

YALITIM MALZEMELERİNDE TAKVİYENİN ISIL DAVRANIŞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Numan YÜKSEL *
Atakan AVCI **

Özet: Bu çalışmada, gözenekli yalıtım malzemelerinde taşınım ve ışıınının efektif ısı iletkenliğe etkisi takviye açısından deneysel olarak incelenmiştir. Deneyle, iki standart test cihazı yanısıra uygulaması yapılan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, emisivitesi düşük ve iletken naylon, kağıt, ince folyo türü malzemeler cam yünü malzemelerine takviye edilmiş ve efektif ısı iletkenlikleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlardan, ince folyo ile desteklenmiş gözenekli yalıtım malzemelerinde 20 °C ortalama sıcaklığının altında 0 °C ve 10 °C sıcaklıklarda efektif ısı iletkenliğinin azaldığı gözlenmiştir. İnce folyo ile takviyelenmiş gözenekli yalıtım malzemesinin efektif ısı iletkenliği, % 9 kadar azalmıştır. Uygulamalı deney düzeneğinde, takviyesiz üçlü camyününün ısınma süresinin takviyeli numuneninkinden % 28,57 daha yavaş olduğu bulunmuştur. Ayrıca naylon ve kağıt gibi düşük yansıtıcı malzemeleri kullanarak geliştirilen cam yünü yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenliği, takviyesiz camyünü sonuçlarıyla benzer bulunmuştur. Bu sonuçlardan, ışıınının önemli bir mekanizma olduğu ve standart davranışın dışında etkiler oluşturabildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yalıtım malzemesi, Takviye, Isı iletim katsayısı, Sıcaklık, Sıcaklık Değişimi.

The Effect of Reinforcement on the Thermal Behavior of Insulation Materials

Abstract: In this study, the effect of convection and radiation in porous insulation materials on the effective thermal conductivity has been experimentally investigated in terms of the reinforcement. The experiments have been performed on two standard test apparatus and the other experimental setup in which an application is done. For this purpose, the glass wool materials are reinforced with low emissivity and conductive materials, such as stretch nylon, thin foil and white paper, and their thermal effective conductivities are determined. From experimental results, it is observed that the effective thermal conductivity of porous insulation materials reinforced with thin foil is decreased at 0 °C and 10 °C temperatures under the average temperature of 20 °C. The effective thermal conductivity of porous insulation material reinforced with thin foil is decreased up to 9 %. In the applied experimental setup, it found that the warming time of unreinforced ternary glass wool is 28,57 % slower than that of the other reinforced sample. Also, the ETC of glass wool insulation materials improved by using low-reflectivity materials such as stretch nylon and white paper, which are similar to those of the unreinforced glass wool. From these results, it is seen that the radiation is an important mechanism and it can form the effects except for standard behavior.

Keywords: Insulation material, Reinforcement, Thermal conductivity, Temperature, Temperature Change.

* Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Mimarlık Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Osmangazi Kampus, 16190 Bursa.

** Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa.

İletişim Yazarı: N. Yüksel (numan.yuksel@btu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Enerji kullanımı hayatın her kademesinde gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde kullanılan enerji kaynakları, çevreye kirletici salınımını artırmakta ve bunlar da yerel ve küresel önemli problemlere yol açmaktadır. Şu an çözüme dair olarak, mevcut kaynaklara alternatif olabilecek kirletici kaynakları azaltmak ve mevcut veya yeni kaynaklar için tasarruf sağlayıcı sistemleri geliştirmek gösterilebilir. Bu tasarruf sağlayıcı sistemler arasında yalıtım malzemesi ön plana çıkmaktadır ve yaygın kullanıldığı alanlardan biri de, ısı yalıtım uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda yalıtım malzemesinin en önemli özelliklerinden biri, efektif ısı iletim katsayısıdır ve etkili bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin yapı yalıtım işlemlerinde, kurutma, ısıtma işlemlerinde, soğutma içeren işlemlerde ve diğer işlemlerde etkisi görülmektedir. Efektif ve optimum ısı dizayn için, özellikle yalıtım performansı açısından malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu şekilde, hem enerjinin etkin ve verimli kullanımını sağlayacak hem de çevrenin korunmasına katkı sağlayacaktır. Gözenekli malzemelerin geliştirilmesinde, temel ısı transferi mekanizmaları ve bunlardan iletim yanında ışınımın, taşınımın etkisi ele alınması önemlidir. Son yıllarda yapılan literatür çalışmalarında yansıtıcı malzeme ve ışınım etkisi dikkat çekmektedir. Gözenekli malzemelerde ışınımın vakum şartlarında hatta oda sıcaklığında bile ihmal edilemeyeceği bildirilmiştir (Hütter ve Kömle, 2008). Bununla birlikte ışınım ısı transferi ve gaz iletiminin belirli şartlar altında baskın ısı transferi mekanizmaları haline dönüştüğü tespit edilmiştir (Zhao ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2008). Bazı çalışmalarda ise bazı gözenek ve hücre boyutlarında ısı ışınımının da önemli hale gelebileceği gözlenmiştir (Zerroung ve ark., 2007; Tseng ve Chu, 2009). Buna karşılık lif emisivite değerlerinin etkisinin önemsiz bir değişime neden olduğu gözlenmiştir (Wu ve ark., 2007). Sıcaklık artışının ışınım ısı transferi nedeniyle efektif ısı iletkenliğini artırdığı tespit edilmiştir. (Wulf ve ark., 2007). Yansıtıcı malzemelerin kullanımı halinde iç yansıtıcı tabakanın ısı transferinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür (Safavisohi ve ark., 2009). Metalik folyoların ısı ışınımının ısı transferine katkısının düşük olduğu görülmüştür (Lim ve ark., 2007). Buna karşılık çok tabakalı ısı yalıtım malzemelerinde yansıtıcı ışınım perdelerinin emisivite değerlerinin azalmasının efektif ısı iletkenliği azalttığı görülmüştür (Spinnler ve ark., 2004). Burada yüksek sıcaklık uygulamalarında düşük emisivite ve yüksek iletkenlikte malzemelerle (altın, gümüş gibi) efektif ısı iletkenliğinin azaldığı gözlenmiştir. Çok tabakalı alüminyum folyo gibi yansıtıcı malzemelerin yalıtım malzemesine ilavesinin ortam sıcaklıklarında ısı transferini sıcaklığa bağlı olarak artırdığı veya azalttığı deneysel olarak gözlenmiştir (Yüksel, 2010; Yüksel ve ark., 2010 ve 2012). Teorik yaklaşımlarda ışınımın etkisi genel olarak efektif ısı iletkenliği artırıcı etki şeklinde tanımlanmıştır (Tseng ve ark., 1997). Bazı araştırmalarda bu etki Rosseland difüzyon yaklaşımına dayanan ışınım iletkenliği olarak sunulmaktadır (Gupta ve ark., 2003; Ochs ve ark., 2008; Mohammadi, 1998; Yüksel ve Avcı, 2010; Weidenfeld ve ark., 2004). Bazı çalışmalarda taşınımın etkisi, küçük ve ihmal edilebilir olduğu ifade edilmiştir (Stark ve Fricke, 1993). Bununla birlikte ısı iletkenliğine difüzyon işleminin katkısı ise modellenmiştir (Ochs ve ark., 2008; Grohe, 2004). Bu sonuçlardan, yansıtıcı malzemenin ve ışınımının önemli artırıcı ve azaltıcı bir mekanizma olduğu anlaşılmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda, yalıtım malzemelerinde ışınım etkisi deneysel ve teorik ele alınmış. Bu çalışmada ise, ışınım ve taşınım etkisi sıcaklık ve takviye açısından deneysel olarak çalışılmıştır. Bu amaçla, gözenekli yalıtım malzemeleri (özellikle cam yünü) farklı malzemeler ile (başta naylon, kâğıt, ince alüminyum folyo olmak üzere) takviye edilmiştir. Takviyeli yalıtım malzemelerin efektif ısı iletkenlikleri deneysel olarak ölçülerek efektif ısı iletkenlikleri incelenmiştir. Son aşamada, uygulamalı bir deney setinde takviyeli ve takviyesiz durumda yalıtım etkisi gözlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Efektif ısı iletkenliğe, farklı parametrelerin

