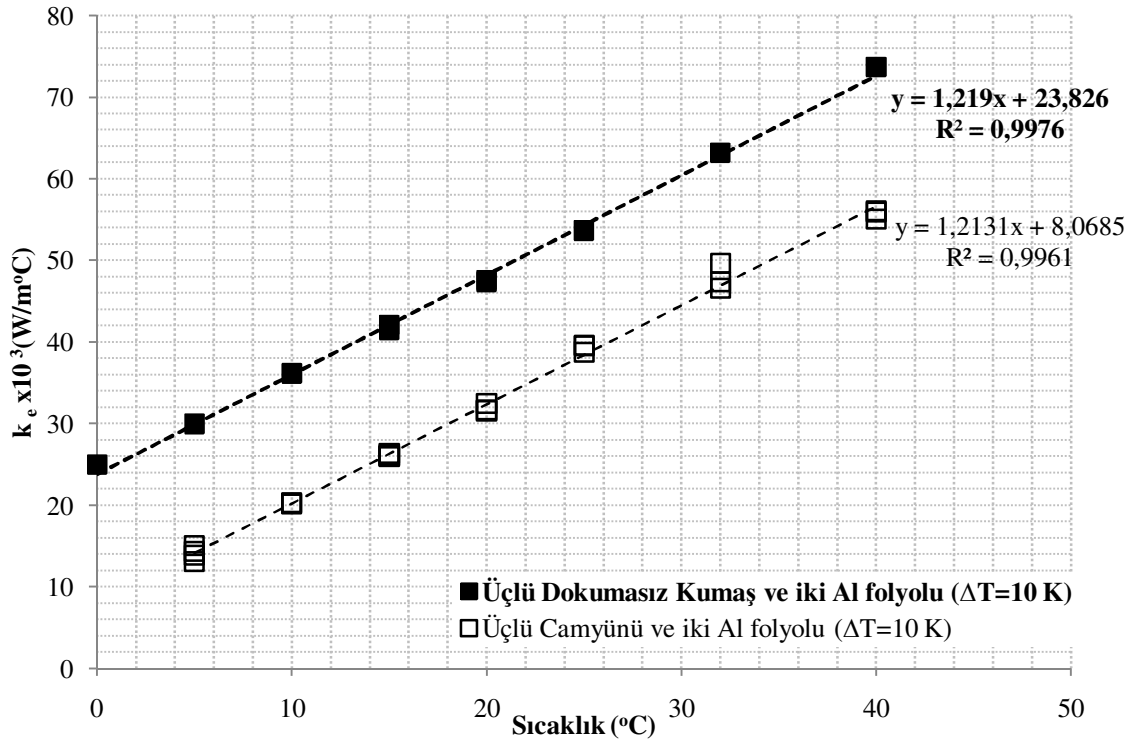


Şekil.3.44. İki Al folyo takviyeli dördü camyünü (ortası takviyesiz) ve üçlü strafor numunelerinin efektif ısıl iletkenliklerinin karşılaştırılması

Şekil.3.44'de, iki alüminyum folyo takviyeyle üçlü camyününün ve üçlü straforun efektif ısı iletkenlik eğri eğimleri görülmektedir. 10 K sıcaklık farkında, straforun eğiminin yüksek olduğu görülmektedir. Burada, straforun eğimi %28 daha yüksektir. Bu ise, düşük sıcaklıklarda (25 °C altı) daha düşük efektif ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklıklarda (25 °C üzeri) daha yüksek efektif ısı iletkenlik demektir. Her bir sıcaklıkta, oranları farklılık gösterebilir. Buradan, malzeme cinsinin önemli olduğu söylenebilir. Ancak, üçlü straforun tabaka kalınlığı camyünü numunesinden %32,37 fazladır. Bu durum tabaka sayısının fazla olması anlamına gelir ve tabaka sayısının artması da eğimi arttırmaktadır. Bu ise, Şekil.3.36'da camyününde eğimi % 91,51 arttırmaktadır. Ancak, takviyesiz iki farklı tabakalı numunenin efektif ısı iletkenlikler farkından etki ettiği Şekil.3.14'den görülmektedir. Buradan, malzeme etkisinin önemi hakkında net bilgi verilebilir.

Malzeme cinsinin numunelerin efektif ısı iletkenliklerinde etkisi, aynı kalınlıklı ve yaklaşık takviye mesafeleri aynı olan numunelerde net görülebilir. Bunun için, iki takviyeli üçlü camyünü ve üçlü dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri yeniden ele alındı. Bu numuneler, yaklaşık olarak 49,1 mm ve 49,3 mm kalınlıkta ve iki takviye arası mesafeler yaklaşık olarak 16,7-14,7 mm'dir. Şekil.3.45'de bu numunelerin sıcaklıkla değişimi ve karşılaştırması yapıldı.

Şekil.3.45 incelendiğinde, iki alüminyum folyo takviyeyle üçlü camyününün ve üçlü dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenlik eğri eğimleri incelendi. 10 K sıcaklık farklarında heriki malzemenin eğimleri, aynı olduğu görülmektedir. Üçlü dokumasız filtre kumaş numunesinin efektif ısı iletkenliği, üçlü camyünü numunesinden her sıcaklıkta yüksektir. Bu durum, 10, 15, 20, 25, 32, 40 °C sıcaklıklarda sırasıyla %112,637, %78,98, %59,98, %48,72, %36,55, %31,99, %32,28 efektif ısı iletkenliği artmaktadır. Buradan, malzeme cinsinin önemli olduğu anlaşıldı. Ayrıca, Şekil.3.15'deki takviyesiz üçlü camyünü ve takviyesiz dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenlikler farkından malzemenin etkili olduğu görülebilir.



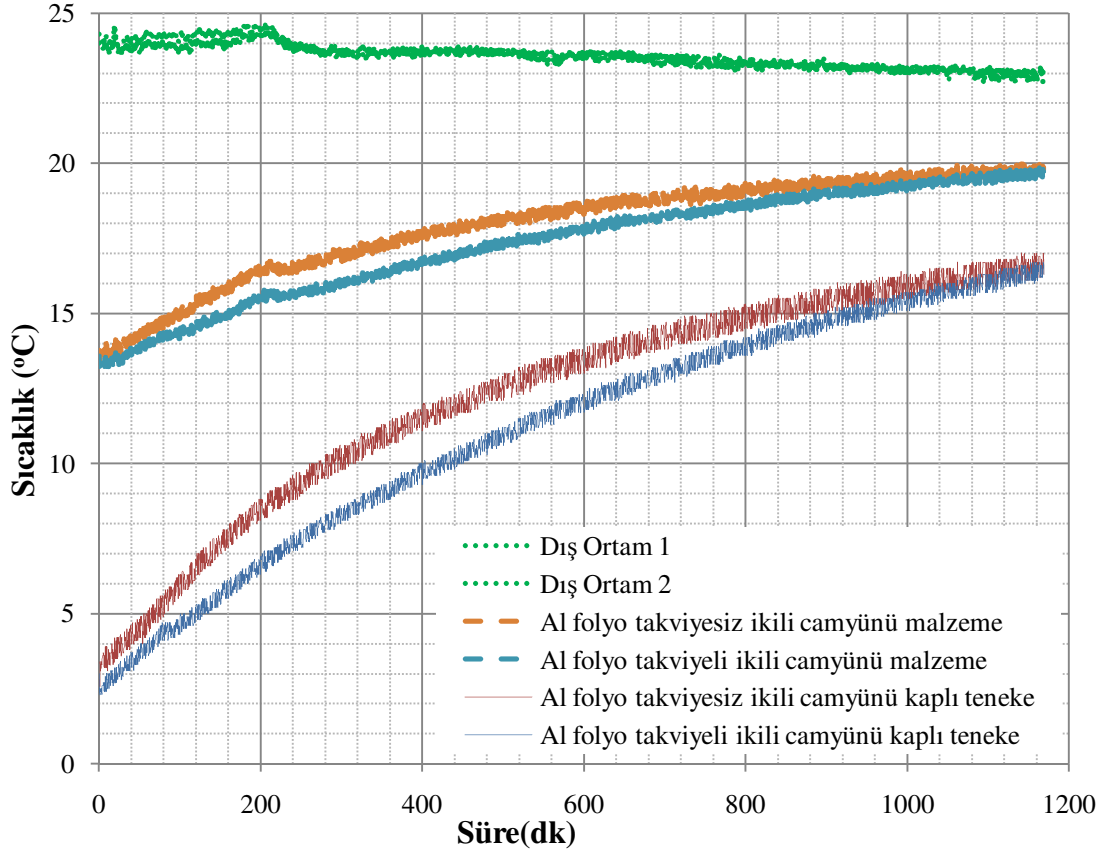
Şekil.3.45. İki Al folyo takviyeli üçlü camyünü ile üçlü dokumasız filtre kumaş numunelerinin efektif ısı iletkenliklerinin karşılaştırılması

3.5. Isınma ve Soğuma Deneyleri

Isınma ve soğuma deneyleri, yağ tenekelerinin içerisine koyulan yarı ve tam dolu haldeki sıcak ve soğuk suyun zamanla ısınmasını ve soğumasını içermektedir. Ayrıca, bu deneylere antifirizli suda yapılan ölçümler ilave edildi. Gözenekli ikili, özellikle de üçlü cam yünü katmanlar arasında düşük emmisivite değerlerine sahip alüminyum folyo malzemeler, bu tenekelere kaplanarak ölçümler yapıldı. Bu takviyeli malzemelerin düşük ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri, bu ısınma ve soğuma deneyleri ile test edildi. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında belirlenen bu takviyeli ikili ve üçlü camyünü numunelerinin efektif ısı iletkenlikleri ile karşılaştırıldı. Takviyeli ikili ve üçlü camyünü numunesinin ısınma ve soğuma süreleri ile takviyesiz ikili ve üçlü camyünü numunesinden elde edilen ısınma ve soğuma süreleri karşılaştırıldı.

3.5.1. “Tek folyolu iki tabakalı” camyününde ısınma ve soğuma

Tek folyolu iki tabakalı takviyeli ve takviyesiz kaplanan iki tip yağ tenekesi içindeki suyun ısınması ya da soğuması üzerine deneyler yapıldı. Buzdolabında soğutulan suyun teneke içerisine yerleştirilerek ortam içerisindeki ısınması ya da zamanla sıcaklığının değişimi ölçüldü. Bu ölçümlerden birkaçı, ölçümlerdeki kesintiler nedeniyle çalışmaya dahil edilmedi. Şekil.3.46’da ise, yaklaşık 24,1 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki soğuk suyun ısınma süresi incelendi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 2,4 °C iken takviyesiz tenekede 3,1 °C’dir. 30 s’de bir alınan ölçümlere göre grafik çizildi.

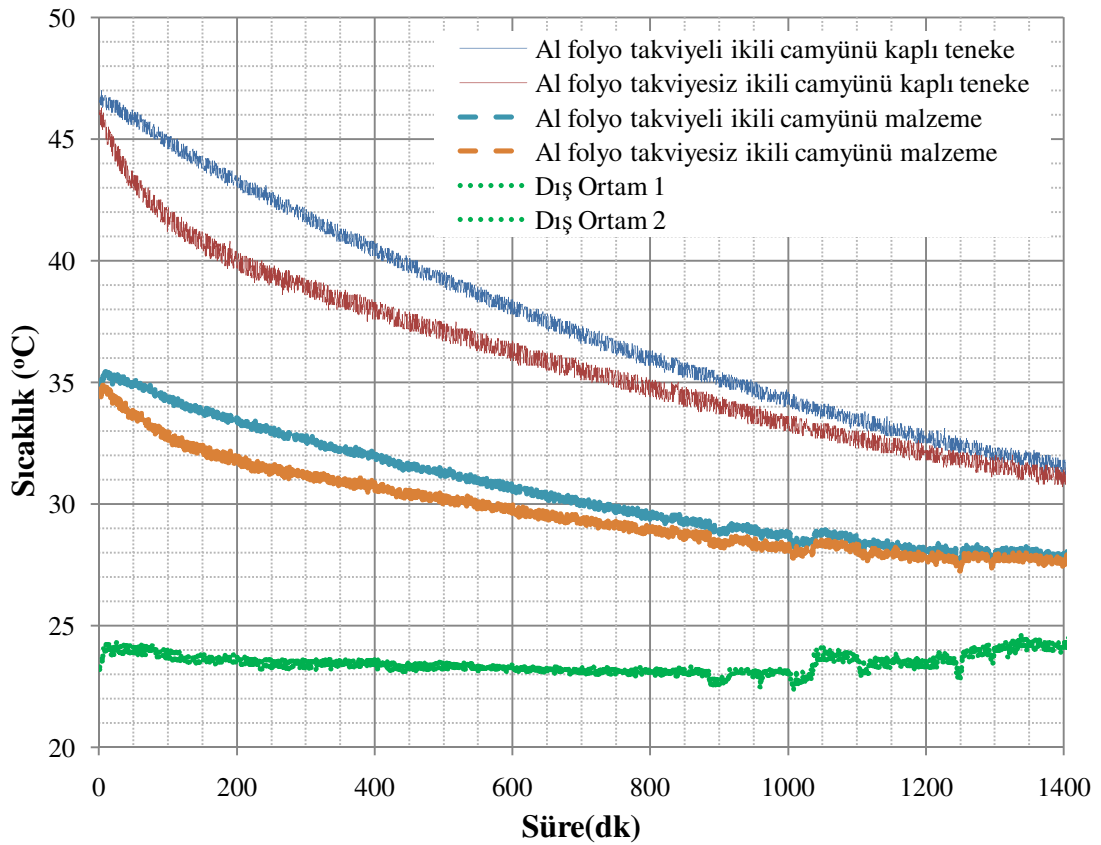


Şekil.3.46. Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması

Şekil.3.46 incelendiğinde, en geç ısınmanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 15 ve 19 °C aralığında bu grafiklerdeki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü

numuneler arasında incelendi. Burada ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.46'dan, takviyesiz yalıtım malzemesi 603,5 dk'da, takviyeli yalıtım malzemesi 719 dk'da ulaştığı tespit edildi. Bu sürelerin her biri, denklem (2.94)'de yerine koyularak efektif ısıl iletkenlik elde edildi. Bu, Çizelge.3.10'daki sonuçlardan görülebilir.

Tek folyolu iki tabakalı takviyeli ve takviyesiz kaplanan iki tip yağ tenekesi içindeki 4,1 litre ve 4,4 litrelik suyun soğuması üzerine deneyler yapıldı. Isıtılan su teneke içerisine koyularak, ortam içerisindeki soğuması ölçüldü. Bu ölçümler, Şekil.3.47'de verildi. Burada, yaklaşık 23,25 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerde suyun soğuma süresi incelendi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 46,7 °C iken takviyesiz tenekede 46,2 °C'dir. Grafik, 30 s'de bir alınan ölçümlere göre çizildi.



Şekil.3.47. Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması

Şekil.3.47 incelendiğinde, en geç soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 33 ve 30 °C aralığında bu grafiklerdeki soğuma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.47’de takviyesiz yalıtım malzemesi 463 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 449,5 dk’da ulaşmaktadır. Bu şekilde elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.10’daki sonuçlardan görülebilir. Takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenlikleri, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,0324 ve 0,0353 W/mK alınarak takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliği belirlendi. Buradan, gözenekli yalıtım malzemeye alüminyum folyo takviyesinin daha iyi bir özellik kazandırdığı görüldü.

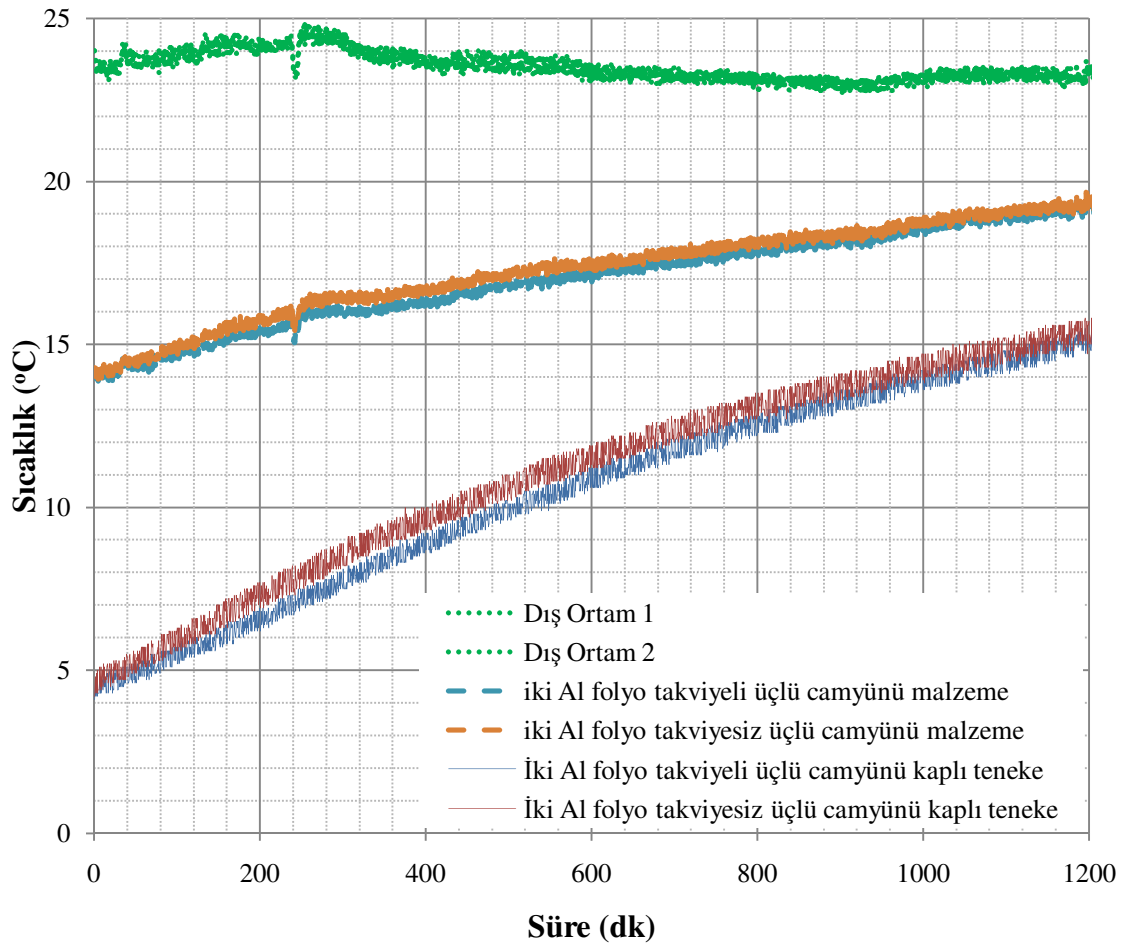
Çizelge.3.10. Ortalama numune sıcaklığı 17 ve 31,5 °C olan Al folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğin değişimi

Deneyler	%42-48 dolu (Şekil.3.46)				4,1 litre (Şekil.3.47)		4,4 litre (Şekil.3.47)	
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	15	19	15	19	33,05	30,2	33	30,025
İç Sıcaklığı (°C)	6,1	14,8	6,1	14,6	42,6	37,3	42,1	37,1
Ortam Sıcaklığı (°C)	24,1	23,3	24	23,4	23,5	23,1	23,9	23,25
Süre Aralığı (dk)	161	880	94,5	698	243,5	693	82,5	545,5
Süre (dk)	719		603,5		449,5		463	
Ke (W/mK)	0,02873		0,0324		0,03962		0,0353	

Bu çizelgede elde edilen efektif ısı iletkenlik değerleri, dış ortam ve iç ortamın ısı taşınım katsayılarının aynı olduğu kabul edildi. EP500 cihazından elde edilen efektif ısı iletkenlikler ise, 17 °C ve 31,5 °C sıcaklıklarda 0,02973 ve 0,035845 W/mK’dir. Bu verilere göre, ısınma ve soğuma deneylerinden %5 ve % 10 farklılıkta efektif ısı iletkenlikler elde edildi. Buradan, alüminyum folyo takviyesinin gözenekli yalıtım malzemesine farklı sıcaklıklarda farklı bir efektif ısı iletkenlik sağladığı görülmektedir.

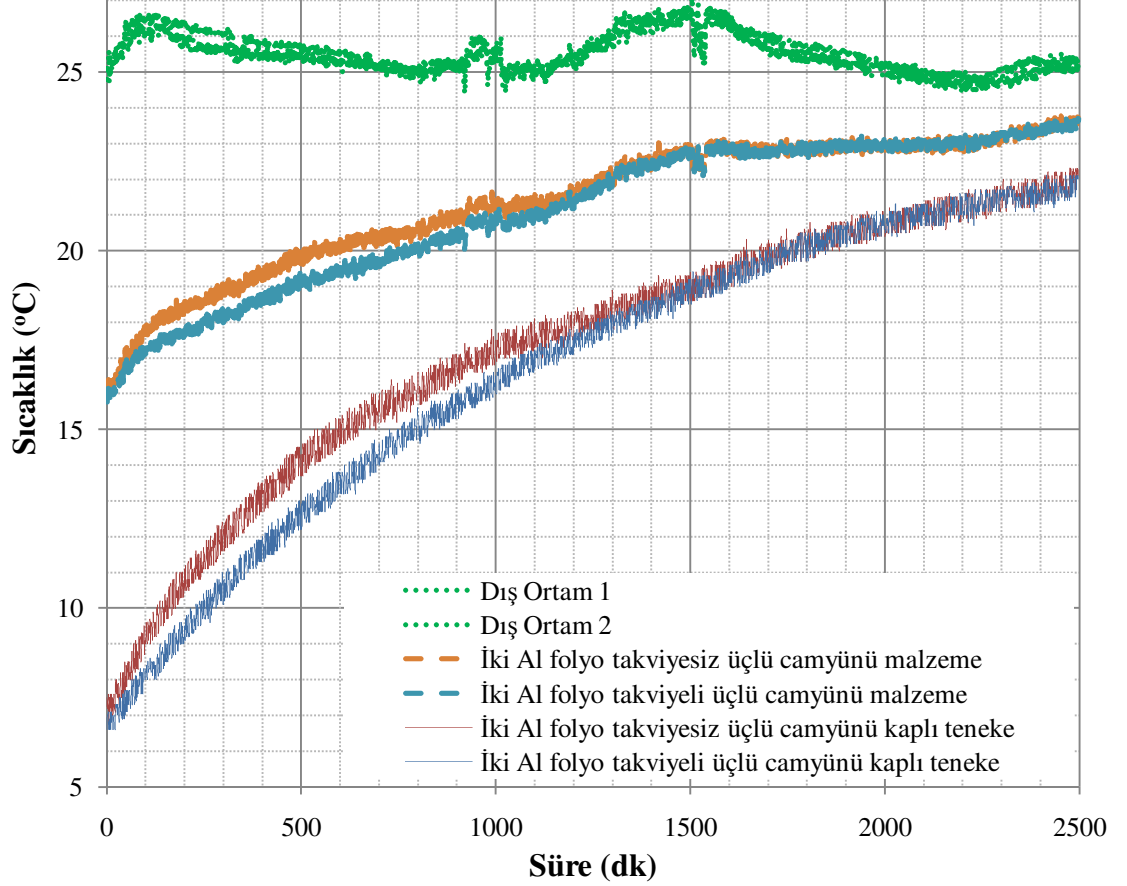
3.5.2. Ortam içerisinde ‘iki folyolu üç tabakalı’ camyününde ısınma

İki folyolu üç tabakalı camyünün takviyeli ve takviyesiz iki tip yağ tenekesi üzerine kaplanarak içindeki suyun ısınması ya da soğuması üzerine deneyler yapıldı. İlk olarak, yaklaşık %48 dolu tenekelerdeki suyun zamanla ısınması ele alındı. İlk deneyde buzdolabında soğutulan su, 2,4 litrelik olarak iki yağ tenekesine koyuldu. 30 s’de bir alınan ölçümlere göre grafikler çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.48 ve Şekil.3.49’da verildi. Şekil.3.48’de, yaklaşık 23,75 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekedeki 2,4 litrelik soğuk suyun ısınma süresi incelendi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 4,6 °C iken takviyesiz tenekede 4,8 °C’dir.