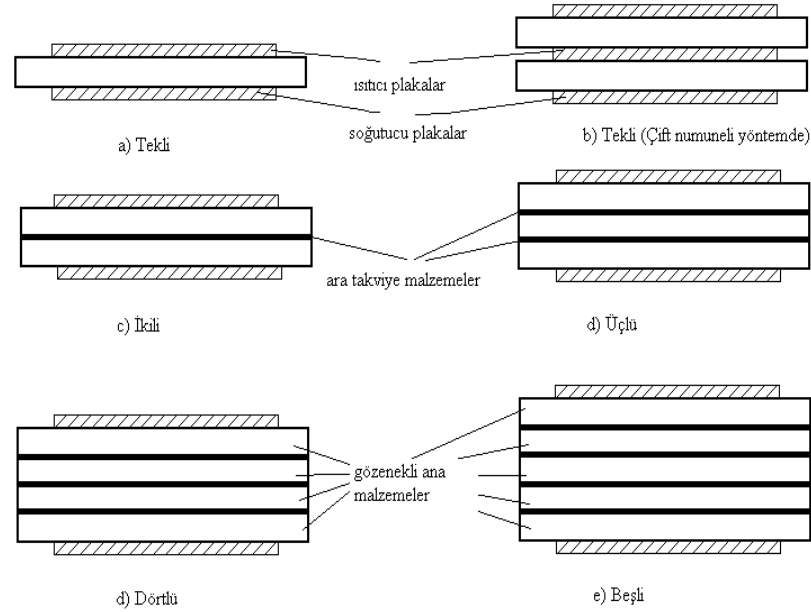
etkisi (takviye cinsi, sıcaklık, sıcaklık farkı gibi) tespit edilmiş ve takviyeli malzemenin performansı değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyler, EP500 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazında (Lambda Messtechnik), mevcut sıcak plaka cihazında ve yalıtımlı test düzeneğinde belirli sıcaklıklarda yapılmıştır. Farklı tasarlanmış yalıtım malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen efektif ısı iletkenlik ölçümleri farklı sıcaklık ve sıcaklık farklarında belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Tasarımı, pratikte uygulaması mevcut olabilecek farklı takviyeler değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Takviyesiz ve takviyeli numunelerin efektif ısı iletkenlikleri, sıcaklık değişim uygulaması yapılarak test edilmiştir.

2.1. Malzemeler

Deneylerde takviyesiz ve takviyeli numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler tekli, ikili, üçlü, dördü, beşli gözenekli numuneler olup Şekil.1'deki gibi seri halde yerleştirilerek elde edilmiştir. Tüm malzemeler, 50x50 cm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Bu takviyeli numuneler, cam yünü numuneleri arasına naylon, kağıt, ince alüminyum folyo seri halde yerleştirilerek oluşturulmuştur. Bu şekilde iletimle ısı transferi gerçekleşirken, araya konulan takviyeler ile taşınım ile olan ısı transferi engellenmiş ve ışınım ile ısı transferi etkisi gözlenmiştir. Bunlar, farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık farklarında ele alınmıştır. Ancak mevcut çift numuneli sıcak plaka deney tesisatında, ısı kaybını azaltmak için 45 x 45 cm boyutlarında numuneler kullanılarak efektif ısı iletkenlikleri ölçülmüştür.



Şekil 1:
Farklı kalınlıklara sahip numuneler

Numunelerin ortalama kalınlıkları ve kütleleri ise, takviyesiz ve takviyeli camyünü malzemesi olarak Tablo.1'de verilmiştir. Bu kalınlık verileri, EP500 ısı iletkenlik cihazında 1000 Pa basınç altındaki kalınlıklardır. Ayrıca, muhafazalı sıcak plaka tesisatında kalınlıklar 12 farklı noktadan ölçülerek belirlenmiştir. Bu kalınlıklar, tekli, ikili, üçlü cam yünü malzemelerinde ortalama olarak 15,993 mm, 31,21 mm, 44,83 mm ve 59,90 mm'dir. Bunların yoğunlukları ise, ortalama 105,91 kg/m³, 97,29 kg/m³, 101,36 kg/m³ ve 99,85 kg/m³'tür.

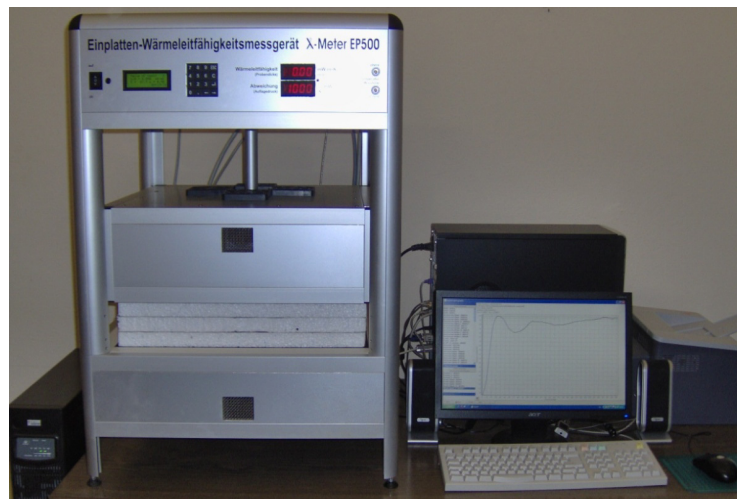
Tablo 1. Cam yünü malzemesinin takviyesiz ve takviyeli kalınlıkları ve kütleleri.

Takviyesiz cam yünü	Numuneler	Tekli	İkili	Üçlü	Dörtlü	Beşli
	Kalınlık (mm)	16,7	32,9	48,9	-	83,67
	Kütle (g)	388,7	804,2	1162,9	1571,7	1948
Takviyeli üçlü cam yünü	Takviyeler	1 (Al) ince folyolu	2 Stretch naylonlu	3 Kağıtla	-	-
	Kalınlık (mm)	48,9	48,8	49	-	-
	Kütle (g)	1180,5	1162,9 g	1203,7	-	-

Bu malzemelerden camyünü malzemesi, belirli kalınlıklarda sıkıştırılmış haldeki izopandan elde edilen açık gözenekli bir malzemedir. Diğer malzemeler piyasada hazır halde bulunmaktadır. Araya takviye edilecek malzemelerden ince alüminyum folyo, düşük emmisivite değerlerinde ve 1 µm kalınlığında olan bir malzemedir ve gıda muhafazasında kullanılmaktadır. Ardından, yüksek emmisivite değerlerine sahip malzemeler olarak stretch naylon ve kağıt kullanılmıştır. Bunlardan gıdaları kaplamada kullanılan 1 µm'dan düşük kalınlığa sahip stretch naylon tipi filmler, LDPE/LLDPE plastik malzemedir. Bunun dışında kağıt, beyaz kırtasiye tipi bir malzeme olup 10 µm kalınlıklı ve 81 g/m²' dir. Bu malzemelerin emisivite değerleri, kaplanmamış alüminyum folyoda 0,030-0,09, kağıtta 0,68-0,90 ve stretch naylonda 0,84-0,94 aralığındadır (<http://www.infrared-thermography.com>).

2.2. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Numunelerin efektif ısı iletkenlik ölçümleri, EP500 muhafazalı sıcak plaka cihazı (Lambda Messtechnik GmbH Dresden) ile gerçekleştirilmiştir. 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>). Bu cihaz, Şekil.2'de verildiği gibi otomatik kontrollü ve EP500 kontrol programı ile çalışmaktadır.