Şekil.3.48. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (1)

Şekil.3.49’da, yaklaşık 25,15 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekedeki 2,4 litrelik soğuk suyun ısınma süresi incelendi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 7 °C iken takviyesiz tenekede 7,2 °C’dir. Bu şekil ise, dakikada bir alınan ölçüm verilerine göre çizildi.



Şekil.3.49. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (2)

Şekil.3.48 incelendiğinde, en hızlı ısınmanın takviyesiz numunede olduğu görüldü. 15 ve 19 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.48’de takviyesiz yalıtım malzemesi 924 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken takviyeli yalıtım malzemesi 985 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,0320 W/mK alındı ve takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliği belirlendi. Şekil.3.49 incelendiğinde, en geç ısınmanın takviyesiz numunede olduğu görüldü. 18 ve 22 °C aralığında bu şekildeki ısınma

süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.49’da, takviyesiz yalıtım malzemesi 1156 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 1051 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,033 W/mK alındı ve takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliği belirlendi. Bu şekilde elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.11’deki sonuçlardan görülebilir. Bu gözenekli yalıtım malzemeye alüminyum folyo takviyesinin daha iyi bir özelliği kazandırdığını göstermektedir.

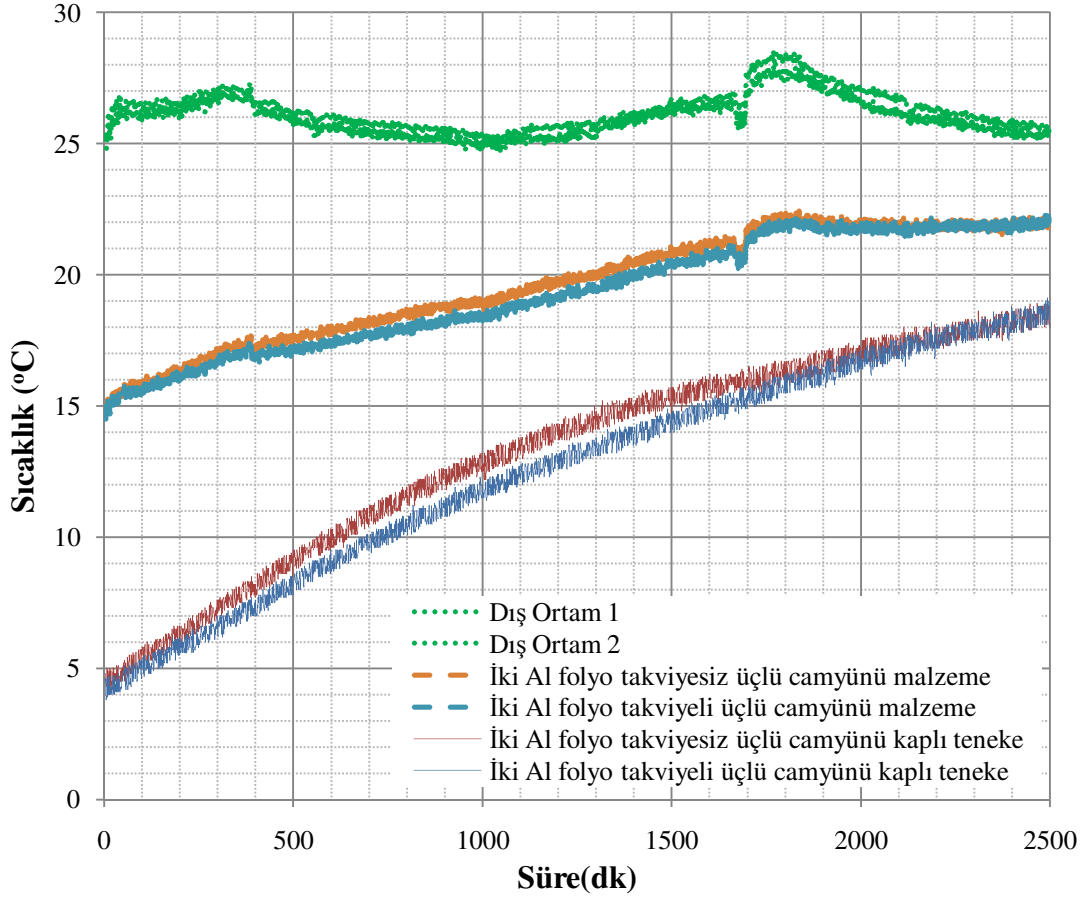
Çizelge.3.11. Ortalama numune sıcaklığı 17 ve 20 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğinin değişimi

Deneyler	2,4 litre (Şekil.3.48)				2,4 litre (Şekil.3.49)			
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	15	19	15	19	18	22	18	22
İç Sıcaklığı (°C)	5,9	14,9	6,3	14,9	10,2	18,3	9,9	18,5
Ortam Sıcaklığı (°C)	24,1	23,2	23,75	23,15	25,9	25,95	26,35	25,7
Süre Aralığı (dk)	131	1116	100	1024	244	1295	120	1256
Süre (dk)	985		924		1051		1156	
Ke (W/mK)	0,030		0,0322		0,0313		0,0328	

17 ve 20 °C sıcaklıkları için, EP500 ölçümlerinden 0,02869 ve 0,03233 W/mK elde edildi. Bu çizelgeden elde edilen efektif ısı iletkenlik değerleri, EP500 cihazından ölçülen değerleri ile uyumludur.

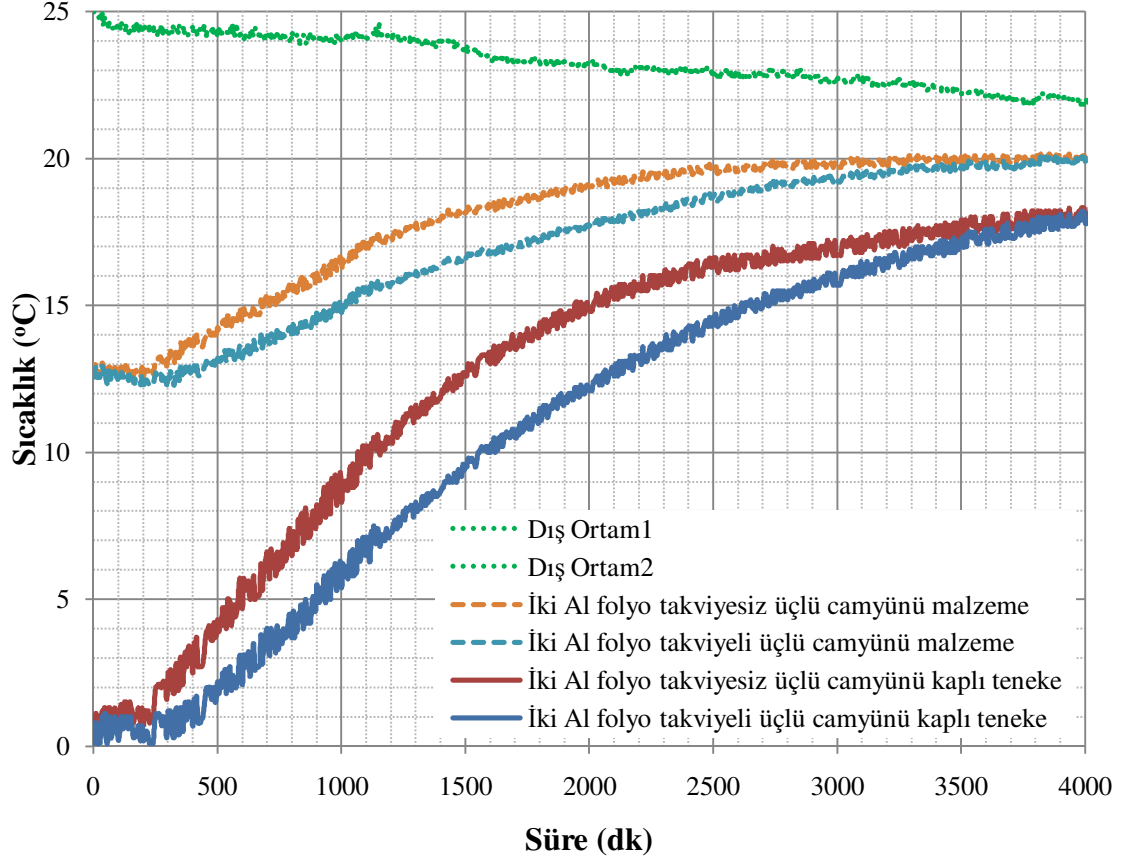
İkinci olarak, yaklaşık olarak tam dolu iki tenekedeki suyun zamanla ısınması ele alındı. Burada buzdolabında soğutulan su, 4,95 litrelik olarak iki yağ tenekesine koyuldu. Dakikada bir ve 5 dakikada bir alınan ölçümlere göre grafikler çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.50 ve Şekil.3.51’de verildi. Şekil.3.50’de, yaklaşık 25,3 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki soğuk suyun ısınma süresi incelendi.

Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 4,6 °C iken takviyesiz tenekede 4,8 °C'dir.



Şekil.3.50. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki soğuk suların ortam sıcaklığında ısınması (3)

Şekil.3.50 incelendiğinde, en geç ısınmanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 16 ve 21 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.50'de takviyesiz yalıtım malzemesi 1398 dk'da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 1472 dk'da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14'den 0,0328 W/mK alındı. Şekil.3.51'de yaklaşık 24 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki soğuk suyun ısınma süresi incelendi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde 4,6 °C'dir.



Şekil.3.51. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki buzun ortam sıcaklığında ısınması

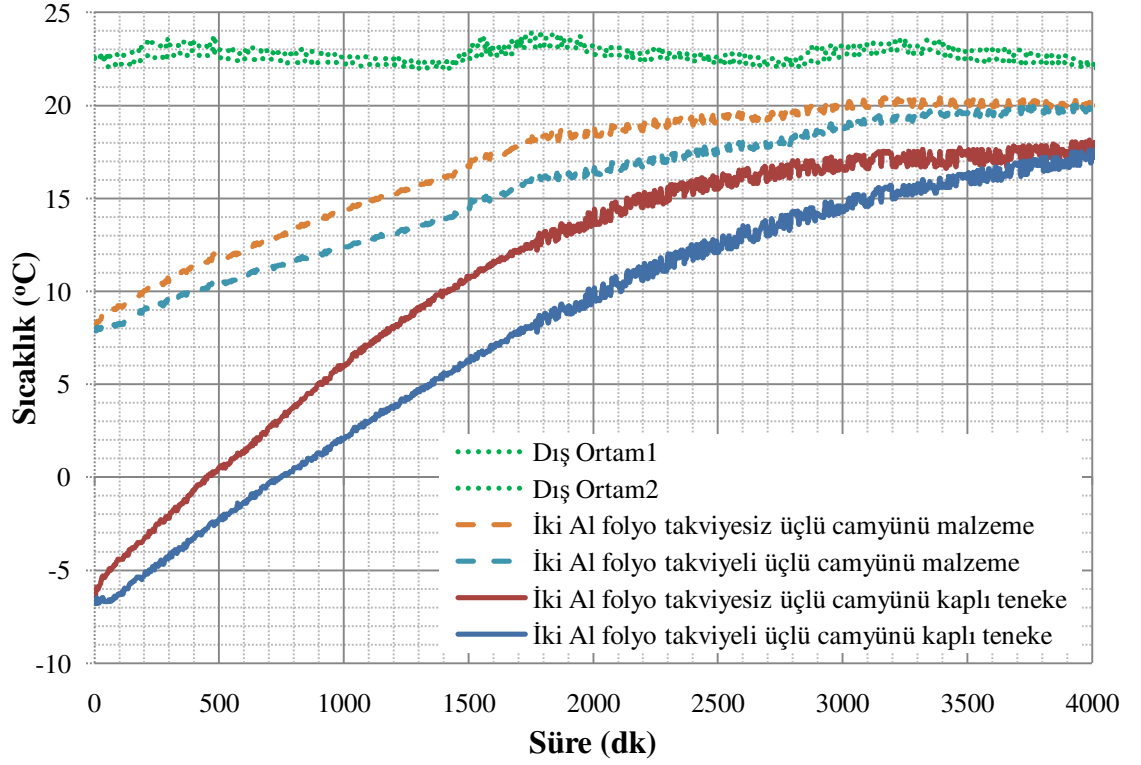
Şekil.3.51 incelendiğinde, en geç ısınmanın yine takviyeli numunede olduğu görüldü. 13 ve 19 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.51’de takviyesiz yalıtım malzemesi 1625 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken takviyeli yalıtım malzemesi 2245 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,032 W/mK alınarak takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliği belirlendi. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.12’deki sonuçlardan görülebilir. Bu gözenekli yalıtım malzemeye alüminyum folyo takviyesinin daha iyi bir özellik kazandırdığını göstermektedir.

Çizelge.3.12. Ortalama numune sıcaklığı 18,5 ve 16 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğinin değişimi

Deneyler	4,95 litre (Şekil.3.50)				4,95 litre (Şekil.3.51)			
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	16	21	16	21	13	19	13	19
İç Sıcaklığı (°C)	5,8	15,4	5,9	15,7	2	15	2	14,7
Ortam Sıcaklığı (°C)	26,25	26,7	26,15	26,4	24,25	22,95	24,35	23,25
Süre Aralığı (dk)	168	1640	117	1515	860	3105	655	2280
Süre (dk)	1472		1398		2245		1625	
Ke (W/mK)	0,028967		0,0328		0,024537		0,03165	

18,5 ve 16 °C sıcaklıkları için, EP500 cihazından elde edilen efektif ısı iletkenlikler 0,0305 W/mK ve 0,02747 W/mK alındı. Çizelgeden elde edilen değerler, yaklaşık olarak sırasıyla %5 ve %10 farklılıkta tespit edildi. Buradan, alüminyum folyo takviyesinin gözenekli yalıtım malzemesine düşük sıcaklıklarda (20 °C altında) düşük bir efektif ısı iletkenlik sağladığı söylenebilir.

Üçüncü olarak, 5 litrelik iki yağ tenekesine yaklaşık %30 antifrizli su ile doldurularak deneyler yapıldı. Öncelikle antifrizli su, farklı bir kaptaki buzdolabında belirli sıcaklığa kadar soğutuldu. Ardından, takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunesi kaplı iki yağ tenekesine koyuldu. Bu tenekelerdeki antifrizli suyun, zamanla ısınması gözlemlendi. 5 dakikada 1 alınan ölçümlere göre şekiller çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.52 ve Şekil.3.53’de verildi. Şekil.3.52’de, yaklaşık 22,55 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki soğuk suyun sıcaklıkla değişimi (ısınma) verildi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede -6,7 °C iken takviyesiz tenekede -6,4 °C’dir.



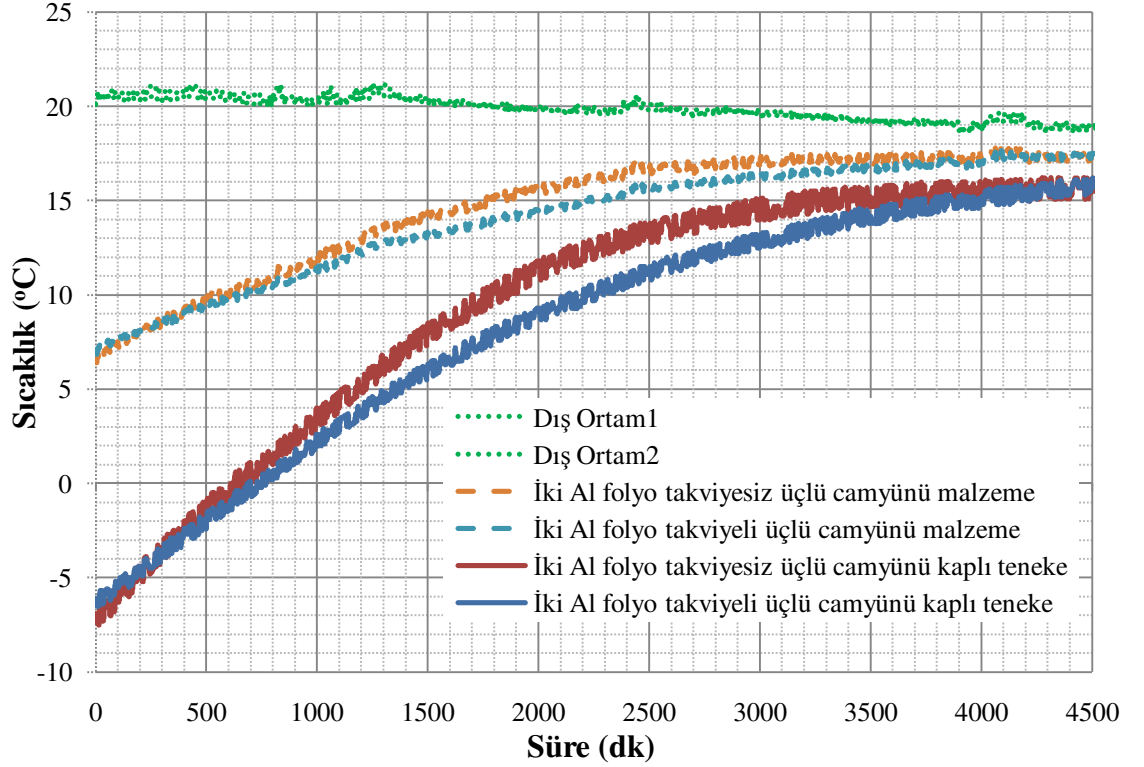
Şekil.3.52. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki “antifrizli” suların ortam sıcaklığında ısınması (1)

Şekil.3.52 incelendiğinde, en geç ısınmanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 9 ve 15 °C aralığında ve 15 ve 19 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. İlk sıcaklık aralığı için Şekil.3.52’de takviyesiz yalıtım malzemesi 945 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 1465 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,0313 W/mK alındı. İkinci sıcaklık aralığı için, Şekil.3.52’de takviyesiz yalıtım malzemesi 1080 dk’da, takviyeli yalıtım malzemesi 1485 dk’da bu sıcaklığa ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,03245 W/mK alındı. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.13’deki sonuçlardan görülebilir. 12 ve 17 °C sıcaklıkları için, EP500 cihazından 0,0226 ve 0,0286 W/mK efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Çizelgeden elde edilen değerler, yaklaşık olarak sırasıyla %5 ve %10 farklılıkta yer almaktadır.

Çizelge.3.13. Ortalama numune sıcaklığı 12 ve 17 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğinin değişimi

Deneyle	%98-99 dolu (Şekil.3.52)							
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	9	15	9	15	15	19	15	19
İç Sıcaklığı (°C)	-4,8	6,7	-5,3	7,6	6,7	15	7,6	15,2
Ortam Sıcaklığı (°C)	22,55	23,05	22,9	22,3	23,05	22,95	22,3	22,65
Süre Aralığı (dk)	100	1565	225	1170	1565	3050	1170	2250
Süre (dk)	1465		945		1485		1080	
Ke (W/mK)	0,0201		0,03125		0,025038		0,03222	

Şekil.3.53’de, yaklaşık 20,1 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki soğuk suyun sıcaklıkla değişimi (ısınma) verildi. Su başlangıç sıcaklıkları ise, alüminyum folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde sırasıyla -6,1 °C ve -6,9 °C’dir.



Şekil.3.53. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki “antifrizli” suların ortam sıcaklığında ısınması (2)

Şekil.3.53 incelendiğinde, en geç ısınmanın bu çalışmada da takviyeli numunede olduğu görüldü. 10 ve 17 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.53’de takviyesiz yalıtım malzemesi 2135 dk’da, takviyeli yalıtım malzemesi 3080 dk’da bu sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.14’deki sonuçlardan görülebilir. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,03155 W/mK alındı.