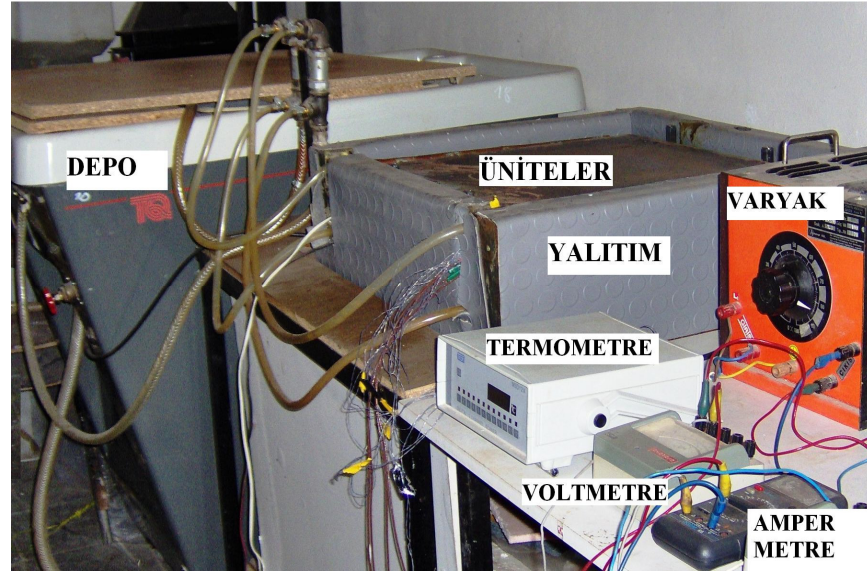


Şekil 2:
EP500 muhafazalı sıcak plaka ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Tek numuneli ve 10 mm ile 200 mm kalınlık aralıkların da 0,1 mm hassasiyette ölçüm yapılabilmektedir. Numune efektif ısı iletkenlikleri, -10 °C ve 40 °C sıcaklık aralıklarında ve 5 ile 15 °C sıcaklık farkı aralıklarında belirlenebilmektedir. Malzemeler üzerindeki azami cihaz basıncı 50..2500 Pa aralığında ayarlanabilmektedir. Çalışma oda sıcaklığı, yaklaşık 18...28 °C'dir. Cihaz belirli süre içerisinde yaklaşık hata oranına göre grafiği çizerek, ısı iletkenlik değerini vermektedir. Cihazın oda sıcaklığında beklenen doğruluğu < %2'dir.

2.3. Mevcut muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı

Muhafazalı sıcak plaka deney tesisatında, tek ve çift numuneli olarak efektif ısı iletkenlik belirlenebilmektedir. Bu, numunenin soğutma ve ısıtma üniteleri arasında yerleştirilmesine bağlıdır. Cihaz, 25-35 °C soğutma sıcaklık aralığına sahiptir. Isıtıcı plaka, 0-300 W aralığında ısı yüküne sahip ayarlı bir varyak sistemi ile ısıtılmaktadır. Bu şekilde, istenilen numune ortalama sıcaklığına ve sıcaklık farkına ayarlanabilmektedir. Tesisat, güç kaynağı ve soğutma deposu ile soğutma ve ısıtma ünitelerinden oluşmaktadır (Şekil 3). Bu üniteler, 50 x 50 cm iki dış soğutucu ve 40x40 cm bir iç ısıtıcı plakalardan oluşmaktadır.



Şekil 3:
Mevcut muhafazalı sıcak plaka deney tesisatı

Varyak ile ısıtıcı plakada sağlanan ısı, numuneye ve oradan da soğutucu plakaya iletilmektedir. Numune, bu plakalar ile belirli bir ısı akısında sabit sıcaklıkta tutulmaktadır. Tesisatta sıcaklıklar, soğutucu ve ısıtıcı plaka merkez yüzeylerine yerleştirilen ısı çiftleri ile ölçülmektedir. Sıcaklıklar, Dijital Tron M3D12X 12 kanallı termometrelerden (1 °C ölçüm hassasiyetli) okunmaktadır. Bu ısı çiftleri, numunenin alt ve üst yüzeyleriyle direkt temas halindedir. Deney tesisatındaki ısı kayıplarını önlemek için, etrafı 6,5 cm kalınlıklı poliüretan köpük yalıtım malzemesi ile kaplıdır. Numunenin efektif ısı iletkenliği, tesisatın rejime ulaştığı andaki verilerden (güç kaynağı, volt, amper, termometre) hesaplanmıştır ve Fourier ısı iletim kanununa göre belirlenmiştir. Ölçümler, farklı ısı güçlerinde ve farklı kalınlıklarda tekrarlanmıştır.