Çizelge.3.14. Ortalama numune sıcaklığı 13,5 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğin değişimi

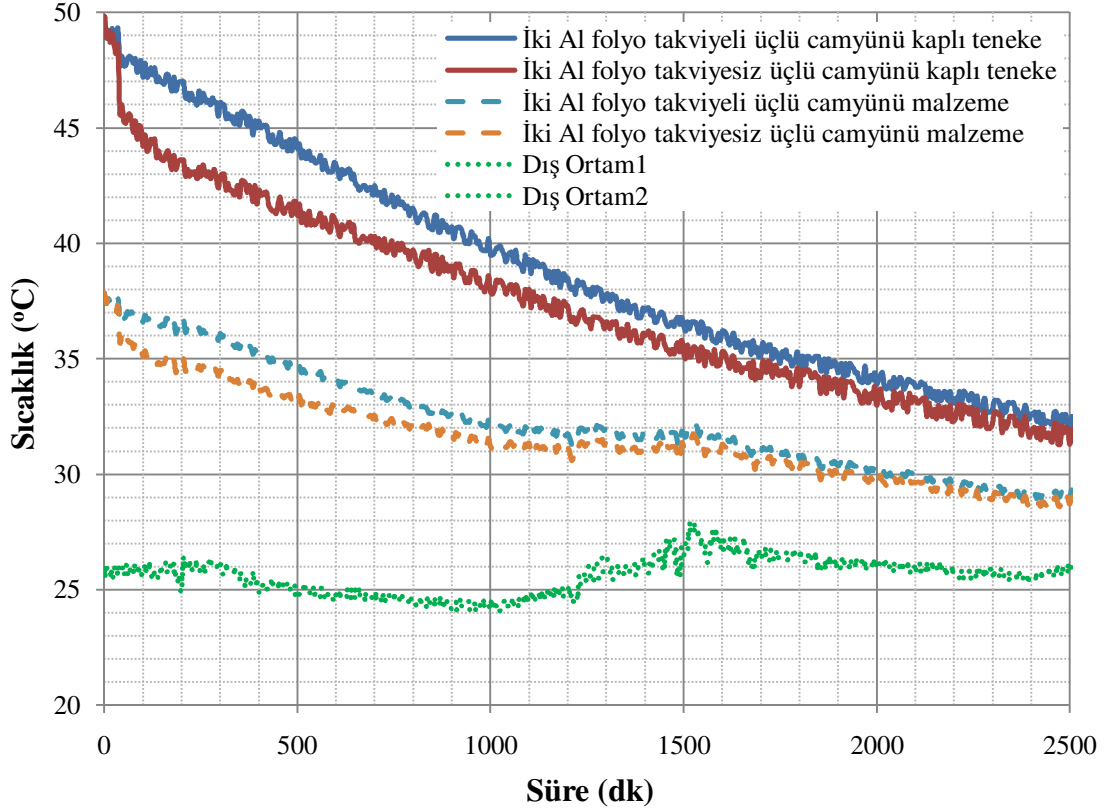
Deney	%98-99 (Şekil.3.53)			
	Takviyeli		Takviyesiz	
Numune tipi				
İncelenen Sıcaklık Aralığı	10	17	10	17
İç Sıcaklığı (°C)	0,5	15,1	-0,5	14,3
Ortam Sıcaklığı (°C)	10,45	19,05	20,55	19,65
Süre Aralığı (dk)	635	3715	530	2665
Süre (dk)	3080		2135	
Ke (W/mK)	0,025857		0,03155	

13,5°C sıcaklık için, EP500 cihazından 0,02444 W/mK efektif ısı iletkenlik olarak ölçüldü. Çizelgeden elde edilen değer, yaklaşık olarak ölçülen değerleri ile uyumludur. Buradan, alüminyum folyo takviyesinin gözenekli yalıtım malzemesine düşük sıcaklıklar (20 °C) altında düşük bir efektif ısı iletkenlik sağladığı söylenebilir.

3.5.3. Ortam içerisinde “iki folyolu üç tabakalı” camyününde soğuma

Bu çalışmada yaklaşık %92 ve % 99 dolu iki tenekedeki sıcak suyun zamanla soğuması iki farklı deneyde ele alındı. Bu iki farklı deneyde ısıtılan su, 4,6 ve 4,95 litrelik olarak iki yağ tenekesine koyuldu. 5 dakikada bir ve dakikada bir alınan ölçümlere göre şekiller çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.54 ve Şekil.3.55’de verildi.

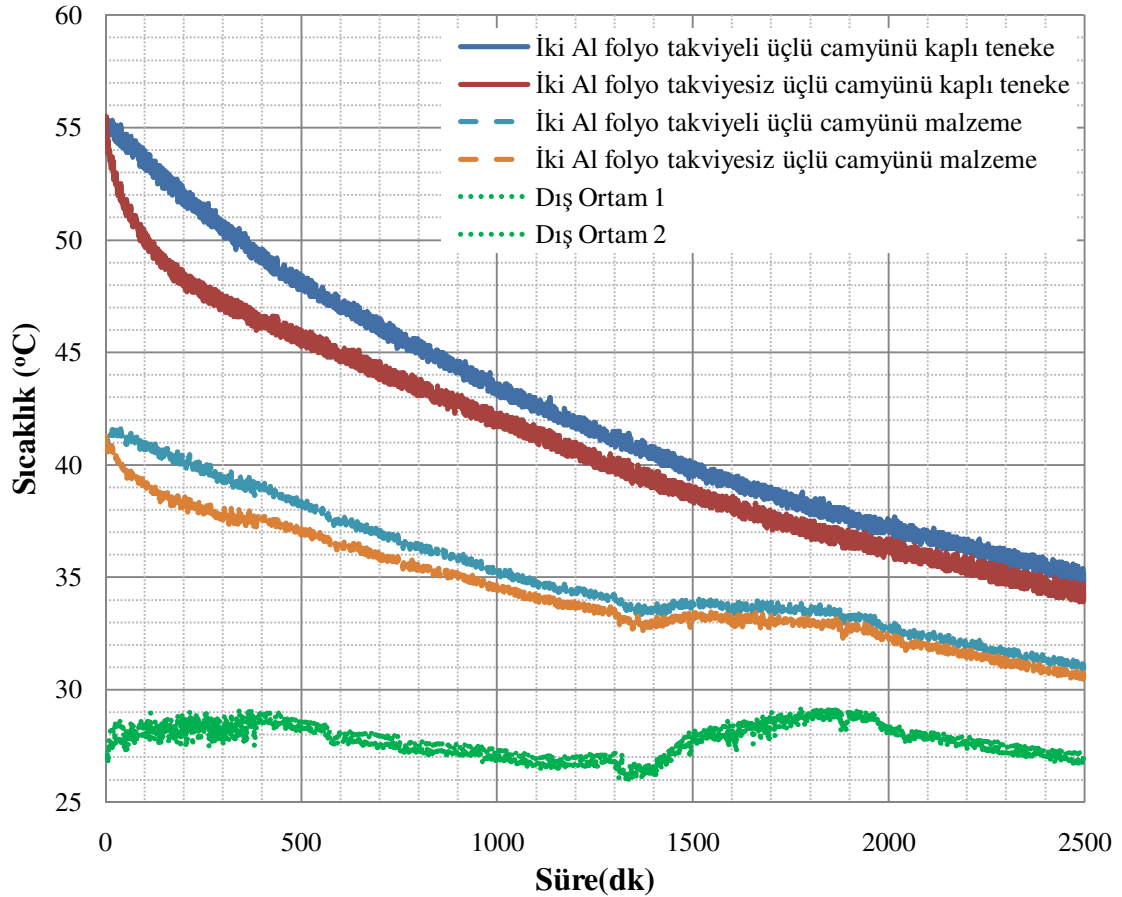
Şekil.3.54’de yaklaşık 25,85 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki sıcak suyun soğuma süresi incelendi. Burada, iki yağ tenekesine 4,6 litrelik sıcak su koyuldu. Su başlangıç sıcaklıkları ise, alüminyum folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde sırasıyla 49,6 °C ve 49,8 °C’dir.



Şekil.3.54. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması (1)

Şekil.3.54 incelendiğinde, en hızlı soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 36 ve 30 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.54’de takviyesiz yalıtım malzemesi 1890 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 1805 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,0355 W/mK alındı. Bu şekilde elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.15’deki sonuçlardan görülebilir.

Şekil.3.55’de, yaklaşık 27,05 °C sıcaklıktaki ortama yerleştirilen tenekelerdeki sıcak suyun soğuma süresi incelendi. Burada, iki yağ tenekesine 4,95 litrelik sıcak su koyuldu. Su başlangıç sıcaklıkları ise, alüminyum folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde sırasıyla 55,3 °C ve 55,5 °C’dir.



Şekil.3.55. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki sıcak suların ortam sıcaklığında soğuması (2)

Şekil.3.55 incelendiğinde, en hızlı soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 40 ve 34 °C aralığında bu grafikteki ısınma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.55’de, takviyesiz yalıtım malzemesi 1108 dk’da, takviyeli yalıtım malzemesi 1051 dk’da bu sıcaklığa ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,036 W/mK olarak alındı. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.15’deki sonuçlardan görülebilir. Ayrıca bu

denklemden, aynı sıcaklık farkı aralığında ele alınarak efektif ısı iletkenlik oranı elde edildi. Bu gözenekli yalıtım malzemeye alüminyum folyo takviyesinin yalıtım özelliğini kaybettirmektedir. Alüminyum folyolu üçlü camyünü numunesi kaplı tenekenin daha hızlı soğuduğu görülmektedir. Bu ise, takviyeli numunede efektif ısı iletkenliğinin yüksek çıkmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge.3.15. Ortalama numune sıcaklığı 33 ve 37 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğinin değişimi

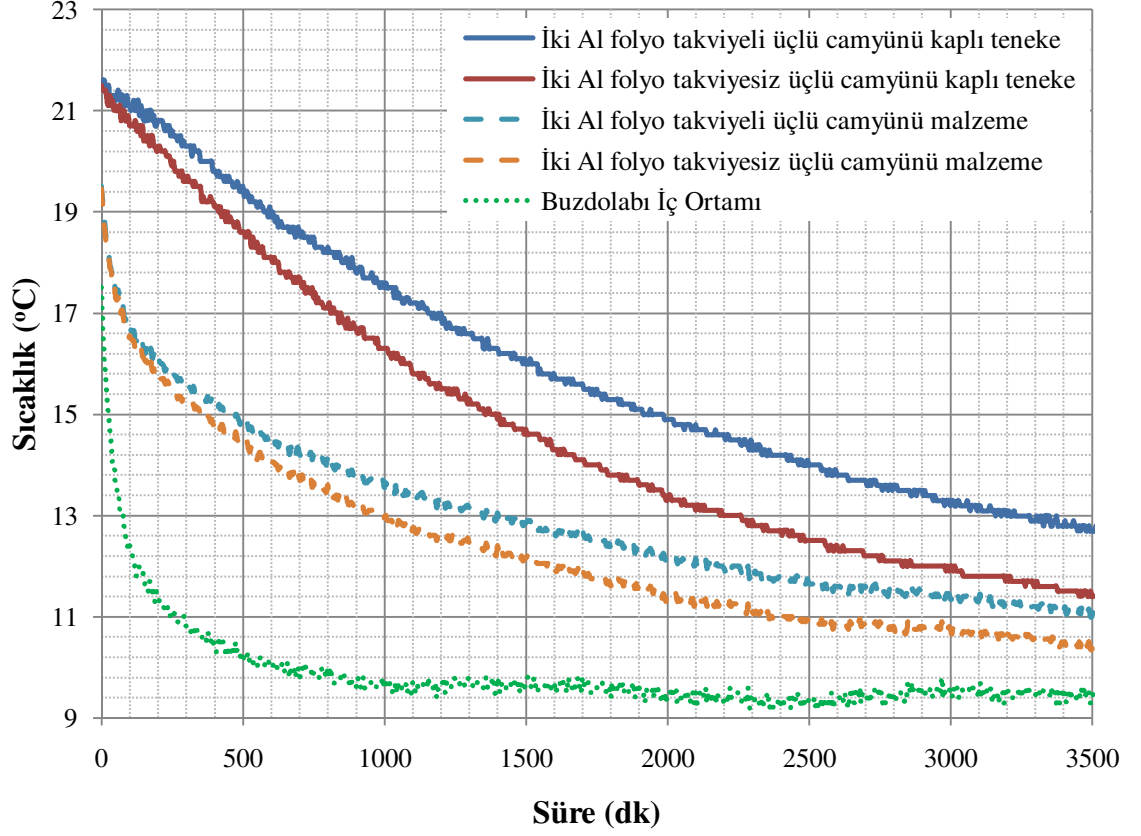
Akışkan Kütle (kg)	4,6 (Şekil.3.54)				4,95 (Şekil.3.55)			
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	36	30	36	30	40	34	40	34
İç Sıcaklığı (°C)	46	34	46	34	51,60	41,3	51,90	41,30
Ortam Sıcaklığı (°C)	25,85	25,9	25,8	26,05	28,5	26,7	28,15	26,75
Süre Aralığı (dk)	325	2130	60	1950	232	1303	43	1151
Süre (dk)	1805		1890		1051		1108	
Ke (W/mK)	0,0372		0,0355		0,038		0,036	

33 ve 37 °C sıcaklıklar için, EP500 cihazından 0,048 W/mK ve 0,053 W/mK efektif ısı iletkenlikler belirlendi. Çizelgeden elde edilen değerler, takviyesiz numuneye göre yüksek efektif ısı iletkenlikte olduğunu göstermektedir. Burada, ölçüm değerlerinden farklı efektif ısı iletkenlik değerlerine ulaşıldı.

3.5.4. Buzdolabında “iki folyolu üç tabakalı” camyünüde soğuma

Deneylere, 5 litrelik iki yağ tenekesine su doldurularak başlandı. Ardından, takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü kaplı tenekeler buzdolabına yerleştirildi. Son olarak, bu tenekelerdeki suyun zamanla soğuması gözlemlendi. 5 dakikada 1 alınan ölçümlere göre, grafikler çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.56 ve Şekil.3.57’de verildi. Şekil.3.56’da, düşük su başlangıç sıcaklıkları altında yaklaşık 9,5 °C sıcaklıktaki buzdolabına yerleştirildi. Başlangıç su sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ve

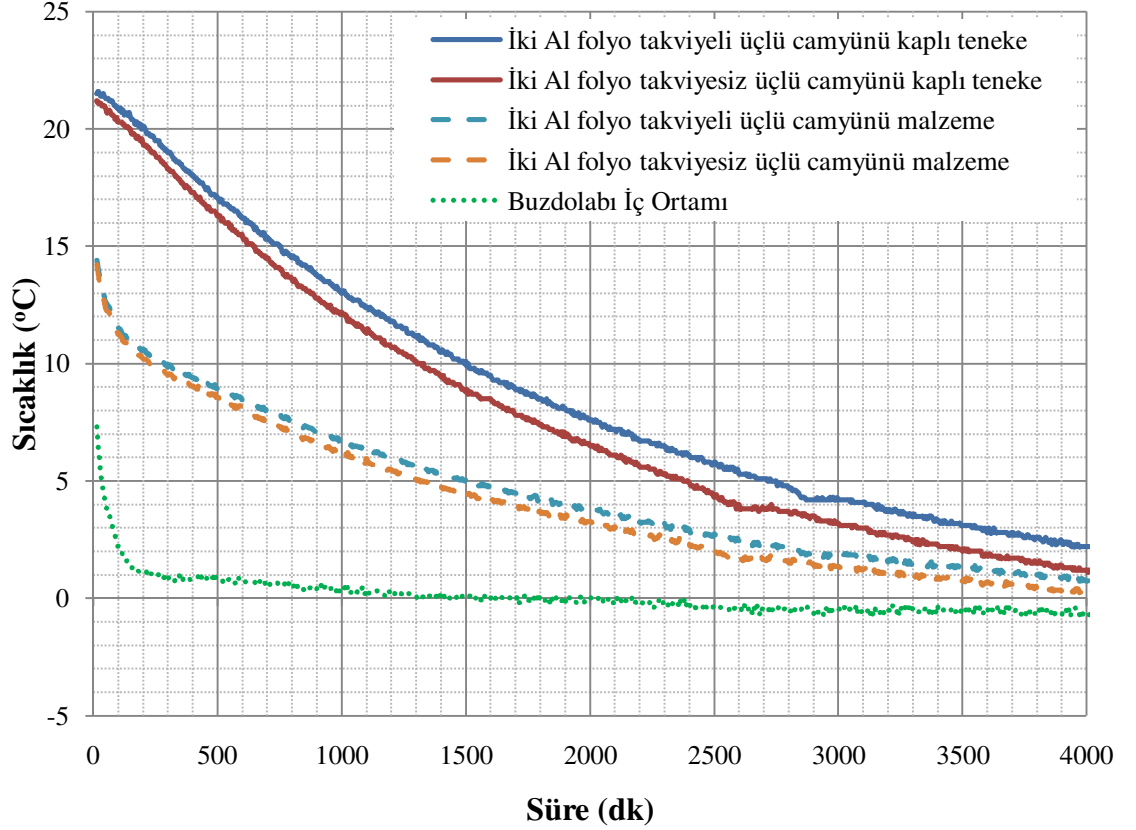
takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde sırasıyla 21,5 °C ve 21,4 °C' dir Yerleştirilen tenekelerdeki suyun sıcaklıkla değişimi (soğuması) verildi.



Şekil.3.56. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (1)

Şekil.3.56 incelendiğinde, en geç soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 15 ve 11 °C sıcaklık aralığında bu şekildeki soğuma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.56'da takviyesiz yalıtım malzemesi 2075 dk'da, takviyeli yalıtım malzemesi 3195 dk'da bu sıcaklığa ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14'den 0,0315 W/mK alındı. Bu şekilde elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)'de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.16'daki sonuçlardan görülebilir.

Şekil.3.57’de, ikinci soğuma eğrisi görülmektedir. Burada, yaklaşık 9,4 °C sıcaklıktaki buzdolabına yerleştirilen tenekelerdeki suyun sıcaklıkla değişimi (soğuması) verildi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 21,6 °C iken takviyesiz tenekede 21,3 °C’dir.



Şekil.3.57. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (2)

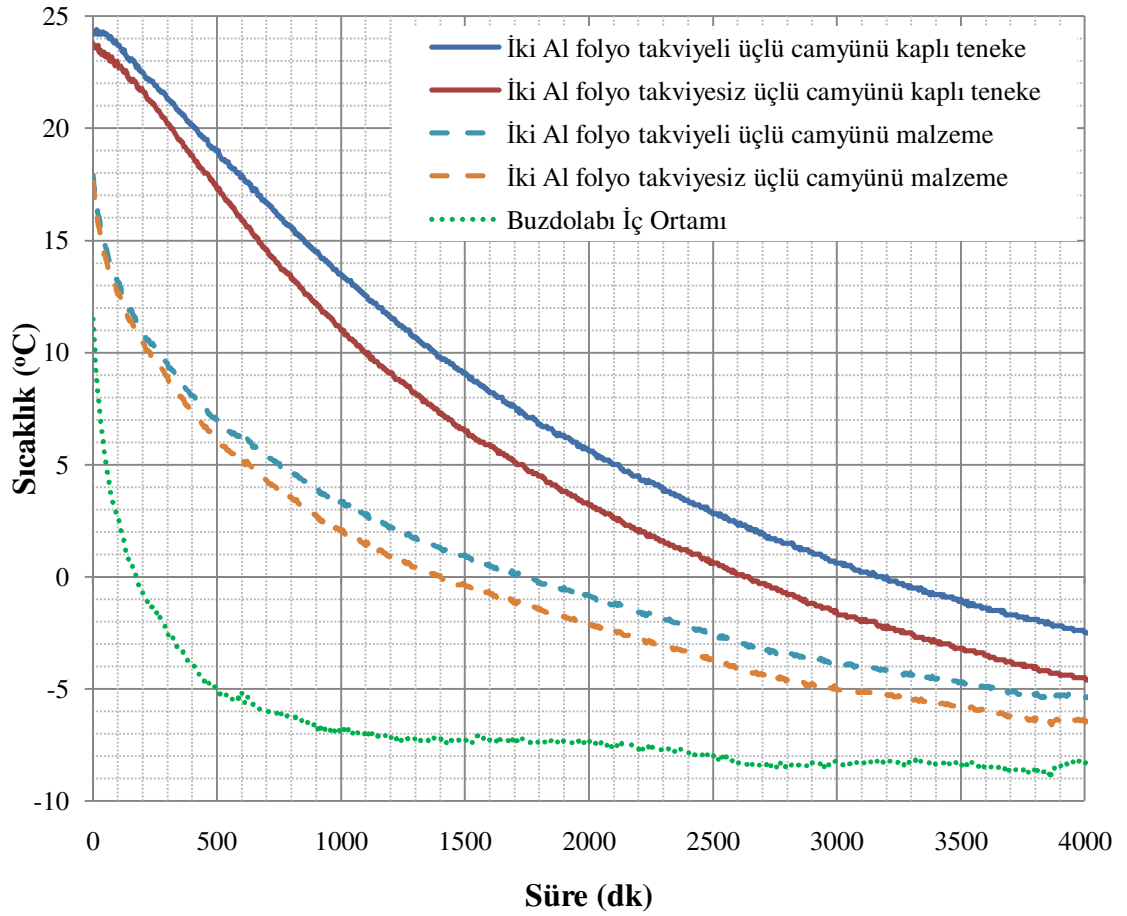
Şekil.3.57 incelendiğinde, en geç soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 8 ve 2 °C aralığında bu şekildeki soğuma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.57’de takviyesiz yalıtım malzemesi 1880 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 2140 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,03 W/mK alındı. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.16’daki sonuçlardan görülebilir.

Çizelge.3.16. Ortalama numune sıcaklığı 13 ve 5 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğinin değişimi

Akışkan Kütlesi (kg)	(Şekil.3.56)				(Şekil.3.57)			
Numune tipi	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	15	11,05	15,05	11	8	2	8	2
İç Sıcaklığı (°C)	19,60	12,7	19,5	12,7	15,3	4,4	15,3	4,4
Ortam Sıcaklığı (°C)	10,4	9,5	10,7	9,3	0,7	-0,4	0,7	-0,4
Süre Aralığı (dk)	460	3655	350	2425	710	2850	615	2495
Süre (dk)	3195		2075		2140		1880	
Ke (W/mK)	0,022718		0,0315		0,026355		0,03	

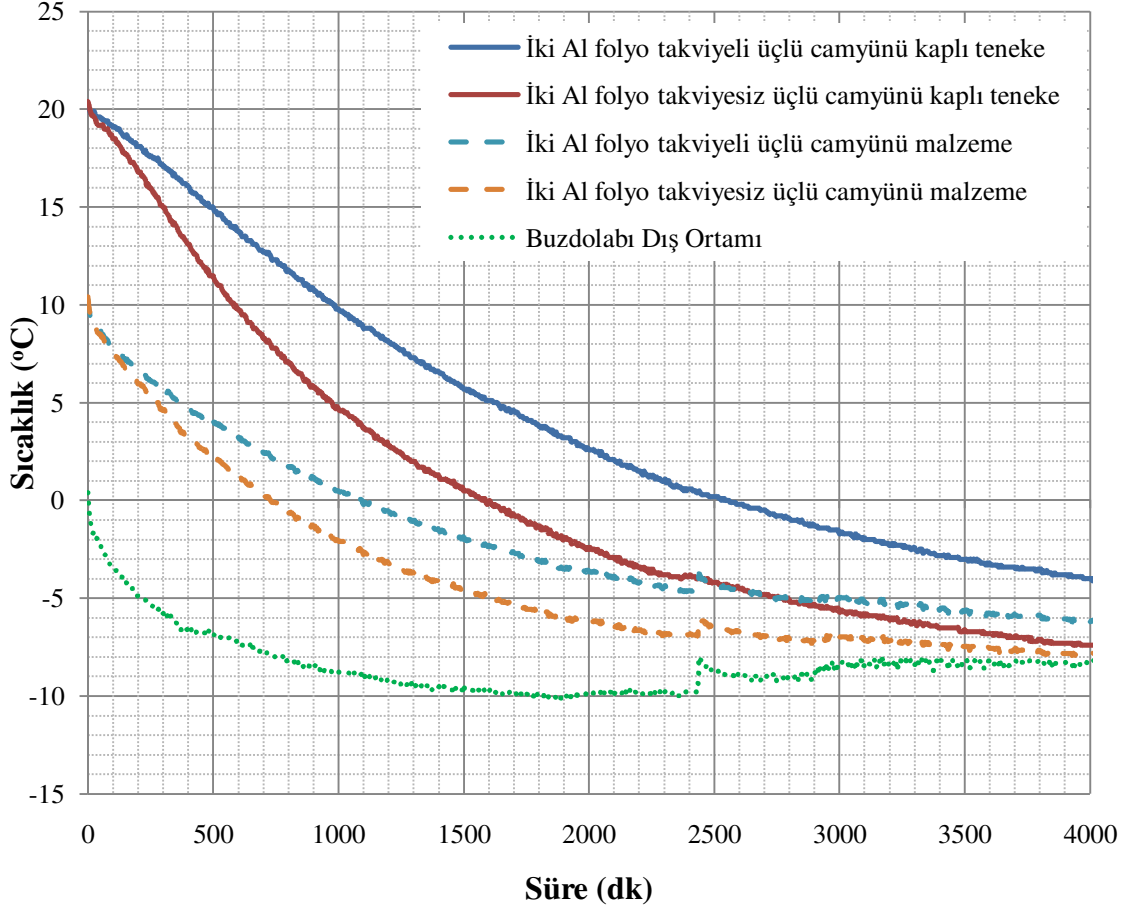
13 ve 5 °C sıcaklıklar için, EP500 cihazından 0,0238 ve 0,0141 W/mK efektif ısı iletkenlikleri belirlendi. Çizelgeden elde edilen değerler, takviyesiz numuneye göre yüksek efektif ısı iletkenlikte olduğu görülmektedir. 13 °C sıcaklıkta, ölçüm değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edildi. Ancak, 5 °C sıcaklıkta ölçüm değerinden farklı efektif ısı iletkenliktedir.

İkinci olarak, 5 litrelik iki yağ tenekesi yaklaşık %30 antifrizli su ile doldurularak deneyler yapıldı. Öncelikle takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü kaplı tenekeler, buzdolabına yerleştirildi. Ardından, bu tenekelerdeki antifrizli suyun zamanla soğuması gözlemlendi. Dakikada ve 5 dakikada 1 alınan ölçümlere göre, şekiller çizildi. Bu ölçümler, Şekil.3.58 ve Şekil.3.59'da verildi. Şekil.3.58'de, yaklaşık -7 °C sıcaklıktaki buzdolabına yerleştirilen tenekelerdeki suyun sıcaklıkla değişimi (soğuması) verildi. Burada su başlangıç sıcaklıkları, alüminyum folyo takviyeli ikili camyünü numunesi kaplı tenekede 24,3 °C iken takviyesiz tenekede 23,9 °C'dir. Şekil.3.59'da, yaklaşık -8 °C sıcaklıktaki buzdolabına yerleştirilen tenekelerdeki suyun sıcaklıkla değişimi (soğuması) verildi. Su başlangıç sıcaklıkları ise, alüminyum folyo takviyeli ve takviyesiz ikili camyünü numunesi kaplı tenekelerde sırasıyla 20,1 °C ve 20,4 °C'dir.



Şekil.3.58. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekeledeki antifirizli suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (1)

Şekil.3.58 incelendiğinde, en geç soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 5 ve -5 °C aralığında bu şekildeki soğuma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.58’de takviyesiz yalıtım malzemesi 2350 dk’da bu sıcaklığa ulaşırken takviyeli yalıtım malzemesi 2885 dk’da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14’den 0,029 W/mK alındı. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)’de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.17’deki sonuçlardan görülebilir.



Şekil.3.59. İki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü cam yünü numunelerle kaplı tenekelerdeki antifirizli suların (ortam sıcaklığında) buzdolapta soğuması (2)

Şekil.3.59 incelendiğinde, en geç soğumanın takviyeli numunede olduğu görüldü. 5 ve -5 °C aralığında bu şekildeki soğuma süreleri takviyeli ve takviyesiz camyünü numuneler arasında incelendi. Burada, ortalama süreler karşılaştırıldı. Şekil.3.59'da takviyesiz yalıtım malzemesi 1340 dk'da bu sıcaklığa ulaşırken, takviyeli yalıtım malzemesi 2380 dk'da ulaşmaktadır. Burada takviyesiz camyünü numunelerinin ısı iletkenliği, sıcaklığa göre Şekil.3.14'den 0,029 W/mK alındı. Bu şekilden elde edilen sürelerin her biri, denklem (2.94)'de yerine koyularak efektif ısı iletkenlik değişimi elde edildi. Bu, Çizelge.3.17'deki sonuçlardan görülebilir. 0 °C sıcaklık için, EP500 cihazından 0,008 W/mK efektif ısı iletkenlikte olduğu belirlendi. Çizelgeden elde edilen değerler, takviyesiz numuneye göre düşük efektif ısı iletkenlikte ve anlamlı sonuçlardır. Buna karşın, bu değerlerin ölçüm değerinden farklı efektif ısı iletkenlikte olduğu görülebilir.

Çizelge.3.17. Ortalama numune sıcaklığı 0 °C olan iki Al folyo takviyeli ve takviyesiz üçlü camyünü numunelerinde efektif ısı iletkenliğin değişimi

Deneyler	(şekil.3.58)				(şekil.3.59)			
	Takviyeli		Takviyesiz		Takviyeli		Takviyesiz	
İncelenen Sıcaklık Aralığı	5,05	-5,05	5	-5	5,05	-5,05	5,05	-5
İç Sıcaklığı (°C)	16,1	-1,5	15,6	-1,6	16,40	-0,8	15,6	-0,2
Ortam Sıcaklığı (°C)	-6	-8,4	-5,4	-8,3	-6,30	-9,3	-5,5	-9,8
Süre Aralığı (dk)	770	3655	650	3000	370	2750	275	1615
Süre (dk)	2885		2350		2380		1340	
Ke (W/mK)	0,023		0,029		0,01632		0,029	

Sonuç olarak, bu şekillerden ve çizelgeden gözenekli yalıtım malzemesine alüminyum folyo takviyesinin düşük sıcaklıklarda daha iyi bir yalıtım özelliği kazandırdığı anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise, olumsuz bir efektif ısı iletkenlik kazandırdığı görölmektedir.

3.6. EP500 Isıl İletkenlik Sonuçlarının SPSS 1.7 ile Analizi

Bu kısımda deneylerden elde edilen ve numune şartlarına bağlı olarak efektif ısı iletkenlikte meydana gelen değişimler istatistiksel olarak değerlendirildi. Numunenin efektif ısı iletkenliğinin numune sıcaklığında verdiği sonuç ise, analiz sonuçları üzerinden yorumlandı. Aynı şekilde sıcaklık farkının da etkisi istatistiksel metotlar ile incelendi. Burada alüminyum folyo takviye ilavesinin etkisi de ele alındı. Yapılan analizler, numune şartlarının özellikle sıcaklığın efektif ısı iletkenlik üzerinde etken olduğu, ancak sıcaklık farkının takviyeye göre etkenliği değişmektedir. Bu nedenle sadece üçlü EPS (strafor) numunesinin efektif ısı iletkenlik değerleri üzerine yapılan istatistiksel analizler gerçekteştirildi.

İstatistiksel sonuçlar, Çizelge. 2.3'deki analiz denklemlerini kullanan SPSS 1.7 programından elde edildi. ANOVA çizelgesi ile herhangi bir faktörün veya faktör

keşiflerinin etkilerinin olup olmadığı incelendi. S-N-K testi ile ise etken olan faktörün her bir seviyesinin etkisi ele alındı. Bu faktör seviyeleri arasındaki fark değerlendirildi. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazından üçlü EPS numunesinin takviyesiz ve takviyeli olması durumuna göre alınan değerler üzerinde duruldu. Ayrıca takviyesiz ve takviyeli üçlü strafor için diğer analizlerin sonuçları, program çıktısı olarak Ek-2 ve Ek-3’de verildi.

3.6.1. Sıcaklık için yapılan analizler

Üçlü EPS numunesi için sıcaklık ve sıcaklık farkı olmak üzere yapılan 2 faktörlü tasarımda etkinin sıcaklıkta olduğu görüldü. Ancak bu etkinin tam bir etki olmadığı istatistiksel analizde görüldü. Bu sonuç, hem EP500 ölçüm grafiklerinden hem de istatistiksel analizde bulundu. Bu nedenle takviye olmadan numunelerde yapılan deneysel ölçümlerde efektif ısı iletkenlik üzerine herhangi bir parametrenin etkisinin olmayacağı görüldü. Ancak sıcaklık etkisi üçlü EPS numunesine takviye koyulduğunda tam bir etkiye sahip anlamlı bir etki olarak görülebilmektedir. Bu numune içinde sıcaklık ve sıcaklık farkı olarak 2 faktörlü analiz yapıldı.

Efektif ısı iletkenlik üzerine sıcaklığın, sıcaklık farkının ve etkileşiminin SPSS ile yapılan analiz sonucu elde edilen ve Çizelge 3.18. ile Çizelge 3.19.’ da verilen ANOVA çizelgelerinde görülmektedir.

Çizelge.3.18. Alüminyum folyo takviye edilmeyen üçlü EPS numunesi için ANOVA

Kaynak	Kareler toplamı (Tip III)	Sd	Kareler Ortalama (MS)	F _i (MS/Hata)	p	η_i^2	Kabul ve Ret
Sıcaklık	698,814	7	99,831	1,189	,366	,357	Kabul
Sıcaklık Farkı	23,518	2	11,759	,140	,870	,018	Kabul
Sıc. * Sıc.Farkı	274,942	14	19,639	,234	,995	,179	Kabul
Hata	1259,846	15	83,990				
Toplam	80616,309	39					

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik
Sd: serbestlik derecesi, η_i^2 : etki büyüklüğü, p: F’in olasılığı (anlamlılık değeri).

Çizelge.3.19. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi için ANOVA

Kaynak	Kareler toplamı (Tip III)	sd	Kareler Ortalama (MS)	F _i (MS/Hata)	p	η^2 _i	Kabul ve Ret
Sıcaklık	27749,889	6	4624,982	477,833	,000	,990	Ret
Sıcaklık Farkı	1036,292	2	518,146	53,533	,000	,793	Ret
Sıc. * Sıc.Farkı	3017,097	7	431,014	44,531	,000	,918	Ret
Hata	271,014	28	9,679				
Toplam	142661,294	44					

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Takviyesiz üçlü EPS numunesi için SPSS 1.7 analiz programı ile %5 anlamlılık seviyesinde yapılan S-N-K testi sonuçları Çizelge 3.20' de, güven aralığı ise Çizelge.3.21'de verilmektedir. ANOVA çizelgesinden sadece hangi faktörün etken olduğu görülmektedir. S-N-K testi ve güven aralığı ile ise etken faktörün her bir seviyesi değerlendirilebilmektedir.

Çizelge.3.20. Takviyesiz üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık sonuçları

Efektif ısı iletkenlik : Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık	Deney sayısı	Altküme
		1
5	7	37,112857
0	7	42,174286
10	6	44,400000
15	6	45,696667
20	3	47,073333
25	3	48,840000
32	3	50,506667
40	4	52,677500
p		,272

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması gösterilememektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 83.990'dır. a. Harmonik ortalama örnek boyutunu : 4.280.

b. Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir. c. Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.3.21. Takviyesiz üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık güven aralığı

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Ortalama	Standart Hata	95% Güven aralığı	
			Alt sınır	Üst sınır
0	42,153	3,944	33,747	50,559
5	38,469	3,527	30,951	45,988
10	44,400	3,741	36,425	52,375
15	45,697	3,741	37,722	53,671
20	47,073	5,291	35,795	58,351
25	48,840	5,291	37,562	60,118
32	50,507	5,291	39,229	61,785
40	52,715	4,830	42,420	63,010

Çizelgelerden görülebileceği üzere, S-N-K test sonuçları faktör seviyeleri arasındaki farkı sunmaktadır. Güven aralığının 10, 15 °C sıcaklıklarda yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç Şekil.3.11’de birbirine yakın sonuçlar vermesinden kaynaklanmaktadır. Takviyesiz üçlü EPS numunesi için şekilden hem yüksek sıcaklıklarda hem de 0 , 5 °C sıcaklıklarda farklılıkların düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan ve S-N-K testinde bu faktörün aynı seviyede olduğu görülmektedir. Buradan sıcaklığın efektif ısı iletkenlik üzerine etkisinin aynı olduğu ve düşük olduğu söylenebilir. Alüminyum folyo takviye edilmesiyle elde edilen üçlü EPS numunesi için S-N-K testi sonuçları da Çizelge 3.22.’de verilmektedir. Bu numune için güven aralığı ise Çizelge.3.25’de ele alındı. Alüminyum folyo takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliğine sıcaklığın etkisi ANOVA testinde anlaşıldı. Bu durum, Çizelge.3.22’de incelendiğinde farklı sıcaklıklarda farklı düzeylerde etkidiği görülmektedir. %95 güven aralığı açısından Çizelge 3.23’e bakıldığında, farklı güven aralıklarında olduğu görülmektedir. Bu farklılık, verilen sıcaklıkla efektif ısı iletkenlik grafiklerindende (Şekil.3.16 ve 3.17) görülebilir. Alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunede sıcaklıktan etkilediği sonucu çıkarılabilir.

Çizelge.3.22. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık sonuçları

Efektif ısı iletkenlik : Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık	Deney Sayısı	Altküme						
		1	2	3	4	5	6	7
5	3	9,526667						
10	4		15,175000					
15	6			21,963333				
20	3				34,926667			
25	11					42,193636		
32	8						66,391250	
40	9							91,044444
p		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalamasını göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 9.679'dır. a. Harmonik ortalama örnek boyutunu : 4,963.

b. Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.

c. Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.3.23. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık güven aralığı

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Ortalama	Standart Hata	95% Güven aralığı	
			Alt sınır	Üst sınır
5	9,527 ^a	1,796	5,847	13,206
10	15,175 ^a	1,556	11,989	18,361
15	19,999	1,404	17,123	22,875
20	34,927 ^a	1,796	31,247	38,606
25	42,542	,965	40,564	44,519
32	65,654	1,120	63,359	67,948
40	91,044	1,037	88,920	93,169

a. Değiştirilmiş populasyon sınır ortalamaya dayanmaktadır.

3.6.2. Sıcaklık farkı için yapılan analizler

Üçlü EPS numunesi için sıcaklık ve sıcaklık farkı olmak üzere yapılan 2 faktörlü tasarımda etkinin sıcaklıkta olduğu görüldü. Ancak sıcaklık farkının etkisinin var olup olmadığı ANOVA testlerinde Çizelge.3.18 ve 3.19'dan anlaşılmaktadır. Buradan takviye olmadan numunelerde yapılan deneysel ölçümlerde efektif ısı iletkenlik üzerine herhangi bir parametrenin etkisinin olmayacağı görüldü. Ancak sıcaklık farkının etkisi üçlü EPS numunesine takviye koyulduğunda tam bir etkiye sahip anlamlı bir etki olarak görülebilmektedir. Ne kadar etki ettiği istatistiksel analiz olarak bu kısımda ele alındı. Bu sonuç, hem EP500 ölçüm grafiklerinden hem de istatistiksel analizde bulundu.

Takviyesiz üçlü EPS numunesi için SPSS 1.7 analiz programı ile %5 anlamlılık seviyesinde yapılan S-N-K testi sonuçları Çizelge 3.24.' de, güven aralığı ise Çizelge.3.25'de verilmektedir. S-N-K testi ve güven aralığı ile etken faktörün her bir seviyesi değerlendirilebilmektedir.

Çizelge.3.24. Takviyesiz üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık farkı sonuçları

Efektif ısı iletkenlik : Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık Farkı	Deney sayısı	Altküme
		1
10	12	42,350833
5	13	45,469231
15	14	46,160714
Sig.		,554

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 83.990'dır. a. Harmonik ortalama örnek boyutunu : 12.949.

b. Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.

c. Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.3.25. Takviyesiz üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık farkı güven aralığı

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Ortalama	Standart Hata	95% Güven aralığı	
			Alt sınır	Üst sınır
5	46,869	2,767	40,971	52,766
10	45,011	2,883	38,866	51,156
15	46,816	2,646	41,177	52,455

Çizelgelerden, S-N-K test sonuçları faktör seviyeleri arasındaki farkın aynı seviyede olduğu görülebilmektedir. Güven aralığının 5, 10, 15 °K sıcaklık farklarında yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç Şekil.3.11’de birbirine yakın sonuçlar vermesinden kaynaklanmaktadır. Takviyesiz üçlü EPS numunesi için şekilden efektif ısı iletkenliklerin bu sıcaklık farklarında farklılıkların belirsiz olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan ve S-N-K testinde bu faktörün anlamsız olduğu söylenebilir. Alüminyum folyo takviye edilerek üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için ise SPSS 1.7 analiz programı ile S-N-K testi yapıldı. %5 anlamlılık seviyesinde Çizelge 3.26.’ da bu test sonuçları ve Çizelge.3.27’de güven aralığı verilmektedir. S-N-K testi ve güven aralığı ile etken faktörün her bir seviyesi değerlendirilebilmektedir.

Çizelge.3.26. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesi efektif ısı iletkenliği için S-N-K testi sıcaklık farkı sonuçları

Efektif ısı iletkenlik : Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık Farkı	Deney Sayısı	Altküme	
		1	2
15	16	40,019375	
10	18	42,048333	
5	10		74,332000
Sig.		,098	1,000

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 9.679’dır. a. Harmonik ortalama örnek boyutunu : 13.758.

b. Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir. c. Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.3.27. İki alüminyum folyo takviyeli üçlü EPS numunesinin efektif ısı iletkenliği için sıcaklık farkı güven aralığı

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık Farkı	Ortalama	Standart Hata	95% Güven aralığı	
			Alt sınır	Üst sınır
5	63,587 ^a	1,100	61,334	65,840
10	41,428 ^a	,769	39,853	43,003
15	38,268 ^a	,792	36,645	39,890

a. Değiştirilmiş populasyon sınır ortalamaya dayanmaktadır.

Alüminyum folyo takviyeli numunenin efektif ısı iletkenliğine sıcaklık farkının etkisi ANOVA testinde anlaşıldı. Bu durum, Çizelge.3.27’de incelendiğinde 5 K sıcaklık farkında farklı düzeylerde etkidiği görülmektedir. %95 güven aralığı açısından Çizelge 3.26’e bakıldığında bu sıcaklık farkında farklı güven aralığında olduğu görülmektedir. Bu farklılık, verilen sıcaklıkla efektif ısı iletkenlik grafiklerinden de (Şekil.3.16 ve 3.17) görülebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada gözenekli yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletim katsayılarının hesabı, efektif ısı iletim katsayısının iyileştirilmesi ve etki eden bazı mekanizmaların deneysel olarak gözlenmesine çalışıldı. Bu amaçla, önce yaygın olarak kullanılan hesaplama teknikleri araştırılarak uygulama kolaylığı ve tahmin sınırları veya kullanım aralıklarını da dikkate alarak bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak incelendi. İkinci aşamada, doğal taşınım ve difüzyon mekanizmasının etkisi teorik ve deneysel olarak belirlenmeye çalışıldı. Üçüncü aşamada, mevcut deneysel imkânlar dâhilinde ışıınım etkisi araştırıldı. Bu amaçla farklı malzemeler ve farklı takviye maddeleri kullanılarak sıcaklık, sıcaklık farkı ve takviye konum ve sayılarına bağlı olarak incelendi. Bu mekanizmanın teorik davranışı tam anlaşılammakla birlikte önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlendi. Dördüncü aşamada, ışıınım mekanizmasının etkisini uygulamalı olarak gözlemek için depo ve izolasyonun değişik ortalama sıcaklıklarda davranışı deneysel olarak incelendi. Sonuçta, benzer davranış gösterdiği görüldü. Bu, pratik uygulama açısından önemli bir sonuçtur. Ancak, bu davranış teorik esaslar açısından tam olarak izah edilememiştir. Üzerinde çalışılması gerekmektedir. Çalışma ile elde edilen ana bulgular maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

1. Gözenekli malzemelerin efektif ısı iletim katsayısı çok sayıda parametrenin etkisindedir. Az sayıda parametreyi dikkate alarak genel uygulama alanı oluşturmak mümkün değildir.
2. Sadece yalıtım malzemesini oluşturan bileşenlerin iletim katsayılarını ve hacim oranlarını dikkate alan modeller yoğunlukta olup her bir model için gözeneklilik ve iletkenlik oranları, sıcaklık farkı ve malzeme cinslerini dikkate alarak kullanmak gerekir. Bunun için modeller ve kullanım şartları Ek.1’de verilmiştir.
3. Gözenek büyüklüğü, şekli, dağılımı ve lif veya tanecik yapısını dikkate alan modeller olmakla birlikte uygulaması zordur. Etki oranı ise, çok büyük gözeneklerde dikkate alınması uygundur. Lif yapı ve yerleşimi de, kısmi olarak sonucu etkilemektedir.