Mevcut sıcak plakalı tesisatta toplam hata, Moffat' ın (1988) önerdiği eşitlik kullanılarak belirlenmiştir. Hata kaynakları fonksiyonu (HKF), deneyler sırasında okunan yüzey sıcaklıkları, verilen ısı güç (voltmetre, ampermetre), ölçülen numune kalınlığı

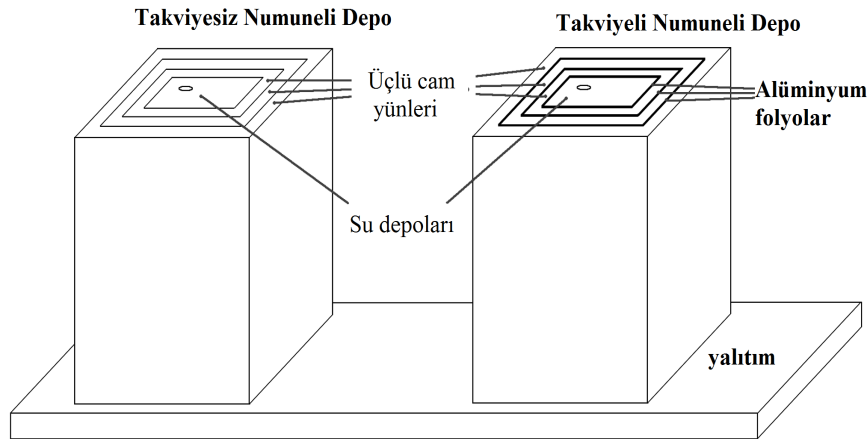
için $f(T_{\bar{u}}, T_a, V_I, A_I, x)$ şeklinde verilebilir. Bu durumda bağıl hata, Moffat' ın (1988) düşüncesine göre,

$$\text{Hata} = \left\{ \left(\frac{\Delta T_{\bar{u}}}{T_{\bar{u}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_a}{T_a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V_I}{V_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A_I}{A_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

olarak hesaplanabilmektedir. Buradaki terimler, sırasıyla üst numunenin sıcaklık, alt numunenin sıcaklık, voltmetre, ampermetre, kalınlık ve alan parametrelerine ait hata terimleridir. Bu parametrelerin hassasiyetleri ($\Delta T_{\bar{u}}$, ΔT_a , ΔV_I , ΔA_I , Δx , ΔA) ise, sıcaklıklarda ısı çiftlerinde $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, voltmetrede 2 V, ampermetrede 0,001 A, kalınlıkta (mihengir) 1/50 mm, alanda 1.10^{-6} m^2 alınabilir. Hata, bu parametrelerin ölçülen ortalama değerlerine göre hesaplanır. Hesaplamalar sonucu, yaklaşık hata oranı maksimum % 8 olarak tespit edilmiştir. Okuma hassasiyetiyle birlikte cihaz için hesaplanan hata % 9'dur.

2.4. Uygulamalı deney tesisatı

Efektif ısı iletkenlikler, standart ölçüm cihazlarında tespit edildikten sonra su deposuna yalıtım uygulaması yapılarak test edilmiştir. Su deposu olarak, yaklaşık 0,25 mm kalınlıkta ve 5 lt hacminde iki yağ tenekesi kullanılmıştır. Bu depolar, toplam izolasyon kalınlığı 49,5 mm olan takviyesiz ve takviyeli üçlü cam yünü numunelerle yalıtılmıştır. Buradaki cam yünü tabakaları, her biri 16,5 mm kalınlıktadır. Takviyeli üçlü camyünü numune, cam yünü tabakaları arasında 0,1 mm kalınlığında iki adet alüminyum folyo tabakası ilave edilerek hazırlanmıştır. Alüminyum takviyesiz ve takviyeli yalıtılmış depolar, su ile doldurularak ortama bırakılmıştır. Bu depolar içerisine ortam sıcaklığından farklı sıcaklıklarda soğuk su konularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ortam ve su sıcaklıkları, K tipi termo elemanlar ile ölçülmüştür. Sıcaklık verileri, Cole-parmer model 92000-05 veri toplayıcıda 5 dakika aralıkla kaydedilmiştir. Deney tesisatı, Şekil 4 ve 5'de gösterilmiştir. Sıcaklık- zaman değişimi eğrilerinden yararlanarak, yalıtım malzemesinin ortalama sıcaklığa göre ısınma süreleri tahmin edilmiştir.