4. Difüzyon ve ışıınımı dikkate alan modeller bulunmakla birlikte iyi tanımlanmış yapılar da ele alınması uygundur. Genelde buhar difüzyonu dikkate alınmıştır. Genel kanaat normal yalıtım malzemeleri için ortalama serbest yolun (nm) altındaki gözenekler için etkinin önemli olduğu büyük gözeneklerde (mikron, mm...) ihmal edilebileceği düşünülmektedir.
5. Gözeneklerin kapalı olması efektif iletim katsayısını sadece iletim mekanizmasına yaklaştırmakta diğer mekanizmaların etkisini azaltmaktadır.
6. Doğal taşınım etkisi az olup gözeneklerin büyüklüğüne, konumuna ve sıcaklık farkına bağlıdır. Deneysel olarak, çift plakalı deney tesisatında üst plaka ile alt plaka arasındaki sıcaklık farkları belirgindir. Üst kısımda sıcaklık farkı daha az iken alt plakada daha fazladır. Sıcaklık farkı arttıkça iki plaka arasındaki fark artmaktadır. Küçük sıcaklık farklarında sapma %5 sınırları içinde iken, büyük sıcaklık farklarında sapma artmaktadır. Bu etki, tek numuneli cihazda gözlenmemektedir. Bu açıdan, yüksek sıcaklık farklarında iki plakalı deney sisteminde ölçülen efektif ısı iletkenliği bir miktar daha büyüktür.
7. Taşınım etkisini ve/veya difüzyon etkisini gözlemek için cam yünü yalıtım malzemelerinin arasına ince naylon tabakaları koyarak yapılan ölçümlerde, 0-40 °C ortalama sıcaklık aralığında naylon takviyeli ve takviyesiz durumlar arasında %5 hata sınırlarında kalan ancak sıcaklık ve sıcaklık farkıyla artan bir fark gözlenmiştir. Bunun kısmen difüzyon ve kısmen ışıınım etkisinde olduğu düşünülmekte ancak daha belirgin olması için aralıkların artırılarak kapalı gözeneklere yaklaştırılması ve sıcaklık farkının artırılması ile daha iyi gözlenebileceğine karar verilmiş ancak deneysel imkânlar elvermediğinden deney yapılamamıştır.
8. Yalıtım malzemelerinde aynı ortalama sıcaklıkta sıcaklık farklarının değişik olması halinde efektif ısı iletim katsayısı değişmektedir. Dolayısıyla efektif ısı iletim katsayısı verilirken ortalama sıcaklık yanında sıcaklık farkının da verilmesinin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

9. Yalıtım malzemelerinin içinde emisivite değerleri düşük malzemelerin yerleştirilmesi efektif ısı iletim katsayısını değiştirmektedir. Takviye malzemesinin ilavesi ile ilavesiz durum arasında belli bir ortalama sıcaklıkta (kritik sıcaklık) aynı değerler elde edilirken bu sıcaklığın üzerinde efektif ısı iletim katsayısı sıcaklıkla daha hızlı artmakta daha düşük sıcaklıklarda ise daha hızlı düşmektedir.
10. Yalıtım malzemesi cinsine göre, kritik sıcaklık değeri değişmektedir. Ölçülen malzemelerde bu sıcaklık 18-28 °C aralığında elde edilmiştir.
11. Takviye malzemesinin cinsine bağlı olarak efektif ısı iletim katsayısı değişmektedir. Malzemenin iletkenliği arttıkça değişim daha fazla olmaktadır. Deneyde bakır folyo, alüminyum folyo, çelik levha, kağıt kullanılmıştır.
12. Takviye sayısının artması efektif ısı iletim katsayısını daha fazla değiştirmektedir. Düşük sıcaklıklarda daha yalıtkan büyük sıcaklıklarda daha iletken yapmaktadır.
13. Aynı ortalama sıcaklıkta, sıcaklık farkının değişmesi efektif ısı iletim katsayısını hızla değiştirmektedir.
14. Takviye malzemesinin konumu ya da sıcak veya soğuk yüzeye yakın olması efektif ısı iletim katsayısını etkilemektedir.
15. Takviye malzemeleri arasındaki mesafenin fazla artması etkisini azaltmaktadır.
16. Takviye malzemesini etkili olması için iki tabakadan fazla kullanılması gerekmektedir. Tek takviye malzemesi ile ciddi bir değişim gözlenmemektedir.
17. Sıcak yüzey izolasyonlarında alüminyum folyo takviyeli kullanılması iletkenliği artırmakta dolayısıyla kullanılması uygun değildir.
18. Takviye malzemesi uygun düzende kullanılması halinde 10 °C altındaki sıcaklıklarda malzemeye bağlı olarak efektif ısı iletim katsayısını %50-90 oranında azaltmak mümkündür.
19. Özellikle binaların kış dönemi ısı izolasyonları için takviyeli yalıtım malzemesi önemli bir buluş olup ciddi oranda kayıpları azaltması mümkündür.

20. 0 °C altındaki sıcaklıklarda ölçme imkânı olmadığından nasıl bir davranış göstereceği belirlenememiştir. Cam yününde, cihaz ölçme sınırı olan 0.005 W/mK değerine kadar düşülmüştür. Bu %80 oranında bir iyileşme demektir.
21. Cihaz ölçme sınırı olarak yüksek sıcaklık bölgesinde 40 °C ortalama sıcaklığa kadar ölçme yapılabilmektedir. +40 °C sıcaklıkta malzeme cinsi, takviye durumu ve sıcaklık farkına bağlı olarak takviyesiz duruma göre % 200'e kadar artış gözlenmiştir. Bu artışın sınırı veya daha yüksek sıcaklıklarda davranışı incelenmeye değerdir. Ancak literatürde 800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda takviye malzemelerinin ilavesi ile efektif ısı iletim katsayısının azaldığı deneysel olarak gösterilmiştir.
22. Takviye malzemelerinin ilavesinin iletkenliği artırması genel kabullere ve bilinen teorik düşüncelere uygun olup aşırı azalması veya iyileştirmesi teorik açıdan izah edilememiştir. Konu üzerinde çalışılması gerekmektedir.
23. Takviyeli yalıtım malzemelerinin zamana bağlı özelliklerindeki değişim bilinmemektedir. Malzemenin belirli bir ömrü olup olmadığı ve korozyon vb. etkilerin malzemenin davranışını nasıl etkilediği bilinmemektedir.
24. Kritik sıcaklığın hangi parametrelere bağlı ifade edilebileceği ve istenen değerde olması için nasıl bir malzeme kombinasyonu gerekli olduğu incelenmelidir. Bu, uygulama ve ticari açıdan önemli bir araştırma alanıdır.
25. Ekonomik açıdan uygulanabilirliği, uygulama alanları ve performansı araştırılmalıdır.

Sonuç olarak gerek bilimsel açıdan ve gerekse endüstriyel açıdan bakıldığında önemli katkıları olacak sonuçlara ulaşılmıştır. Klasik yalıtım malzemelerinin en azından belirli şartlarda efektif ısı iletim katsayısının önemli ölçüde azaltılabileceği deneysel olarak gösterilmiş ve bir uygulama örneği ile test edilmiştir. Bu uygulama özellikle konut izolasyonlarında ve düşük sıcaklık uygulamaları için ciddi bir potansiyel oluşturabilecektir. Diğer sıcaklıklar için ise daha fazla araştırma yapmak gerekecektir. Bilimsel açıdan elde edilen sonuçlar klasik bilinen yaklaşımlarla izah edilememiştir. Özellikle paralel veya seri veya karışık olarak çok sayıda yerleştirilmiş malzemelerde

emisiviteye bağlı olarak ışıının davranışının incelenmesi gerekir. Deneysel elde edilen sonucu izah edebilecek yeni kavramların dâhil edilmesi gerekebilir. Bunun teorik izahı önemli olup istenen şartlara uygun yeni malzeme tasarımları gerçekleştirilmesine imkân verecektir. Bu açıdan çalışma, gerek teorik çalışmalar için ve gerekse yeni malzeme araştırmaları için geniş bir araştırma alanı ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma sonuçlarından klasik yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletim katsayılarını iyileştirmek ve çalışma alanına uygun hale getirmek için birlikte kullanılabilir ısı kalkanı diyebileceğimiz yapıların tasarımına ulaşma imkânı elde edilebilecektir. Bu amaçla yapılacak çalışmalara yol gösterici olacaktır.

KAYNAKLAR

- ABOU-SENA, A., A. YING, and M. ABDOU. 2007. Experimental Measurements of the Effective Thermal Conductivity of a Lithium Titanate (Li_2TiO_3) Pebbles-packed Bed. *Journal of Materials Processing Technology*, 181: 206–212.
- AGARI, Y., T. UNO. 1986. Estimation on Thermal Conductivities of Filled Polymers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 32 : 5705-5712.
- AGARWAL, B.D., L.J. BROUTMAN. 1980. *Analysis and Performance of Fiber Composites*. John Wiley and Sons, New York, U.S.A. 360 p.
- ALPAY, H.R., M. SİVRİOĞLU, R. EREN. 1986. An Analıysis of Air Permeability and Heat Transfer Characteristics of Woven Cloth. *Tekstil & Teknik Dergisi*, 22:4-14.
- ARGENTO, C., D. BOUVARD. 1996. Modeling the Effective Thermal Conductivity of Random Packing of Spheres Through Densification. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39: 1343–1350.
- ASHRAE HANDBOOK, 2002. *Refrigeration*. Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.
- BABANOV, A.A. 1957. Method of Calculation of Thermal Conduction Coefficient of Capillary Porous Material. *Sov. Phys. Technol. Phys.*, 2: 476–484.
- BAILLEUL J.-L., V. SOBOTKA, D. DELAUNAY, Y. JARNY. 2003. Inverse Algorithm for Optimal Processing of Composite Materials. *Composites: Part A*. 34: 695–708.
- BARTA, Š. 2000. Effective Thermal Conductivity of Fibrous Composite Materials. In: L. Vozár (Editor), *Thermophysics 2000 in Proceedings of the Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society*, vol. 1. Issued by Constantine the Philosopher University, Nitra, Slovakia, p. 13-18.
- BAREA, R., M.I. OSENDI, J.M.F. FERREIRA, and P. MIRANZO. 2005. Thermal Conductivity of Highly Porous Mullite Material. *Acta Materialia*, 53:3313-3318.
- BART, G.C.J. 1994. *Thermal Conduction in Non Homogeneous and Phase Change Media*. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 182 p.
- BASCHIROW, A.B., J.W. SELENEW. 1976. Thermal Conductivity of Composites. *Plaste Kaut* , 23, 656 p.
- BASMADJIAN, D. 2003. *Diffusion through Gases, Liquids, and Solids. Mass Transfer: Principles and Applications*. 259 p.

- BAUER, T.H. 1993. A General Analytical Approach Toward the Thermal Conductivity of Porous Media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 : 4181–4191.
- BHATTACHARYA, R.K. 1980. Heat Transfer Model for Fibrous Insulations. In: D.L. McElroy and R.P. Tye (Editors), *Thermal Insulation Performance*, ASTM STP 718, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 272-286.
- BHATTACHARYA, A., V.V. CALMIDI, and R.L. MAHAJAN. 2002. Thermophysical Properties of High Porosity Metal Foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 1017-1031.
- BIGAUD, D., J.-M. GOYHÉNÈCHE, and P. HAMELIN. 2001. A Global-Local Non-Linear Modelling of Effective Thermal Conductivity Tensor of Textile-Reinforced Composites. *Composites:Part A*, 32: 1443-1453.
- BECK, A. E. 1976. An Improved Method of Computing the Thermal Conductivity of Fluid-filled Sedimentary Rocks'. *Geophysics*, 41: 133-144.
- BECKER, B.R., B.A. FRICKE. 1999. Food Thermophysical Property Models. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 26 (5): 627-636.
- BELOVA, I.V., G.E. MURCH. 2004. Monte Carlo Simulation of the Effective Thermal Conductivity in Two-Phase Material. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154:741-745.
- BOHÁČ, V., L. KUBIČÁR and M.K. GUSTAFSSON. 2000. Thickness Dependency of Thermophysical Properties of Perspex. In: L. Vozár (Editor), *Thermophysics 2000 in Proceedings of the Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society*, vol. 1. Issued by Constantine the Philosopher University, Nitra, Slovakia, p. 49-54.
- BOOMSMA, K., D. POULIKAKOS. 2001. On the Effective Thermal Conductivity of a Three-dimensionally Structured Fluid-saturated Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44 : 827-836.
- BRAILSFORD, A.D., K.G. MAJOR. 1964. The Thermal Conductivity of Aggregates of Several Phases Including Porous Materials. *Br. J. Appl. Phys.*,15: 313–319.
- BRUGGEMAN, D.A.G. 1935. Calculation of Physical Constants From Heterogeneous Substances (Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen). *Annals of Physics (Annalen der Physik)*, 24 (7): 636-664.
- BRUCKER, K.A., J. MAJDALANI. 2005. Effective Thermal Conductivity of Common Geometric Shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48:4779–4796.
- CALMIDI, V.V., R.L. MAHAJAN. 1999. The Effective Thermal Conductivity of High Porosity Metal Foams. *ASME J. Heat Transfer*, 121: 466-471.

CARSON, J.K. 2002. Prediction of the Thermal Conductivity of Porous Foods. PhD Thesis. Massey University, Palmerston North, New Zealand, 274 p.

CARSON, J. K., S. J. Lovatt, D.J. Taner, A.C. Cleland. 2003. An Analysis of the Influence of Material Structure on the Effective Thermal Conductivity of Theoretical Porous Materials Using Finite Element Simulations. *International Journal of Refrigeration*, 26: 873–880.

CARSON, J.K., S.J. LOVATT, D.J. TANNER, and A.C. Cleland. 2004. Experimental Measurements of the Effective Thermal Conductivity of A Pseudo-Porous Food Analogue over A Range Of Porosities and Mean Pore Sizes. *Journal of Food Engineering*, 63:87–95.

CARSON, J. K., S.J. Lovatt, D.J. Tanner, and A.C. Cleland. 2005. Thermal Conductivity Bounds for Isotropic Porous Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 2150-2158.

CARSON, J.K., S.J. LOVATT, D.J. TANNER, and A.C. CLELAND. 2006. Predicting the Effective Thermal Conductivity of Unfrozen, Porous Foods. *Journal of Food Engineering*, 75 : 297–307.

CARSON, J.K. 2006. Review of Effective Thermal Conductivity Models for Foods. *International Journal of Refrigeration*, 29 : 958-967.

CHAUDHARY, D.R., R.C. BHANDARI. 1968. Heat Transfer Through a Three-phase Porous Medium. *Journal of Physics D: British Journal of Applied Physics*, 1: 815–817.

CHAWLA, K.K. 1987. *Composite Materials: Science and Engineering*. Kindle Edition. Springer Publisher, 483 p.

CHENG, S.C., R.I. VACHON. 1969. The Prediction of the Thermal Conductivity of Two and Three Phase Solid Heterogeneous Mixtures. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 12 : 249-264.

CHIEW, Y.C., E. GLANDT. 1983. The Effect of Structure on the Conductivity of a Dispersion. *Journal of Colloid and Interface Science*, 94 : 90–104.

CHUNG, J.D., M. KAVIANY. 2000. Effects of phonon pore scattering and Pore Randomness on Effective Conductivity of Porous Silicon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:521-538.

CERNUSCHI, F., S. AHMANIEMI, P. VUORISTO, and T. MÄNTYLÄ. 2004. Modelling of Thermal Conductivity of Porous Materials: Application to Thick Thermal Barrier Coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 24: 2657-2667.

COBLE, R.L., W.D. KINGERY. 1956. Effect of Porosity on Physical Properties of Sintered Alumina. *J. Am. Ceram. Soc.*, 39 : 377–384.

DAVIS, H.T., L.R. VALENCOURT, and C.E. JOHNSON. 1975. Transport Processes in Composite Media. *J. Am. Ceram. Soc.*, 58: 446-452.

DAVIS, R.H. 1986. Thermal Conductivity of Mixture with Spherical Inclusions. *Int. J. Thermophys.*, 7 : 609-620.

DE VRIES, D.A. 1966. Thermal properties of soils. In: W.R. Van Wijk (Editor), *Physical Plant Environment*, North Holland Publishing, Amsterdam, p. 210-235.

DE VRIES, D.A. 1975. Heat Transfer in Soils. In: D.A. De Vries, N.H. Afgan (Editors), *Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, Scripta Book, Washington D.C., p. 5-28.

DE VRIES, U., P. SLUIMER, and A.H. BLOKSMA. 1989. A Quantitative Model for Heat Transport in Dough and Crumb During Baking. In *Proceedings of the Cereal Science and Technology in Sweden*. Lund University, Ystad, Sweden, 13–16 June 1989, p. 174–88.

DOS SANTOS, W. N. 2000. Experimental Investigation of the Effect of Moisture on Thermal Conductivity and Specific Heat of Porous Ceramic Materials. *Journal of Materials Science*, 35: 3977-3982.

DRUMA, A.M., M.K. ALAM, and C. DRUMA. 2004. Analysis of Thermal Conduction in Carbon Foams. *International Journal of Thermal Sciences*, 43:689-695.

FAN, L.-W., Y.-C. HU, T. TIAN, and Z.-T. YU. 2006. The Prediction of Effective Thermal Conductivities Perpendicular to the Fibres of Wood using a Fractal Model and an Improved Transient Measurement Technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 : 4116–4123.

FRANCL, J., W.D. KINGERY. 1954. Thermal Conductivity: IX, Experimental Investigation of Effect of Porosity on Thermal Conductivity. *J. Am. Ceram. Soc.*, 37 : 99–107.

FU, X., D.D.L. CHUNG. 1997. Effects Silica Fume Latex Methycellulose and Carbon Fibers on the Thermal Conductivity and Specific Heat of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*. 27 (12): 1799-1804(6).

FU, X., R. VIŠKANTA, J.P. GORE. 1998. Prediction of Effective Thermal Conductivity of Cellular Ceramics. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 25 (2): 151-160.

FU, S.-Y., Y.-W. MAI. 2003. Thermal Conductivity of Misaligned Short-Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 88:1497–1505.

GEMCİ, R. 1996. Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde aşınma ve ısı iletimlerinin iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Tekstil Mühendisliği Anabilim dalı, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 102 s.

GHODOOSI, L. 1988. Hava Boşluklu Yapı Elemanlarında Isı Geçişi, Master Tezi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 117 s.

GIBSON, P.W. 1996. Multiphase Heat and Mass Transfer Through Hygroscopic Porous Media with Applications to Clothing Materials. Technical Report Natick/TR-97/005, U.S. Army Natick Research, Development, and Engineering Center, Natick, MA., 327 p.

GONZO, E. E. 2002. Short communication, Estimating Correlations for The Effective Thermal Conductivity of Granular Materials. Chemical Engineering Journal, 90:299–302.

GORI, F. 1983. A Theoretical Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Unsaturated Frozen Soils. In: T.L. Péwé (Editor), Proceedings of The 4th International Conference on Permafrost, vol. 1., Fairbanks, National Academy Press, Washington DC, U.S.A. p. 363-368.

GORI F., C. MARINO , and M. PIETRAFESA. 2001. Experimental measurements and theoretical predictions of the thermal conductivity of two phases glass beads. International Communications in Heat and Mass Transfer, 28 (8): 1091-1102 (17).

GORI, F., S. CORASANITI. 2003. Experimental Measurements and Theoretical Prediction of the Thermal Conductivity of Two- and Three-Phase Water/Olivine Systems. International Journal of Thermophysics, 24 (5): 1339-1353.

GROHE, B. 2004. Heat Conductivities of Insulation Mats Based on Water Glass Bonded Non-textile Hemp or Flax Fibres. Holz Roh-Werkst, 62 : 352–357.

GUPTA, M., J. YANG, C. ROY. 2002. Modelling the Effective Thermal Conductivity in Polydispersed Bed Systems: A Unified Approach using the Linear Packing Theory and Unit Cell Model. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 80 : 830-839.

GUPTA, M., J. YANG, C. ROY. 2003. Predicting the Effective Thermal Conductivity of Polydispersed Beds of Softwood Bark and Softwood Char. Fuel, 82: 395-404.

HAGER, E.N., C.R. STEERE. 1967 Radiant Heat Transfer in Fibrous Thermal Insulation. J. Appl. Phys., 38: 4663-4668.

HALPIN, J.C. 1969. Stiffness and Expansion Estimates for Oriented Short Fiber Composites. Journal of Composite Materials, 3: 732–734.

HALPIN, J.C. 1984. Primer on Composite Materials: Analysis. Second Edition. Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A., 187 p.

HAMDAMI, N., J.-Y. Monteau, A. Le Bail. 2003. Effective Thermal Conductivity of A High Porosity Model Food at Above and Sub-freezing Temperatures. International Journal of Refrigeration, 26:809–816.

HAMILTON, R.L., O.K. CROSSER. 1962. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-component Systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3): 187–191.

HAN, M.H., X. LIANG, and Z.A. TANG. 2005. Size Effect on Heat Transfer in Micro Gas Sensors. *Sensors and Actuators A*, 120 : 397–402.

HASHIN, Z., S. SHTRIKMAN. 1962. A Variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials. *Journal of Applied Physics*, 33: 3125–3131.

HILL, J.E., J.D. LEITMAN, J. E. SUNDERLAND. 1967. Thermal Conductivity of Various Meats. *Food Technology*, 21: 1143–1148.

HU, X.-J., J.-H. DU, S.-Y. LEI, B.-X. WANG. 2001. Technical Note :A model for the thermal conductivity of unconsolidated porous media based on capillary pressure±saturation relation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44:247-251.

INCROPERA, F.P., D.P. DEWITT. 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Third Edition, John Wiley, New York, U.S.A, 1008 p.

ISSA, M., M.J. ABREU, L. SCHACHER, D. ADOLPHE, M.E.C. SILVA. 2004. The Influence of the Sterilisation Process on Certain Thermal Properties. *Eur J Appl Physiol.*, 92: 673-678.

JANG, B.K., H. MATSUBARA. 2005. Influence of Rotation Speed on Microstructure and Thermal Conductivity of Nano-porous Zirconia Layers Fabricated by EB-PVD. *Scripta Materialia*, 52:553-558.

JANG, B.K., H. MATSUBARA. 2006. Influence of Porosity on Thermophysical Properties of Nano-Porous Zirconia Coating Grown by Electron Beam-Physical Vapor Deposition. *Scripta Materilia*, 54:1655-1659.

JEFFREY, D.J. 1973. Conduction Through a Random Suspension of Spheres. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 335: 355–367.

JIANG, P., M. LI, T. LU, L.YU, and Z. REN. 2004. Experimental Research on Convection Heat Transfer in Sintered Porous Plate Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 2085-2096.

KALAPRASAD, G., P. PRADEEP, G. MATHEW, C. PAVITHRAN, and S. THOMAS. 2000. Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Analyses of Low-density Polyethylene Composites Reinforced with Sisal, Glass and Intimately Mixed Sisal/Glass Fibres. *Composites Science and Technology*, 60:2967-2977.

KAN, İ. 2006. *Biyoistatistik*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 288 s.

KILIÇ, M., A. YİĞİT. 2008. Isı Transferi. “Alınmıştır, Ek B”, Alfa Yayınevi, Bursa, 490 s.

KINGERY, W.D., H.K. BOWEN, and D.R. UHLMANN. 1975. Introduction to Ceramics. Second Edition. John Wiley & Sons Inc., New York. U.S.A. 1032 p.

KIRKPATRICK, S. 1973. Percolation and Conduction. Reviews of Modern Physics, 45 : 574–588.

KOHOUT, M., A.P. COLLIER, and F. ŠTĚPÁNEK. 2004. Effective Thermal Conductivity of Wet Particle Assemblies. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47: 5565–5574.

KOHOUT, M., A.P. COLLIER, F. ŠTĚPÁNEK. 2005. Microstructure and Transport Properties of Wet Poly-disperse Particle Assemblies. Powder Technology, 156 : 120–128.

KOPELMAN, I.J. 1966. Transient Heat Transfer and Thermal Properties in Food Systems. Doctoral Thesis. Food Science Department, Michigan State University, East Lansing, MI, U.S.A.

KREITH, F., R.F. BOEHM and et. al. 1999. “Heat and Mass Transfer” Mechanical Engineering Handbook. In: F. Kreith (Editor), CRC Press LLC, Boca Raton, 287 p.

KRISCHER, O. 1963. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik Zweite Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 166 p.

KRISCHER, O., W. KAST. 1992. The Scientific Fundamentals of Drying Technology (Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik), 3. Edition (Auflage). Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin. 489 p.

LANDAUER, R. 1952. The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures. J. Appl. Phys., 23: 779–784.

LARKIN, B.K. 1957. A Study of the Rate of Thermal Radiation Through Porous Insulating Materials. Doctoral Thesis. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 169 p.

LEE, S. L. and J. H. YANG., 1997. Modelling of Effective Thermal Conductivity for A Nonhomogeneous Anisotropic Porous Medium. Int. J. Heat Mass Transfer, 41 (6-7): 931-937.

LEE, O-J., K-H. LEE, T. JIN YIM, S. YOUNG KIM, and K-P. YOO. 2002. Determination of Mesopore Size of Aerogels from Thermal Conductivity Measurements. Journal of Non-Crystalline Solids, 298 : 287-292.

LEVINE, I.N. 2001. Physical Chemistry. McGraw-Hill Education, Maidenhead, England.

LEVY, F.L. 1981. A Modified Maxwell–Eucken Equation for Calculating the Thermal Conductivity of Two-component Solutions or Mixtures. *International Journal of Refrigeration*, 4(4): 223–225.

LEWIS, T.B., L.E. NIELSEN. 1970. Dynamic Mechanical Properties of Panicle-Filled Composites. *J.Appl. Polym. Sci.*, 14: 1449-1471.

LIANG, X.-G., W. QU. 1999. Effective Thermal Conductivity of Gas-Solid Composite Materials and The Temperature Difference Effect at High Temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (10): 1885-1893(9).

LIDE, D.R. 2003. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 84th ed. CRC Press., Boca Raton (FL), U.S.A.

LIENHARD IV, J.H., J.H. LIENHARD V. 2008. *A heat Transfer Textbook*, Third Edition, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.

LIM, T.K., B.P. AXCELL, and M.A. COTTON. 2007. Single-phase Heat Transfer in the High Temperature Multiple Porous Insulation. *Applied Thermal Engineering*, 27 : 1352–1362.

LU, S.-Y., H.-C. LIN. 1996. Effective Conductivity of Composites Containing Aligned Spheroidal Inclusions of Finite Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 79 (9) : 6761-6769.

LYSENKO, V., S. VOLZ. 2000. Porous Silicon Thermal Conductivity by Scanning Probe Microscopy. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 182 (2): R6-R7.

MATIAŠOVSKÝ, P., O. KORONTHÁLYOVÁ. 2000. Measurement of the Thermal Conductivity of the Air Permeable Insulation Material in A Horizontal Guarded Hot Plate Apparatus. In: L. Vozár (Editor), *Thermophysics 2000 in Proceedings of the Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society*, vol. 1. Issued by Constantine the Philosopher University, Nitra, Slovakia, p. 33-38.

MAQSOOD, A., K. KAMRAN. 2005. Thermophysical Properties of Porous Sandstones: Measurements and Comparative Study of Some Representative Thermal Conductivity Models. *International Journal of Thermophysics*, 26 (5): 1617-1631.

MAROULIS, Z.B., M.K. KROKIDA, and M.S. RAHMAN. 2002. A structural Generic Model to Predict the Effective Thermal Conductivity of Fruits and Vegetables During Drying. *J. Food Eng.*, 52:47–52.

MARQUES S.P.C., E.J. BARBERO and J.S.R. MURILLO. 2009. Analysis of Conduction-radiation Problem in Absorbing and Emitting Nongray Materials. *Inter. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 19 (2) : 165-181.

MAXWELL, J.C. 1954. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Third Edition, Dover Publications Inc., New York, A.B.D. 437 p.

MEREDITH, R.E., C.W. TOBIAS. 1962. Conduction in Heterogeneous Systems. In: C.W. Tobias (Editor), *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, vol. 2., Interscience Publisher, Newyork, p. 15-47.

MICHELS, C., R. LAMBERTS, and S. GUTHS. 2008. Theoretical/Experimental Comparison of Heat Flux Reduction in Roofs Achieved Through the Use of Reflective Thermal Insulators. *Energy and Buildings*, 40 : 438–444.

MOFFAT, 1988. MOFFAT, R.J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1: 3 – 17.

MOHAMMADI, M. 1998. Heat Barrier Properties of Heterogeneous Nonwoven Materials. The Thesis of Doctor of Philosophy. Raleigh, North Carolina: Fiber and Polymer Science Faculty, North Carolina State University, p. 174.

MUNAGAVALASA, M.S., K.M. PILLAI. 2006. An Estimation of Effective Thermal Conductivity of a Fibrous Dual-scale Porous Medium during Unsaturated Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49:317-328.

NAIT-ALI, B., K. HABERKO, H. VESTEGHEM , J. ABSI , and D.S. SMITH. 2007. Preparation and Thermal Conductivity Characterisation of Highly Porous Ceramics. Comparison Between Experimental Results, Analytical Calculations and Numerical Simulations. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3):1471.

NIELSEN, L.E. 1973. Thermal Conductivity of Particulate-filled Polymers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 17 : 3819-3825.

NIELSEN, L.E. 1974. The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase Systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 13 : 17-20.

NIELSEN, L.E. 1974. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. Vol. 2, Marcel Dekker, New York, U.S.A., 556 p.

OCHS, F., W. HEIDEMANN, and H. MULLER-STEINHAGEN. 2008. Effective Thermal Conductivity of Moistened Insulation Materials As A Function of Temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 539–552 .

OKAZAKI, M., T. YAMASKI, S. GOTOH, and R. TOEI. 1981. Effective Thermal Conductivity for Granular Beds of Various Binary Mixtures. *J. Chem. Eng. Jpn.*, 14(3): 183–189.

ÖZDAMAR, K. 2001. *SPSS ile Biyoistatistik.4*. Baskı, Kaan Kitabevi, Eskişehir.

ÖZDAMAR, K. 2002. *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi*, Kaan Kitapevi, Eskişehir.

ÖZİLGİN, M. 1998. *Food Process Modeling and Control: Chemical Engineering Applications*. CRC Press, U.S.A., 518 p.

PABST, W. 2005. Simple Second-order Expression: For the Porosity Dependence of Thermal Conductivity. *Journal of Materials Science*, 40 (9-10):2667-2669(3).

PABST, W., E. GREGOROVÁ. 2006. A New Percolation-Threshold Relation for The Porosity Dependence of Thermal Conductivity. *Ceramics International*, 32: 89–91.

PARK, J. 2001. Thermal/Fluid Characteristics of Isotropic Plain-Weave Screen Laminates as Heat Exchange Surfaces, Master Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Nevada, Reno, Nevada, U.S.A., 75 p.

PARK, J. K., D. CHO, and T. J. KANG. 2004. A Comparison of the Interfacial, Thermal, and Ablative Properties Between Spun and Filament Yarn Type Carbon Fabric/Phenolic Composites. *Carbon*, 42:795-804.

PATIROP, C. 2004. Modeling of Thermal Performance of Firefighter Protective Clothing During the Intense Heat Exposure. A Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. Mechanical Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. 150 p.

PELETSKII, V. É., B.A. SHUR. 2007. Experimental Study of the Thermal Conductivity of Heat Insulation Materials Based on Expanded Vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, Heat Engineering 48 (5) : 356-358.

PETROV, V.A. 1997. Combined radiation and Conduction Heat Transfer in High Temperature Fiber Thermal Insulation. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 40 (9) : 2241-2247.

PEZZOTTI G., I. Kamada, S. Miki. 2000. Thermal conductivity of AlN/polystyrene interpenetrating Networks. *Journal of the European Ceramic Society*, 20: 1197-1203.

PHAM, Q.T., J. WILLIX. 1989. Thermal Conductivity of Fresh Lamb Meat, Offal and Fat in the Range -40 to +30 °C: Measurements and Correlations. *J. Food Sci.*, 54 (3) : 508–515.

PITTS, D.R., L.E. SISSOM. 1997. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer*, Second Edition, McGRAW-HILL, New York, U.S.A., 361 p.

RAHMAN, M.S. 1992. Thermal Conductivity of Four Food Materials as a Single Function of Porosity and Water Content. *J. Food Eng.*, 15 : 261-268.

RAHMAN, M.S., X.D. CHEN. 1995. A General Form of Thermal Conductivity Equation as Applied to an Apple: Effects of Moisture, Temperature and Porosity. *Drying Technol.*, 13:1-18.

RAHMAN, M.S., X.D. CHEN, and C.O. PERERA. 1997. An Improved Thermal Conductivity Prediction Model for Fruits and Vegetables as a Function of Temperature, Water Content and Porosity. *Journal of Food Engineering*, 31: 163–170.

RAHMAN, M.S. 2001. Thermophysical Properties of Foods. In: D.-W. Sun (Editor), *Advances in Food Refrigeration*, Surrey, Leatherhead Publishing, England, p. 70-109.

RAO, M.A., S.S.H. RIZVI, A.K. DATTA. 2005. *Engineering Properties of Foods*. Third Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, U.S.A. 768 p.

REIST, P.C. 1993. *Aerosol Science and Technology*. McGraww-Hill. Chapter 9:131-143.

RENAUD, T., P. BRIERY, J. ANDRIEU, and M. LAURENT. 1992. Thermal Properties of Model Foods in the Frozen State. *Journal of Food Engineering*, 15(2):83-97.

ROY, S., M. JUNK, S. SUNDAR. 2006. Understanding the Porosity Dependence of Heat Flux Through Glass Fiber Insulation. *Mathematical and Computer Modelling* 43: 485-492.

RUSSELL, H.W. 1935. Principles of Heat Flow in Porous Insulators. *Journal of the American Ceramic Society*, 18 : 1-5.

SABLANI, S.S., M.S. RAHMAN. 2003. Using Neural Networks to Predict Thermal Conductivity of Food as A function of Moisture Content, Temperature and Apparent Porosity. *Food Research International*, 36: 617-623.

SAFAVISOHI, B., E. SHARBATI, C. AGHANAJAFI, S. REZA, and K. FIROOZABADI. 2009. Finite Difference Solution for Radiative-conductive Heat Transfer of a Semitransparent Polycarbonate Layer. *Journal of Applied Polymer Science*, 112 : 3313-3321.

SCHULZ, B. 1981. Thermal Conductivity of Porous and Highly Porous Materials. *High Temp. High Press.*, 13: 649-660.

SEO, B.H., Y.J. CHO, J.R. YOUN, K. CHUNG, T.J. KANG, and J.K. PARK. 2005. Model for Thermal Conductivities in Spun Yarn Carbon Fabric Composites. *Polymer Composites*, 26:791-798.

SHELDON, R.P. 1982. *Composite Polymeric Materials*. Applied Science Publishers, London and New York, p. 86-88

SHAPIRO, M., V. DUDKO, V. ROYZEN, Y. KRICHEVETS, S. LEKHTMAKHER, V. GROZUBINSKY, M. SHAPIRA, and M. BRILL. 2004. Characterization of Powder Beds by Thermal Conductivity: Effect of Gas Pressure on the Thermal Resistance of Particle Contact Points. *Part. Part. Syst. Char.*, 21: 268-275.

SHIN, Y., D. YOO, and K. SON. 2005. Development of Thermoregulating Textile Materials with Microencapsulated Phase Change Materials (PCM). IV. Performance

Properties and Hand of Fabrics Treated with PCM Microcapsules. *Journal of Applied Polymer Science*, 97: 910-915.

SINGH, K.J., R. SINGH, and D.R. CHAUDHARY. 1998. Heat Conduction and a Porosity Correction Term for Spherical and Cubic Particles in a Simple Cubic Packing, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31 : 1681–1687.

SINGH, J.R. 2004. Effective Thermal Conductivity of Highly Porous Two-phase Systems. *Applied Thermal Engineering*, 24: 2727–2735.

SINGH, R., H.S. KASANA. 2004. Computational Aspects of Effective Thermal Conductivity of Highly Porous Metal Foams. *Applied Thermal Engineering*, 24:1841–1849.

SINGH, K., D. PATIDAR, and N.S. SAXENA. 2005. Composition Dependence of Effective Thermal Conductivity and Effective Thermal Diffusivity of $Se_{100-x}In_x$ ($x=0, 5, 10, 15$ and 20) Chalcogenide Glasses. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66: 946–948.

SOKOLOVSKYA, T.S. 2005. Measurement of the Thermal Conductivity Coefficient of Textile Materials By the Regular Cooling Regime Method. *Fibre Chemistry*, 37(1): 59-62.

SOMA SHEKAR, S. 2004. Thermal Performance of Plain Weave Screen as a Heater Surface in Paralel Plate Free Convection, Master Tezi, Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno, Nevada, 94 p.

SPINNLER, M., E.R.F. WINTER, and R. VISKONTA. 2004. Studies on High-temperature Multilayer Thermal Insulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 1305–1312.

SPRINGER, G.S., S.W. TSAI. 1967. Thermal Conductivities of Unidirectional Materials. *J. Compos. Mater*, 1 : 166-173.

SUGAWARA, A., Y. YOSHIZAWA. 1961. An Investigation on the Thermal Conductivity of Porous Materials and its Application to Porous Rock. *Australian J. Phys.*, 14 : 468-469.

SYMONS, J.G., R.E. CLARKE, J.V. PIERCE. 1995. Thermal Performance of Several Australian Fibrous Insulating Materials. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 19:72–88.

ŞENOL, A., M. AYTEKİN. 2004. Zemin - EPS (Geofoam) Temas Yüzeyinin Sonlu Elemanlarla Modellemesi. 17.İnşaat Müh. Teknik Kongresi ve Sergisi. 368 – 374.

TAVMAN, I.H. 1998. Effective Thermal Conductivity of Isotropic Polymer Composites. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 25(5): 723-732.

THOMANN, U.I., M. SAUTER, P. ERMANNI. 2004. A Combined Impregnation and Heat Transfer Model for Stamp Forming of Unconsolidated Commingled Yarn Preforms. *Composites Science and Technology*, 64: 1637-1651.

TICHÁ, G., W. PABST, and D.S. SMITH. 2005. Predictive Model for the Thermal Conductivity of Porous Materials with Matrix-inclusion Type Microstructure. *Journal of Materials Science (Letters)*, 40 (18): 5045-5047.

TSENG, C., M. YAMAGUCHI, T. OHMORI. 1997. Thermal Conductivity of Polyurethane Foams from Room Temperature to 20 K. *Cryogenics* 1997, 37: 305-312.

TSENG, P., H. CHU. 2009. An Experimental Study of the Heat Transfer in PS Foam Insulation. *Heat Mass Transfer*, 45 : 399–406.

TS ISO 8302. 2002. Isı Yalıtımı – Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini – Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı. ICS 91.120.10. TSE, Ankara.

TSAO, G.T-N. 1961. Thermal Conductivity of Two-Phase Materials. *Industrial and Engineering Chemistry*, 53:395-397.

TSOTSAS, E., H. MARTIN. 1987. Thermal Conductivity of Packed Beds: A Review. *Chem. Eng. Process*, 22 : 19–37.

TSOTSAS, E. 2002. Convection and Dispersion in Flow through Bulks (Wärmeleitung und Dispersion in durchströmten Schüttungen). In: *VDI-Wärmeatlas*, Chapter Mg 11, 9. Edition, Springer- Verlag, Berlin. Mh1 - Mh15.

TUCKER, W.A., L.H. NELKEN. 1982. Handbook of Chemical Property Estimation Methods. American Chemical Society. Chapter 17.

UMUR, H. 2001. Akışkanlar Mekaniği. “Alınmıştır. Sürtünmeli Akışlar” Vıpaş İnş. Tur. Eğt. AŞ. 482 s.

VARGAS, W.L., J.J. MCCARTHY. 2002. Conductivity of Granular Media with Stagnant Interstitial Fluids via Thermal Particle Dynamics Simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 4847-4856.

VERMA, L.S., A.K. SHROTRIYA, R. SINGH, and D.R. CHAUDHARY. 1991. Thermal Conduction in Two-phase Materials with Spherical and Non-spherical Inclusions. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 24 : 1729–1737.

VISKANTA, R. 1965. Heat Transfer by Conduction and Radiation in Absorbing and Scattering materials. *J. Heat Transfer (ASME)*, 87: 143-150.

WANG, J., J.K. CARSON, M.K. NORTH, and D.J. CLELAND. 2006. A New Approach to Modelling the Effective Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 3075-3083.

WILKES, B.G. 1950. Heat Insulation. John Willey & Sons Inc., New York, U.S.A. 224 p.

WEIDENFELD, G., Y. WEISS, and H. KALMAN. 2004. A Theoretical Model for Effective Thermal Conductivity (ETC) of Particulate Beds Under Compression. *Granular Matter*, 6 : 121–129.

WOO, K., N.S. GOO. 2004. Thermal Conductivity of Carbon-Phenolic 8-Harness Satin Weave Composites. *Composite Structures*, 66: 521-526.

WU, H., J. FAN, and N. DU. 2007. Thermal Energy Transport within Porous Polymer Materials: Effects of Fiber Characteristics. *Journal of Applied Polymer Science*, 106 : 576–583.

WULF, R., G. BARTH, and U. GROSS. 2007. Intercomparison of Insulation Thermal Conductivities Measured by Various Methods. *International Journal of Thermophysics*, 28 : 1679–1692.

YE, Z., C.M. WELLS, C.G. CARRINGTON, and N.J. HEWITT, 2006. Thermal Conductivity of Wool and Wool-Hemp Insulation. *International Journal of Energy Research*, 30:37-49.

YING, B., Y. KWOK, Q. ZHU, and C. YEUNG. 2004. Assessing the Performance of Textiles Incorporating Phase Change Materials. *Polymer Testing*, 23: 541-549.

YOON, II S., T. SONG. 2009. Development of a Multiple Layer Vacuum Insulation Chip. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 : 1276–1283.

YUKSEL, N., A. AVCI, and M., KILIC. 2010. The temperature dependence of effective thermal conductivity of the samples of glass wool reinforced with aluminium foil. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (6): 675-680.

YUKSEL, N., A. AVCI, 2010. The Present Studies on Effective Thermal Conductivities of Porous Mediums. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (2):331-346.

XU, J. 2001. In Plane Effective Thermal Conductivity of Plain-Weave Screen Laminates. A Thesis submitted for the Degree of Master of Philosophy. Mechanical Engineering Department, Nevada Reno University, Reno. Nevada, U.S.A., 41 p.

XU, J., R.A. WIRTZ. 2002. In-Plane Effective Thermal Conductivity of Plain-Weave Screen Laminates. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (4):615-620.

XUE, Q.-Z. 2003. Model for Effective Thermal Conductivity of Nanofluids. *Physics Letters A*, 307 (5-6): 313–317.

XUE, Q., W.-M. XU. 2005. A Model of Thermal Conductivity of Nanofluids with Interfacial Shells. *Materials Chemistry and Physics*, 90: 298–301.

ZARR, R.R., J.J. FILLIBEN. 2002. An International Study of Guarded Hot Plate Laboratories Using Fibrous Glass and Expanded Polystyrene Reference Materials. *Insulation Materials: Testing and Applications*, ASTM International Standards, Reprinted from STP 1426, 4:3-16.

ZEHNER, P., E.U. SCHLUNDER. 1970. Thermal Conductivity of Granular Materials at Moderate Temperatures. *Chemie Ingr Tech.*, 42 : 933-941.

ZEITLER, M.G. 2000. Allgemeingültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten, Dissertation, Universität Essen.

ZERROUNG, A., K. ZEHAR, and L. REFOUFI. 2007. Thermal Conductivity Models of Porous Materials. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(4): 722-727.

ZHANG, Z., X. FANG. 2006. Study on Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material. *Energy Conversion and Management*, 47: 303–310.

ZHANG, B., S. ZHAO, and X. HE. 2008. Experimental and Theoretical Studies on High-temperature Thermal Properties of Fibrous Insulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 109 : 1309–1324.

ZHAO, S., B. ZHANG, and X. HE. 2009. Temperature and Pressure Dependent Effective Thermal Conductivity of Fibrous Insulation. *International Journal of Thermal Sciences*, 48: 440–448.

ZVEREV, V.G., V.D. GOL'DIN, and V.A. NAZARENKO. 2008. Radiation-conduction Heat Transfer in Fibrous Heat-resistant Insulation under Thermal Effect. *Heat and Mass Transfer and Physical Gas Dynamics*, High Temperature 46(1) : 108–114.

http://www.lambda-messtechnik.de/eng/ep500/eng_ep500.htm, Erişim tarihi: 31.10.2008. Konu: - Design and Functions, Characteristics and Operations Scope, PC-Software "Measurement and Evaluation Software", Technical data, Why opt for a guarded hot plate apparatus?

<http://www.infrared-thermography.com/material.htm>, Erişim tarihi: 15.04.2009. Konu: Emissivity Values for Common Materials.

http://www.aiaccess.net/English/Glossaries/GlosMod/e_gm_newman_keuls.htm, Erişim tarihi: 15.04.2010. Konu: Student Newman Keul testi.

EKLER

Ek-1. Diğer efektif ısı iletkenlik modelleri

Çizelge.4.1.Basit ve temel bileşenleri içeren efektif ısı iletkenlik modelleri

Modeller	Aralık
Gori Modeli $\frac{1}{k_{en}} = \frac{C_0 - 1}{k_s \cdot C_0} + \frac{C_0}{k_s \cdot (C_0^2 - 1) + k_d}$ $k_{by} = \left(\frac{C_0 \cdot (C_0 - 1)}{k_s} + \frac{C_0}{k_d} \right)^{-1} + k_s \cdot \frac{(C_0^2 - 1)}{C_0^2}$ $C_0 = \sqrt[3]{\frac{1}{1 - \varepsilon}}$ <p style="text-align: right;">Gori ve ark. (2001), Gori (1983)</p>	s ve d, sürekli akışkan ve dolgu katı ortamıdır. Küp yapının ortasında katı küp mevcuttur. $\varepsilon < 0,36$
Babanov Modeli $k_e = \frac{k_s(k_s + V_d^{2/3}(k_d - k_s))}{(k_s + V_d^{2/3}(k_d - k_s))(1 - V_d^{1/3})}$ <p style="text-align: right;">Babanov (1957), Belova ve Murch (2004)</p>	Basit kübik düzenleme için faz 1 küp halindedir.
Singh ve ark. Modeli $k_e = \frac{k_s(k_s + 0,806V_d^{2/3}(k_s - k_d))}{(k_s + 0,806 \cdot V_d^{2/3}(k_s - k_d))(1 - 1,2407V_d^{1/3})}$ <p style="text-align: right;">Singh ve ark. (1998), Belova ve Murch (2004)</p>	Homojen dağılı parçacıklar ve temas olmadığı durumu içerir.
Cheng ve Vachon Modeli^[1,2] (1) $\frac{1}{k_e} = \frac{1}{\sqrt{C_2(k_d - k_s)(k_s + C_1(k_d - k_s))}}$ $* \ln \left[\frac{\sqrt{k_s + C_1(k_d - k_s)} + \frac{C_1}{2} \sqrt{C_2(k_d - k_s)}}{\sqrt{k_s + C_1(k_d - k_s)} - \frac{C_1}{2} \sqrt{C_2(k_d - k_s)}} \right] + \frac{1 - C_1}{k_s}$ $C_1 = \sqrt{(3 \cdot V_d)/2} \quad \text{ve} \quad C_2 = -4 \cdot \sqrt{2/(3 \cdot V_d)}$ <p style="text-align: right;">Tsao'nın olası modeline (1961) dayanmaktadır. Cheng ve Vachon (1969), Tavman (1998)</p>	$k_d > k_s$ ve dolgulu polimerler içindir.
(2) $k_e \cong \frac{k_s}{1 - \sqrt{(3 \cdot V_d)/2}}$ <p style="text-align: right;">Tavman (1998)</p>	$k_s \ll k_d$ $k_d/k_s > 100$, $V_d < 0,667$
Jeffrey Modeli $\frac{k_e}{k_s} = 1 + 3(C_3)V_d + \left(3(C_3)^2 + \frac{3(C_3)^2}{4} + \frac{9(C_3)^3}{16} \frac{(k_d/k_s) + 2}{2(k_d/k_s) + 3} + \dots \right) V_d^2$ <p style="text-align: right;">Jeffrey (1973), Xue ve Xu (2005), Xue (2003)</p>	s ve d, sürekli akışkan ve dolgu parçacık. $C_3 = \frac{\left(\frac{k_d}{k_s} - 1 \right)}{\left(\frac{k_d}{k_s} + 1 \right)}$
Baschirow ve Selenewe Modeli $\frac{k_e}{k_s} = 1 - \frac{(C_4)^2 \cdot \pi}{4} + \frac{(C_4 \cdot C_5) \cdot \pi}{2} \left[1 - \frac{C_5}{C_4} \ln \left(1 + \frac{C_4}{C_5} \right) \right]$ $C_4 = \left(\frac{6V_d}{\pi} \right)^{1/3} \quad \text{ve} \quad C_5 = \frac{k_d}{k_s - k_d}$ <p style="text-align: right;">Tavman (1998), Baschirow ve Selenewe (1976)</p>	Parçacıklar küreseldir.