Şekil 4:

Alüminyum folyo takviyesiz ve takviyeli üçlü cam yünü numuneleri ile yalıtılan 5 litrelik su depolarının tasarımı

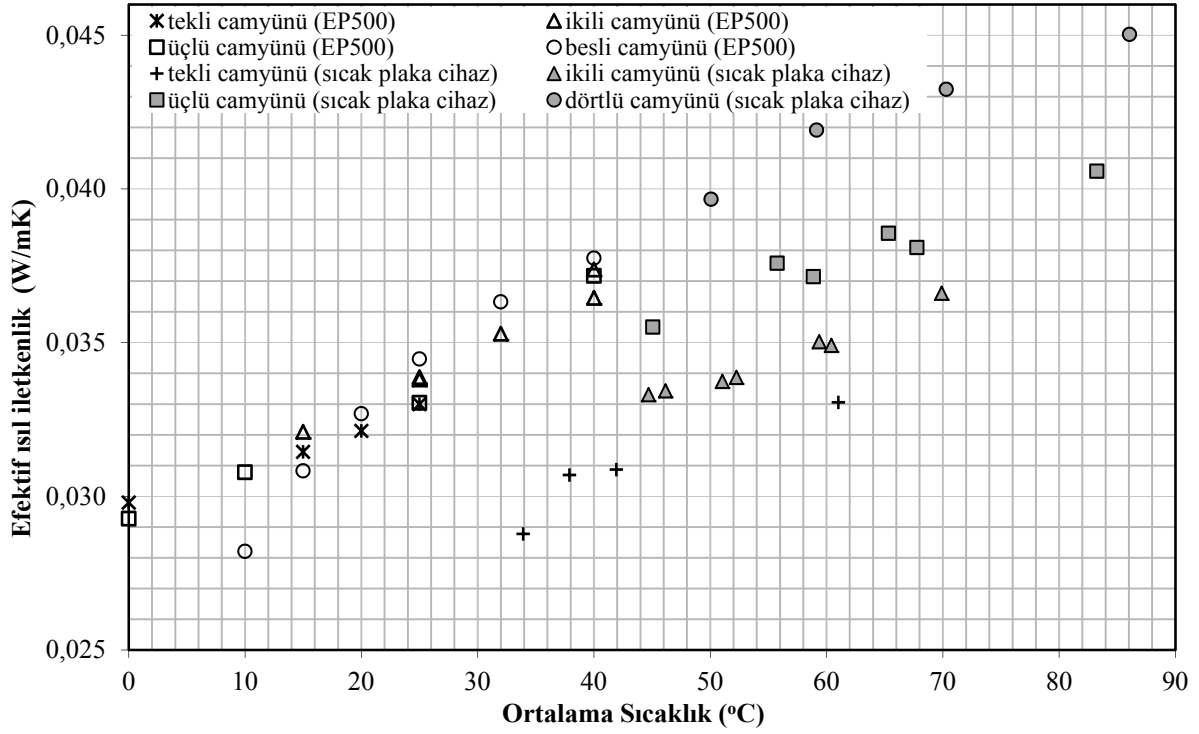


Şekil 5:

Alüminyum folyo takviyesiz ve takviyeli üçlü camyünü numunelerle yalıtılan 5 litrelik depoların ortam içerisinde ısınması