Sheldon ve Chawla Modeli	$\log k_e = V_d \log k_d + V_s \log k_s$ Sheldon (1982) ve Chawla (1987) göre Gemci (1996)	s ve d, sürekli matriks ve dolgu liflerdir.
Kohout Modeli	$k_e = (k_d - k_s) \cdot V_d^{(C_6)} + k_s$ $C_6 = 0,136 \cdot \log(k_d/k_s) + 1,27$ (küreler) $C_6 = 0,239 \cdot \log(k_d/k_s) + 1,10$ (küpler) Kohout ve ark. (2004, 2005)	$1 < \frac{k_d}{k_s} < 200$ Üstüste kesişen küreler için; $0,5 < V_d < 0,7$ küpler için; $0 < V_d < 1$
Hill Modeli	$k_e = k_d \cdot \frac{(2(C_7) - (C_7)^2) + k_s(1 - 4(C_7) + 3(C_7)^2)}{8k_d k_s ((C_7) - (C_7)^2) + k_d \cdot (C_7) + k_s(4 - (C_7))}$ $C_7 = 2 - \sqrt{4 - 2V_d}$ Hill, Leitman ve Sunderland (1967), Carson ve ark. (2006), Özilgen (1998), Pham ve Willix (1989), Rao ve ark. (2005)	-
Kopelman Modelleri [1, 2, 3, 4]	(1) Kopelman İzotropik Model [1]: $k_e = k_s \cdot \left[\frac{1 - V_d^{2/3}(1 - k_d/k_s)}{1 - V_d^{2/3}(1 - k_d/k_s)(1 - V_d^{1/3})} \right]$ Rahman (2001), Ashrae (2002), Carson ve ark. (2006), Ozilgen (1998), Pham ve Willix (1989) (2) Lifli sistem için Kopelman Seri Model [2]: $k_e = k_s \cdot \left[\frac{1 - (V_d^{1/2}/(1 - k_d/k_s))}{1 - (1 - V_d^{1/2})(V_d^{1/2}/(1 - k_d/k_s))} \right]$ Carson ve ark. (2006) (k_d/k_s yerine k_s/k_d kullanmıştır), Rahman (2001). (3) Lifli sistem için Kopelman Model [3]: $k_e = k_s \cdot [1 - (1 - k_d/k_s)V_d]$ (4) Tabakalı hal için Kopelman Seri Model [4]: $k_e = k_s \cdot \left[\frac{(1 - k_d/k_s) - 1}{(1 - k_d/k_s) - 1 - (1 - k_d/k_s)V_d} \right]$ Rao ve ark. (2005), Becker ve Fricke (1999), Kopelman (1966)	-
Francel'in Modeli	$k_e = k_d (1 - \epsilon)$ Francel ve Kingery (1954), Carson ve ark. (2005)	$k_d = k_k$ tuz gibi tanecikli yapılara aittir.
Maxwell Modeli	$k_e = k_d \cdot \frac{2 V_d}{3 - V_d}$ Gonzo E.E (2002)	$V_d \geq 0,90$
Chiew ve Glandt Modeli [1,2]	(1) $\frac{k_e}{k_s} = \frac{1 + 2\beta V_d + (k_d - 3\beta^2)V_d^2}{1 - \beta V_d}$ (2) $\frac{k_e}{k_s} = \frac{1 + 2\beta V_d + (2\beta^3 - 0,1\beta)V_d^2 + V_d^3 \cdot 0,05 \cdot \exp(4,5\beta)}{1 - \beta V_d}$ Gonzo E.E (2002), Chiew ve Glandt (1983)	$0,15 \leq V_d \leq 0,85$ $\beta = \frac{(k_d - k_s)}{(k_d + 2k_s)}$
Symons ve ark. Modeli	NZ-kaynaklı yün malzemeler için: $k_e = 1,097 \cdot 10^{-3} \cdot \rho + 0,7667 \cdot \rho^{-1} - 0,0239$ Koyun yünü malzemeler için ($9,9-70 \text{ kg/m}^3$ aralığında) $k_e = 2,05 \cdot 10^{-5} \cdot \rho + 0,286 \cdot \rho^{-1} - 0,0269$ Symons ve ark. (1995), Ye ve ark. (2006)	-

Bauer Modeli	$k_e = k_d \cdot V_d^{\frac{3}{2}}$ Gonzo E.E (2002), Bauer (1993)	$V_d \geq 0,90$
Coble–Kingery Yaklaşımı [1,2]	(1) $\frac{k_e}{k_s} = 1 - \frac{3}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2$ Pabst ve Gregorová (2006), Tichá ve ark.. (2005), Coble ve Kingery (1956)	-
	(2) $\frac{k_e}{k_s} = 1 - [k]\varepsilon + ([k] - 1)\frac{1}{2}\varepsilon^2$ $[k] = \frac{3(k_s - k_d)}{2k_s + k_d}$ Pabst (2005)	Küresel olmayan gözenekler içindir ve d, gaz fazındadır.
Bruggeman Modeli [1,2]	(1) $\left[\frac{(k_e/k_s - k_d/k_s)}{(k_e/k_s)^{\frac{1}{3}} \cdot (1 - k_d/k_s)} \right] = 1 - V_d$ Cernuschi ve ark. (2004), Bruggeman (1935)	$0 \leq V_d < 1$
	(2) $\frac{k}{k_s} = (1 - V_d)^x$ $x = \frac{1 - \cos^2\theta}{1 - w} + \frac{\cos^2\theta}{2w}$ Asimetrik modellerde x, 3/2'dir. w, kürenin şekil faktörü ve 1/3'tür. Cernuschi ve ark. (2004), Schulz (1981)	Maxwell modele benzer gelişigüzel düzenlenmiş elipslerin seyrek dağılıma uygun. θ , küre eksenine ve ısı akısı arasındaki açıdır.

Çizelge.4.2. Ekstra parametre içeren efektif ısı iletkenlik modelleri

Modeller	Aralık
Boomsma ve Paulikakos Modeli $k_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\frac{4(C_8)}{[2e^2 + \pi(C_8)(1-e)]k_d + [4 - 2e^2 + \pi(C_8)(1-e)]k_s} + \frac{(e - 4(C_8))^2}{[(e - 2(C_8))e^2]k_d + [2e - 4(C_8) - (e - 2(C_8))e^2]k_s} + \frac{(1 - \sqrt{2}e)^2}{[\pi(C_8)^2(1 - 2\sqrt{2}e)]k_d + [\sqrt{2} - 2e - \pi(C_8)^2(1 - 2\sqrt{2}e)]k_s} + \frac{2e}{e^2 \cdot k_d + (4 - e^2) \cdot k_s} \right]^{-1}$ $C_8 = \sqrt{\frac{\sqrt{2} \cdot (2 - 0,625\sqrt{2}e^3 - 2\varepsilon)}{\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)}}$ Boomsma ve Paulikakos (2001)	Yüksek derecede gözenekli metal köpükler $\varepsilon > 0,90$ (kullanımda) $e = 0,339$
Argenta ve Bouvard Modeli $k_e = k_d \cdot \left(\frac{V_d - V_{d0}}{1 - V_{d0}} \right)^{(3/2) \cdot (1 - V_{d0})}$ Argento ve Bouvard (1996), Gonzo E.E (2002)	$k_d/k_s (\geq 10^3)$ yüksek değerine sahip yoğun gözenekli malz.
Sugawara ve Yoshizawa Modeli $k_e = (1 - (C_9))k_d + (C_9) \cdot k_s$ $C_9 = [2^w \cdot (2^w - 1)^{-1}] \cdot [1 - (1 + \varepsilon)^{-w}]$ Sugawara ve Yoshizawa (1961), Maqsood ve Kamran (2005)	$\varepsilon < 0,20$ (örnekte) s ve d, sürekli akışkan ve dolgu taşıdır.
Tichâ ve Pabst Modeli $\frac{k_e}{k_s} = \exp\left(\frac{-(C_{10})\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)$ Tichâ ve ark. (2005)	$\varepsilon > 0,50$ s, sürekli matris ortamı olup küçük gözeneklerde geçerlidir.
Fan ve ark. Modeli $k_T = \frac{0,5(1 + \varepsilon)^2 k_d k_s + \varepsilon(1 - \varepsilon)k_d^2}{\varepsilon(1 - \varepsilon)k_s + 2\varepsilon k_d}$ $k_R = \frac{4\varepsilon k_d k_s + 0,5(1 - \varepsilon)k_d^2}{2\varepsilon(1 - \varepsilon)k_s + 0,5(1 + \varepsilon)^2 k_d}$ Fan ve ark. (2006), Peitgen ve ark. (1988)	$0,50 < \varepsilon < 0,70$ (örnekte) s ve d, sürekli boşluk ve ağacın hücre duvarı olup $\varepsilon = 1,73 \cdot 16^{w-1}$
Hamilton ve Crosser Modeli $\frac{k_e}{k_s} = \frac{(k_d/k_s) + (w - 1) - (w - 1)(1 - (k_d/k_s))V_d}{(k_d/k_s) + (w - 1) + (1 - (k_d/k_s))V_d}$ Hamilton ve Crosser (1962), Xue ve Xu (2005), Xue (2003)	. küreler için $w=3$ ve silindireler için $w=6$ alınır. .s ve d, sürekli akışkan ve dolgu parçacıktır.

Davis Modeli	$\frac{k_e}{k_s} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)V_d} [V_d + f(\alpha)V_d^2 + O(V_d^3)]$ $\alpha = (k_d/k_s) \quad \text{ve} \quad C_3 = \frac{((k_d/k_s) - 1)}{((k_d/k_s) + 1)}$ <p style="text-align: center;">Davis (1986), Xue ve Xu (2005), Xue (2003)</p>	$\alpha = 10$ için $f(\alpha) = 2.5$; $\alpha = \infty$ için $f(\alpha) = 0.5$ s ve d, sürekli akışkan ve dolgu parçacıktır.
Lu ve Lin Modeli	$\frac{k_e}{k_s} = 1 + \left(\frac{k_d}{k_s}\right)V_d + bV_d^2$ $C_3 = \frac{((k_d/k_s) - 1)}{((k_d/k_s) + 1)}$ <p style="text-align: center;">Lu ve Lin (1996), Xue ve Xu (2005), Xue (2003)</p>	s ve d, sürekli akışkan ve dolgu parçacıktır.
Bhattacharya ve ark. Modeli	$k_e = \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\delta/L}{k_s + \frac{(k_d - k_s)}{3}} + \frac{\sqrt{3} - \delta/L}{k_s} \right) \right]^{-1}$ $\delta/L = \frac{-\sqrt{3} - \sqrt{3 + (1 - \varepsilon)(\sqrt{3} - 5)}}{1 + (\sqrt{3})^{-1} - (8/3)}$ <p style="text-align: center;">Bhattacharya ve ark. (2002)</p>	$\varepsilon \geq 0,90$ (örneklerde) . s ve d, akışkan ve katı . yüksek gözenekli metal köpükler için.
Kalaprasad ve ark. Modeli <small>[1],[2]</small>	(1) $\log \left[\frac{k_e}{C_s \cdot k_s} \right] = V_d \cdot C_d \cdot \log \left[\frac{k_d}{C_s \cdot k_s} \right]$ <p style="text-align: center;">Kalaprasad ve ark. (2000)</p> (2) $k(T) = k_0 - C_{11} \cdot e^{-C_{12} \cdot T/3}$ T sıcaklığına göre efektif ısı iletkenliktir. <p style="text-align: center;">Kalaprasad ve ark. (2000)</p>	s ve d, sürekli polimer matris ve dolgu liflerdir. k_0 , efektif ortamın maksimum ısı iletkenliktir.
Eucken Modeli	$k_e/k_s = 1 + 2(1/\alpha) - 2V((1/\alpha) - 1)/1 + 2(1/\alpha) + V((1/\alpha) - 1)$ <p style="text-align: center;">Barea ve ark. (2005)</p> $C_{13} = 1 - \exp \left\{ -0,92 \cdot V^2 \log \frac{k_{argon}}{k_s} \right\}$ (Diğer çalışmada k_e/k_s ifadesindeki V yerine C_{13} kullanılmaktadır.) <p style="text-align: center;">Singh ve ark. (1998)</p>	s, sürekli ortam olarak seramik içerikli bir malzemenin özelliğidir. $0,35 < \varepsilon < 0,60$ $\alpha = (k_d/k_s)$
Singh Modeli	$k_e = \{k_{paralel}^2 \cdot \cos^2 \theta + k_{seri}^2 \cdot \sin^2 \theta\}^{1/2}$ $\sin^2 \theta = C_{14} \cdot V^{1/2} \cdot \ln(k_d/k_s) + C_{15}$ <p style="text-align: center;">Singh (2004)</p>	$\varepsilon < 0,90$ θ , katı faza göre eğim açısidir.
Agari ve Uno Modeli	$\log k_e = V_d \cdot C_{16} \cdot \log k_d + (1 - V_d) \cdot \log (C_{17} \cdot k_s)$ <p style="text-align: center;">Agari ve Uno (1986), Tavman (1998)</p>	İletken zincirler ve yüksek dolgu konsantrasyonları içindir.

Verma ve ark. Modeli	$k_e = \frac{k_s(k_d + C_{18}(1 - V_d)(k_s - k_d))}{(k_s - (1 - C_{18})(1 - V_d)(k_s - k_d))}$ $C_{18} = \exp[-w \cdot (k_s/k_d)^{1/3}]$ <p>Homojen dağılılı parçacıklar ve temas olmadığı durumu içerir. Verma ve ark.(1991), Belova ve Murch (2004)</p>	<p>Küresel ilaveler için $w = 1$ ve küresel olmayan ilaveler için $w < 1$.</p>
Druma ve ark. Modeli	$k_e = \frac{k_{ey}}{k_k} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{100}\right)\right]^{1/w}$ <p>Yalıtım köpüklerinden daha yüksek bağlı yoğunluk için ve Grafitli karbon köpükler için $k_k > k_{ey} \gg k_{gk}$.</p> <p>Druma ve ark. (2004)</p>	<p>Bu ifade, yüksek iletkenliklerde kullanılır. k_{ey}, esas yığın kısmın ısı iletkenliğidir.</p>
Springer ve Tsai Modeli	$k_e = k_{paralel} \cdot \sin^2\theta + k_{seri} \cdot \cos^2\theta$ <p>Springer ve Tsai (1967), Kalaprasad ve ark. (2000)</p>	<p>θ, katı faza göre eğim açısıdır.</p>
Meredith ve Tobias modeli (1962)	$\frac{k_e}{k_s} = \left[\frac{2 - V}{(2 + (X - 1)V)}\right] \cdot \left[\frac{2 \cdot (1 - V)}{2 \cdot (1 - V) + X \cdot V}\right]$ $X = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2w} + \frac{2}{(1 - w)}\right)$ <p>Cernuschi ve ark.(2004) Meredith ve Tobias (1962)</p>	<p>$V_d < \%60$ X, gelişigüzel düzenlenmiş küreler için faktördür. Sürekli matrisde gömülü taneciklerdir.</p>

Çizelge.4.3. Bir bileşen bilgisi isteyen efektif ısı iletkenlik modelleri

Modeller	Aralık
Hu ve ark. Modeli $k_e = k_u (k_{islak} - k_{kuru}) + k_{kuru}$ $k_u = 0,1811 \ln(S) + 0,9878$ Hu ve ark.(2001)	$0,25 < \varepsilon < 0,55$ (örneklerde) $k_s/k_d \leq 0,2$ $d=kati$
$k_e = \left[\frac{1}{(C_{19})} - \frac{1}{3(C_{19})^2(C_{20})(C_{21})^2} \cdot (T_a - T_{\bar{u}}) \ln \frac{T_a + (C_{21})}{T_{\bar{u}} + (C_{21})} + \frac{1}{6(C_{19})^2(C_{20})(C_{21})^2} \cdot (T_a - T_{\bar{u}}) \ln \frac{T_a^2 - (C_{21}) \cdot T_a + (C_{21})^2}{T_{\bar{u}}^2 - (C_{21}) \cdot T_{\bar{u}} + (C_{21})^2} - \frac{1}{\sqrt{3}(C_{19})^2(C_{20})(C_{21})^2} \cdot (T_a - T_{\bar{u}}) \left(\arctg \left(\frac{2T_a - (C_{21})}{\sqrt{3}(C_{21})} \right) - \arctg \left(\frac{2T_{\bar{u}} - (C_{21})}{\sqrt{3}(C_{21})} \right) \right) \right]$ Liang ve Qu (1999)	$0,10 < \varepsilon < 0,50$ (örneklerde) $k_{e_s}, R < 5 \text{ mm}$ ve $\varepsilon < \%78$ için k_e 'yi çok iyi veriyor.
Liang ve Qu Modeli $(C_{19}) = \frac{1}{k_d} \left[1 - \left(\frac{4\varepsilon}{\pi} \right)^{0,5} \right]$, $(C_{22}) = k_d \left[\left(\frac{\pi}{4\varepsilon} \right)^{0,5} - \frac{\pi}{4} \right] + \frac{\pi k_s}{4}$, $(C_{20}) = \frac{4}{3} \pi \sigma R$, $(C_{21}) = \left(\frac{(C_{22})}{(C_{20})} + \frac{1}{(C_{19})(C_{20})} \right)^{1/3}$, $\varepsilon = \frac{\pi R^2}{4 l^2}$ Liang ve Qu (1999)	.silindirik boşluklar için . d ve s, dağılı katı ve sürekli gaz fazlarıdır.
$(C_{19}) = \frac{1}{k_d} \left[1 - \left(\frac{6\varepsilon}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$, $(C_{20}) = \frac{2}{3} \pi \sigma R \left(\frac{6\varepsilon}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$, $\varepsilon = \frac{\pi R^3}{6 l^3}$ $(C_{21}) = \left(\frac{(C_{22})}{(C_{20})} + \frac{1}{(C_{19})(C_{20})} \right)^{\frac{1}{3}}$ $(C_{22}) = k_d \left[\left(\frac{\pi}{6\varepsilon} \right)^{1/3} - \frac{\pi}{6} \left(\frac{6\varepsilon}{\pi} \right)^{1/3} \right] + \frac{k_s}{6} \left(\frac{6\varepsilon}{\pi} \right)^{1/3}$ Liang ve Qu (1999)	. küresel boşluklar için $0,10 < \varepsilon < 0,50$ (örneklerde) <u>küresel</u> $\varepsilon=0,52$ <u>silindirik</u> $\varepsilon=0,78$
Gupta, Yang ve Roy Modeli $\lambda_e = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \varepsilon [(\varepsilon - 1) + \lambda_g^{-1} + \lambda_{i_s}] + \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \lambda_{i_l}$ Gupta ve ark. (2002, 2003) Tsotsas ve Martin (1987), Zehner ve Schlunder (1970)	$0,43 < \varepsilon < 0,63$ (kullanımda) $\lambda_g, \lambda_{i_s}, \lambda_{i_l}$ boyutsuz iletkenliklerdir.
Gibson Modeli $k_e = k_s \cdot \left\{ \frac{\left[\left(1 + (V_{sv} + V_{sv,d} + V_{lif}) \right) \cdot k_d \right] + (\varepsilon \cdot k_s)}{(\varepsilon \cdot k_d) + \left[\left(1 + (V_{sv} + V_{sv,d} + V_{lif}) \right) \cdot k_s \right]} \right\}$ Patirop (2004), Gibson (1996)	$V_{lif}=0,334$ $\varepsilon > 0,60$ kumaşlarda kullanılır.
Rahman ve Chen Modeli $k_e = \varepsilon \cdot k_s + F_r [(1 - \varepsilon - V_{su}) \cdot k_d + V_{su} \cdot k_{su}]$ $F_r = 0,996 [1 - \varepsilon + k_s/k_{su}] \cdot (T/273)^{0,713} \cdot X_{su}^{0,285}$ Rahman ve ark. (1997), Rahman ve Chen (1995)	$\varepsilon < 0,56$ meyve ve sebzeler için ele alınmıştır.

Rahman Modeli	$\left(\frac{k_e}{k_d}\right) \cdot \left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) = \left[1,82 - 1,66 \cdot \exp\left(-0,85 \frac{X_{su}}{X_{su,0}}\right)\right]$ <p style="text-align: right;">Rahman (1992)</p>	$5\% < X_n < 88\%$ $0 < \varepsilon < 0,5$ $20 < T < 25^\circ\text{C}$
Fu, Viskanta ve Gore Modeli	$\frac{k_e}{k_s} = \left[\frac{2\delta}{\varepsilon_{s1} \left(\frac{k_d}{k_s}\right) + (1 - \varepsilon_{s1})} + \frac{(1 - 2\delta)}{\varepsilon_{s2} \left(\frac{k_d}{k_s}\right) + (1 - \varepsilon_{s2})} \right]^{-1}$ <p>Dikdörgen şekilli kutu için (kubik): $\varepsilon = (1 - 2\delta)^3 + 6(1 - 2\delta)^2\delta$ Burada $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s3} = 1 - (1 - 2\delta)^2$ ve $\varepsilon_{s2} = 4\delta^2$ Küp hücre modelinde küresel oyuk durumunda, $\varepsilon = 2\pi \cdot \left[-\frac{4}{3}R^3 + \frac{3}{2}R^2 - \frac{1}{8}\right]$ burada $1/2 \leq R \leq \sqrt{2}/2$</p> <p style="text-align: right;">Kingergy ve ark. (1975), Fu ve ark. (1998)</p>	$0,53 \leq \varepsilon \leq 0,97$ Birim hücrede d ve s, dağılı katı ve sürekli gaz ortamlardır.
Lee ve Yang Modeli	$k_e = 1 + \left(\frac{k_d}{k_s} - 1\right) (1 - \varepsilon) \cdot (1 + m_1 \cdot \varepsilon^{m_2})^{-1}$ $m_1 = \left[\left(\frac{2}{(h/a)} + \frac{3}{(h/a)^2} \right) \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \left(1 + 6 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)\right) (\ln(k_d/k_s))^5 \right]$ $\left[2,522 \cdot 10^{-3} - 8,957 \cdot 10^{-4} (\ln(k_d/k_s)) + 9,714 \cdot 10^{-5} (\ln(k_d/k_s))^2 \right]$ $m_2 = \left(20 - \frac{29}{(h/a)} + \frac{15}{(h/a)^2} \right) \cdot \left(40 + 3 \left(\frac{b}{a}\right) - 13 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right)$ $[0,0095 - 0,001666 (\ln(k_d/k_s))]$ <p style="text-align: right;">Lee ve Yang (1997)</p>	$0 \leq \varepsilon \leq 1$, $0 \leq \frac{k_d}{k_s} \leq 1000$ $0,2 \leq \left(\frac{b}{a}\right) \leq 1$, $(h/a) \geq 1$ için verilmektedir. . s ve d, sürekli akışkan ve dağılı katıdır. $\alpha = k_d/k_s$
Xu ve Wirtz Modeli	$k_e = \frac{k_d}{2 \cdot c_d} \left[\frac{160\pi M_s d_t \left[\left(\frac{k_s}{k_d}\right) - 1 \right] + (C_{23}) \left(\frac{k_s}{k_d}\right) c_d^{-1}}{(C_{23})} + \frac{(C_{23}) \cdot (k_s/k_d)}{160 \cdot \pi \cdot M_s \cdot d_t \cdot (1 - (k_s/k_d)) + (C_{23}) \cdot c_d^{-1}} \right]$ $(C_{23}) = 123 \cdot (M_s \cdot d_t)^4 - 384 \cdot (M_s \cdot d_t)^2 - 640$ $c_d \cdot (1 - \varepsilon) = -3,906 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot (C_{23}) \cdot M_s \cdot d_t$ <p style="text-align: right;">Park (2001), Xu ve Wirtz (2002)</p>	. Kalınlık 2d ile sınırlı. Yani, $Md_{2d}(\max) = 0,577$ ve gözeneklilik $0 < c_d(1 - \varepsilon) < 0,534$ $0,7 < c_d < 1$ aralığındadır. d_t ve M_s , tel çapı ve mesh sayısıdır. s ve d, sürekli akışkan ve dolgu katı ortamıdır.

Çizelge.4.4. Diğer ısı transferi mekanizmalarını içeren efektif ısı iletkenlik modelleri

Modeller		Aralık
Wilkes, Hager ve Steere Modeli	$k_e = k_k + k_g + k_{l_s}$ $= 4k_d \left(\frac{\rho_e}{\rho_d}\right)^3 + \frac{k_s}{\left[1 - \frac{\rho_e}{\rho_d} + \frac{k_s \rho_e}{k_d \rho_d}\right]} + \frac{4\sigma T_o^3 \frac{d_d}{(\rho_e/\rho_d)} L_m}{\left[L_m + \frac{d_d}{(\rho_e/\rho_d)} \left(\frac{1}{2\epsilon_1} + \frac{1}{2\epsilon_2} - 1\right)\right]}$ <p style="text-align: center;">Wilkes (1950), Hager ve Steere(1967), Mohammadi (1998)</p>	<p>. s ve d, sürekli durgun hava ve dolgu katıdır. . (ρ_e/ρ_d) kalınlığına sahip katı lif malzeme ve $(1-\rho_e/\rho_d)$ kalınlığına sahip gaz tabaka</p>
Larkin ve Bhattacharya Modeli	$k_e = k_{il} + \frac{4\sigma T_o(T_o^2 + T_f^2)L_d}{\left[s_{gr} \cdot L_d + \frac{1}{\epsilon_{sk}} + \frac{1}{\epsilon_{s\bar{g}}} - 1\right]}$ <p style="text-align: center;">Bhattacharya (1980), Larkin (1957), Mohammadi (1998)</p>	$T_f = \frac{(T_{sk} - T_{s\bar{g}})}{2}$
Viskanta Modeli	$k_e = C_{24} \cdot (1 - V_k) \cdot k_d \cdot d_d^{ex} + \frac{\bar{n}^{-2} \sigma (T_{sk}^2 + T_{s\bar{g}}^2)(T_{sk} + T_{s\bar{g}})L_y}{\left[(s_{\bar{g}} - 2s_{\bar{c}}) \cdot \frac{L_y}{2} + (N_n - 1) \cdot \left(\frac{2}{E_m} - 1\right)\right]}$ <p style="text-align: center;">Viskanta (1965), Mohammadi (1998)</p>	-

EK-2. Takviyesiz Üçlü EPS Numunesinin SPSS 1.7 Programından Analiz Çıktısı

```

UNIANOVA lamMeas BY Temperat Diff.temp
/METHOD=SSTYPE(3)
/INTERCEPT=INCLUDE
/POSTHOC=Temperat Diff.temp(SNK)
/EMMEANS=TABLES(Temperat)
/EMMEANS=TABLES(Diff.temp)
/EMMEANS=TABLES(Temperat*Diff.temp)
/PRINT=ETASQ HOMOGENEITY DESCRIPTIVE
/CRITERIA=ALPHA(.05)
/DESIGN=Temperat Diff.temp Temperat*Diff.temp.
[DataSet1] C:\Documents and Settings\LaborPC\Desktop\strafor.sav

```

Tek Değişkenli Varyans Analizi

Çizelge.4.5. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde altkümelerin faktörleri

		Deney Sayısı
Sıcaklık	0	7
	5	7
	10	6
	15	6
	20	3
	25	3
	32	3
	40	4
Sıcaklık Farkı	5	13
	10	12
	15	14

Çizelge.4.6. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde Levene testi-hata varyanslarının eşitliği

Levene Testi-Hata Varyanslarının Eşitliği

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

F _i	df1	df2	p
4,779	23	15	,001

Bağımlı değişkenin hata varyansının gruplar boyunca eşit olduğu bir anlamsız hipotezi test etmektedir. df, serbestlik derecesidir.

a. Tasarım: Kesişim (intercept)+ Sıcaklık + Sıcaklık Farkı + Sıcaklık * Sıcaklık Farkı

Çizelge.4.7. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde tanımlayıcı veriler**Tanımlayıcı Veriler**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Sıcaklık Farkı	Ortalama	Standart Sapma	Deney Sayısı
0	5	41,840000	,5011986	3
	10	42,080000	.	1
	15	42,540000	,1969772	3
	Toplam	42,174286	,4699949	7
5	5	42,905000	,0919239	2
	10	28,973333	25,0916447	3
	15	43,530000	,0000000	2
	Toplam	37,112857	16,3676640	7
10	5	44,035000	,1626346	2
	10	44,490000	,0424264	2
	15	44,675000	,0353553	2
	Toplam	44,400000	,3044339	6
15	5	45,530000	,0000000	2
	10	45,685000	,1626346	2
	15	45,875000	,0494975	2
	Toplam	45,696667	,1722401	6
20	5	47,170000	.	1
	10	47,130000	.	1
	15	46,920000	.	1
	Toplam	47,073333	,1342882	3
25	5	49,410000	.	1
	10	48,720000	.	1
	15	48,390000	.	1
	Toplam	48,840000	,5204805	3
32	5	50,950000	.	1
	10	50,540000	.	1
	15	50,030000	.	1
	Toplam	50,506667	,4609049	3
40	5	53,110000	.	1
	10	52,470000	.	1
	15	52,565000	,1343503	2
	Toplam	52,677500	,3019244	4
Toplam	5	45,469231	3,6987125	13
	10	42,350833	13,6861160	12
	15	46,160714	3,5125565	14
	Toplam	44,757949	8,0925954	39

Çizelge.4.8. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde altkümeler etkisini test etme

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Kaynak	Kareler Toplamı (Type III)	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F _i	p	η_i^2
Düzeltilmiş Model	1228,778 ^a	23	53,425	,636	,840	,494
Kesişim (intercept)	70350,331	1	70350,331	837,606	,000	,982
Sıcaklık	698,814	7	99,831	1,189	,366	,357
Sıcaklık Farkı	23,518	2	11,759	,140	,870	,018
Sıcaklık* Sıcaklık Farkı	274,942	14	19,639	,234	,995	,179
Hata	1259,846	15	83,990			
Toplam	80616,309	39				
Düzeltilmiş Toplam	2488,624	38				

a. $R^2 = .494$ (Ayarlı $R^2 = -.282$)**Çizelge.4.9.** Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık için tahmini sınır ortalamaları**1. Sıcaklık**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
0	42,153	3,944	33,747	50,559
5	38,469	3,527	30,951	45,988
10	44,400	3,741	36,425	52,375
15	45,697	3,741	37,722	53,671
20	47,073	5,291	35,795	58,351
25	48,840	5,291	37,562	60,118
32	50,507	5,291	39,229	61,785
40	52,715	4,830	42,420	63,010

Çizelge.4.10. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için tahmini sınır ortalamaları**2. Sıcaklık Farkı**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık Farkı	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
5	46,869	2,767	40,971	52,766
10	45,011	2,883	38,866	51,156
15	46,816	2,646	41,177	52,455

Çizelge.4.11. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık*sıcaklık farkı etkileşimi için tahmini sınır ortalamaları

3. Sıcaklık * Sıcaklık Farkı

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Sıcaklık Farkı	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
				Alt Sınır	Üst Sınır
0	5	41,840	5,291	30,562	53,118
	10	42,080	9,165	22,546	61,614
	15	42,540	5,291	31,262	53,818
5	5	42,905	6,480	29,092	56,718
	10	28,973	5,291	17,695	40,251
	15	43,530	6,480	29,717	57,343
10	5	44,035	6,480	30,222	57,848
	10	44,490	6,480	30,677	58,303
	15	44,675	6,480	30,862	58,488
15	5	45,530	6,480	31,717	59,343
	10	45,685	6,480	31,872	59,498
	15	45,875	6,480	32,062	59,688
20	5	47,170	9,165	27,636	66,704
	10	47,130	9,165	27,596	66,664
	15	46,920	9,165	27,386	66,454
25	5	49,410	9,165	29,876	68,944
	10	48,720	9,165	29,186	68,254
	15	48,390	9,165	28,856	67,924
32	5	50,950	9,165	31,416	70,484
	10	50,540	9,165	31,006	70,074
	15	50,030	9,165	30,496	69,564
40	5	53,110	9,165	33,576	72,644
	10	52,470	9,165	32,936	72,004
	15	52,565	6,480	38,752	66,378

Çizelge.4.12. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık için S-N-K testi sonuçları**Efektif Isıl İletkenlik**Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık	Deney Sayısı	Altküme
		1
5	7	37,112857
0	7	42,174286
10	6	44,400000
15	6	45,696667
20	3	47,073333
25	3	48,840000
32	3	50,506667
40	4	52,677500
p		,272

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 83,990'dır.

- Harmonik ortalama örnek boyutunu = 4.280.
- Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.
- Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.4.13. Takviyesiz üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için S-N-K testi sonuçları**Efektif Isıl İletkenlik**Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık Farkı	Deney Sayısı	Altküme
		1
10	12	42,350833
5	13	45,469231
15	14	46,160714
p		,554

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 83,990'dır.

- Harmonik ortalama örnek boyutunu = 12,949.
- Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.
- Anlamlılık seviyesi %5

EK-3. Takviyeli Üçlü EPS Numunesinin SPSS 1.7 Programından Analiz Çıktısı

```

UNIANOVA lamMeas BY Temperat Diff.temp
/METHOD=SSTYPE(3)
/INTERCEPT=INCLUDE
/POSTHOC=Temperat Diff.temp(SNK)
/EMMEANS=TABLES(OVERALL)
/EMMEANS=TABLES(Temperat)
/EMMEANS=TABLES(Diff.temp)
/EMMEANS=TABLES(Temperat*Diff.temp)
/PRINT=ETASQ HOMOGENEITY DESCRIPTIVE
/CRITERIA=ALPHA(.05)
/DESIGN=Temperat Diff.temp Temperat*Diff.temp.
[DataSet1] C:\Documents and Settings\LaborPC\Desktop\strafor.sav

```

Tek Değişkenli Varyans Analizi

Çizelge.4.14. Takviyeli üçlü EPS numunesinde altkümelerin faktörleri

Altkümelerin Faktörleri		
		Deney Sayısı
Sıcaklık	5	3
	10	4
	15	6
	20	3
	25	11
	32	8
	40	9
Sıcaklık Farkı	5	10
	10	18
	15	16

Çizelge.4.15. Takviyeli üçlü EPS numunesinde Levene testi-hata varyanslarının eşitliği

Levene Testi: Hata Varyanslarının Eşitliği

Bağımlı değişken: efektif ısıl iletkenlik

F_i	df1	df2	p
1,943	15	28	,063

Bağımlı değişkenin hata varyansının gruplar boyunca eşit olduğu bir anlamsız hipotezi test etmektedir.

a. Tasarım: Kesişim (intercept)+ Sıcaklık + Sıcaklık Farkı + Sıcaklık * Sıcaklık Farkı

df: serbestlik derecesi

Çizelge.4.16. Takviyeli üçlü EPS numunesinde tanımlayıcı veriler**Tanımlayıcı Veriler**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık Farkı	Sıcaklık	Ortalama	Standart Sapma	Deney Sayısı
5	15	9,526667	1,8010090	3
	Toplam	9,526667	1,8010090	3
10	10	10,335000	,0919239	2
	15	20,015000	2,0576807	2
	Toplam	15,175000	5,7138691	4
15	5	9,860000	.	1
	10	21,646667	1,5048699	3
	15	28,490000	1,9657569	2
	Toplam	21,963333	6,9336820	6
20	10	34,926667	1,0598270	3
	Toplam	34,926667	1,0598270	3
25	5	44,160000	4,4223636	3
	10	40,628000	4,9990519	5
	15	42,836667	,3524675	3
	Toplam	42,193636	4,0548915	11
32	5	80,350000	4,2023922	3
	10	59,755000	4,1648589	2
	15	56,856667	,2409011	3
	Toplam	66,391250	11,9410869	8
40	5	119,976667	4,3957972	3
	10	81,276667	3,0591230	3
	15	71,880000	,2951271	3
	Toplam	91,044444	22,2396420	9
Toplam	5	74,332000	38,5280910	10
	10	42,048333	22,7632876	18
	15	40,019375	22,7893775	16
	Toplam	48,647727	29,9343598	44

Çizelge.4.17. Takviyeli üçlü EPS numunesinde altkümeler etkisini test etme

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Kaynak	Kareler Toplamı (Type)	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F _i	p	η_i^2
Düzeltilmiş Model	38259,820 ^a	15	2550,655	263,523	,000	,993
Kesişim (intercept)	65610,944	1	65610,944	6778,643	,000	,996
Sıcaklık	27749,889	6	4624,982	477,833	,000	,990
Sıcaklık Farkı	1036,292	2	518,146	53,533	,000	,793
Sıcaklık* Sıcaklık	3017,097	7	431,014	44,531	,000	,918
Hata	271,014	28	9,679			
Toplam	142661,294	44				
Düzeltilmiş Toplam	38530,834	43				

a. $R^2 = .993$ (Ayarlı $R^2 = .989$)**Çizelge.4.18.** Takviyeli üçlü EPS numunesinde genel ortalama**1. Grand Ortalama**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
		Alt Sınır	Üst Sınır
45,782 ^a	,497	44,764	46,801

a. Değiştirilmiş populasyon sınır ortalamaya dayanmaktadır.

Çizelge.4.19. Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık için tahmini sınır ortalamaları**2. Sıcaklık**

Bağımlı değişken: efektif ısı iletkenlik

Sıcaklık	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
5	9,527 ^a	1,796	5,847	13,206
10	15,175 ^a	1,556	11,989	18,361
15	19,999	1,404	17,123	22,875
20	34,927 ^a	1,796	31,247	38,606
25	42,542	,965	40,564	44,519
32	65,654	1,120	63,359	67,948
40	91,044	1,037	88,920	93,169

a. Değiştirilmiş populasyon sınır ortalamaya dayanmaktadır.

Çizelge.4.20. Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için tahmini sınır ortalamaları

3. Sıcaklık Farkı

Bağımlı değişken: efektif ısıl iletkenlik

Diff. temp.	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
5	63,587 ^a	1,100	61,334	65,840
10	41,428 ^a	,769	39,853	43,003
15	38,268 ^a	,792	36,645	39,890

a. Değiştirilmiş populasyon sınır ortalamaya dayanmaktadır.

Çizelge.4.21. Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık*sıcaklık farkı etkileşimi için tahmini sınır ortalamaları

4. Sıcaklık * Sıcaklık Farkı

Bağımlı değişken: efektif ısıl iletkenlik

Sıcaklık	Sıcaklık Farkı	Ortalama	Standart Hata	95% Güven Aralığı	
				Alt Sınır	Üst Sınır
5	5	. ^a	.	.	.
	10	. ^a	.	.	.
	15	9,527	1,796	5,847	13,206
10	5	. ^a	.	.	.
	10	10,335	2,200	5,829	14,841
	15	20,015	2,200	15,509	24,521
15	5	9,860	3,111	3,487	16,233
	10	21,647	1,796	17,967	25,326
	15	28,490	2,200	23,984	32,996
20	5	. ^a	.	.	.
	10	34,927	1,796	31,247	38,606
	15	. ^a	.	.	.
25	5	44,160	1,796	40,481	47,839
	10	40,628	1,391	37,778	43,478
	15	42,837	1,796	39,157	46,516
32	5	80,350	1,796	76,671	84,029
	10	59,755	2,200	55,249	64,261
	15	56,857	1,796	53,177	60,536
40	5	119,977	1,796	116,297	123,656
	10	81,277	1,796	77,597	84,956
	15	71,880	1,796	68,201	75,559

a. Faktörlerin bu seviye kombinasyonu, gözlenmemektedir. Bu yüzden, uygun populasyon sınır ortalaması tahmin edilemez.

Çizelge.4.22. Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık için S-N-K testi sonuçları**Efektif Isıl İletkenlik**Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık	Deney Sayısı	Alt Küme						
		1	2	3	4	5	6	7
5	3	9,526667						
10	4		15,175000					
15	6			21,963333				
20	3				34,926667			
25	11					42,193636		
32	8						66,391250	
40	9							91,044444
1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 9,679'dır.

- Harmonik ortalama örnek boyutunu = 4,963.
- Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.
- Anlamlılık seviyesi %5

Çizelge.4.23. Takviyeli üçlü EPS numunesinde sıcaklık farkı için S-N-K testi sonuçları**Efektif Isıl İletkenlik**Student-Newman-Keuls^{a,b,c}

Sıcaklık Farkı	Deney Sayısı	Alt Küme	
		1	2
15	16	40,019375	
10	18	42,048333	
5	10		74,332000
p		,098	1,000

Homojen alt kümelerdeki grupların ortalaması göstermektedir. Hata terimi kareler ortalamasıdır ve 9,679'dır.

- Harmonik ortalama örnek boyutunu = 13,758.
- Grup boyutları eşitsiz. Grup boyutlarının harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Tip I hata seviyeleri garanti edilememektedir.
- Anlamlılık seviyesi %5

ÖZGEÇMİŞ

01 Ekim 1977'de Havran/Balıkesir'de doğan Numan YÜKSEL, ilk ve orta öğrenimini Balıkesir' in Havran ilçesinde tamamladı. 1995 yılında Edremit Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Makine bölümünden birincilikle mezun oldu. 1999 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden Mühendislik unvanını aldıktan sonra araçlara LPG dönüşümü yapan Timgaz LTD. ŞTİ.' nde ve Doğalgaz servis hattı yapım şirketi Elit Mühendislikte yetkili mühendis olarak çalıştı. 2000 Eylül'de özel sektörde çalışırken Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Termodinamik ve Enerji bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 08.01.2004'de "Enerji Depolama Sistemlerinin Modellenmesi ve Optimizasyonu" konulu tez çalışması ile yüksek lisans derecesini aldı. 2004 Şubat'ta Doktora öğrenimine başladı. Araştırma Görevlisi Numan YÜKSEL'in yüksek lisans ve doktora öğrenimi süresince enerji depolama sistemlerinin modellenmesi, sıcak su tesisatının enerji harcaması, gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenlikleri ve kamu kurumlarında yapısal konfor üzerine 1 adet SCI-SCI expanded makale ve 4 adet ulusal dergilerde yayınlamış makale bulunmaktadır. Ayrıca, doktora çalışmasından yapılan 2 adet SCI-SCI expanded makale ile birlikte 7 bilimsel yayını bulunmaktadır. 2001 yılı Ağustos ayında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Numan Yüksel, Mühendislik-Mimarlık Fakültesinde görevine devam etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bana bu konuda çalışma fırsatı verip, her zaman ve her konuda destek olan, bilgi ve deneyimi ile çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Atakan AVCI'ya, şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca, tezin gelişim aşamalarında yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Muhiddin CAN ve Prof. Dr. Yusuf ULCAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında oluşturulan M-2008 / 48 nolu Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma projesinde yürütücü olarak emeği geçen Prof. Dr. Muhsin KILIÇ'a, teşekkürlerimi sunarım.

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora seviyesinde Makine Mühendisliği Bölümünde yetişmemde emeği geçen, başta Prof. Dr. Abdulvahap YİĞİT ve Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ olmak üzere tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarım sırasında tecrübesi ile bana çok yardımcı olan Teknisyen Yaşar KUMRALTEKİN' e ve çalışmalarım sırasında hep yanımda olan değerli dostlarıma, Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bana hayatımın her aşamasında maddi, manevi her konuda her zaman destek olan çok değerli babam Mehmet Emin YÜKSEL, annem Habibe YÜKSEL, eşim Ayşe YÜKSEL, kardeşim Naile YÜKSEL, ve kızım Nurten YÜKSEL'e ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.