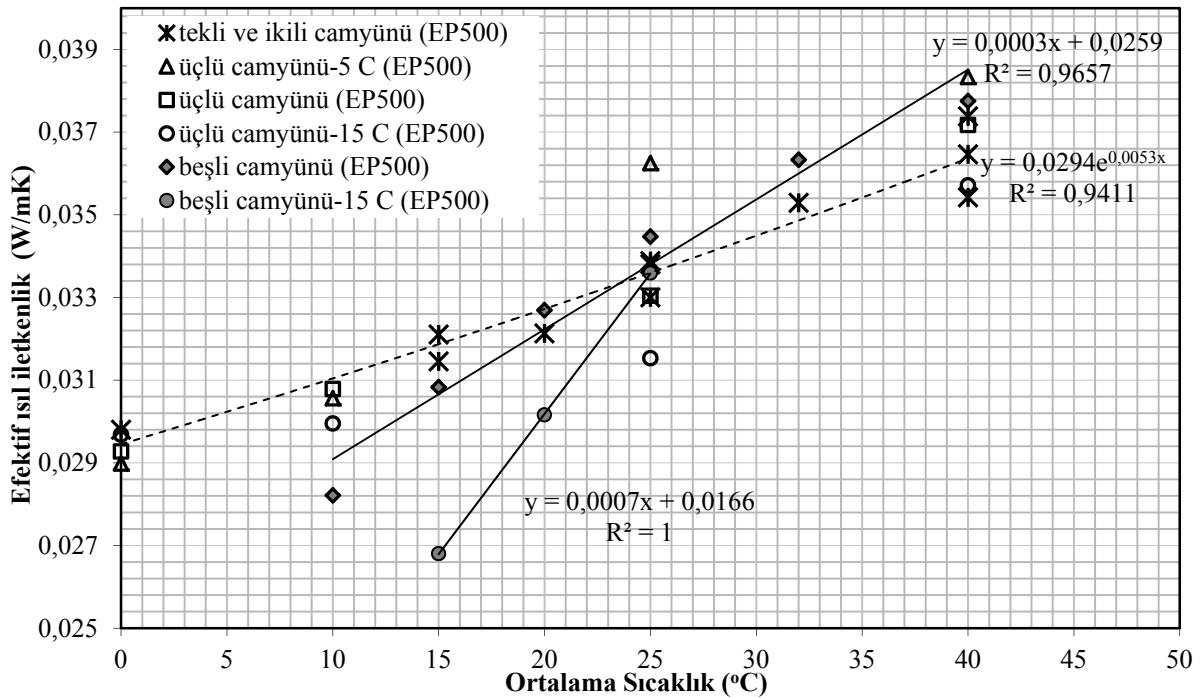
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Takviyeli yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenlikleri, farklı sıcaklık ve sıcaklık farklarında ölçümleri sunularak tartışılmıştır. Tekli, ikili, üçlü, dörtlü ve beşli takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenliklerin sıcaklıkla değişimi, EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazına ve mevcut sıcak plaka tesisatına göre Şekil.6'da verilmiştir. Şekil 6'dan takviyesiz yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenliklerinin, EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında (kalınlık farkı olmaksızın) % 2 aralık içerisinde olduğu görülebilir. Ancak mevcut sıcak plaka tesisatında, takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenliklerin sıcaklıkla değişimi (EP500 cihazının ortalama eğimine göre) ikili cam yününde %14, üçlü camyününde % 8 sapma göstermiştir. Bu sapma, Moffat' ın (1988) hatasıyla çakışmaktadır. Bu durum, çift numuneli tesisatta ısının eşit alınması ve ısı kayıp dağılımının belirlenememesindedir. Numunelerin efektif ısı iletkenliklerindeki artış, sıcaklık ve sıcaklık farkıyla maksimum % 14,28 oranında gerçekleşmiştir. Burada sıcaklık farkı, EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında 10 °C iken diğer tesisatta 36,82 °C ile 117 °C arasında değişmiştir. Başka bir çalışmada sıcaklık farkının, 450 °C yüksek sıcaklık farklarına kadar tabakalı kumaş malzemesinde efektif ısı iletkenliğini arttırdığı bulunmuştur (Mohammadi, 1998). Sıcaklık ve sıcaklık farkının etkilerini ayrı değerlendirebilmek için EP500 ısı iletkenlik cihazının sonuçları da irdelenebilir. Bunun için, Şekil 7'de aynı ortalama sıcaklıkta sıcaklık farkının takviyesiz ve takviyeli numunelerde etkisi verilmiştir. EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazında üçlü camyünü numunesi, 5 °C, 10 °C ve 15 °C sıcaklık farklarında test edilmiştir. Ayrıca beşli numune 10 °C ve 15 °C sıcaklık farklarında ölçülerek incelenmiştir. Üçlü camyünü numunede 5 °C sıcaklık farkı, 10 °C sıcaklık farkına göre aynı ortalama sıcaklıkta % ±1 (0 °C ve 10 °C), % +9,715 (25 °C) ve % +3,12 (40 °C) etkilemiştir. 15 °C sıcaklık farkı ise, 10 °C sıcaklık farkına göre aynı ortalama sıcaklıkta % +1,40 (0 °C), % -2,696 (10 °C), % -4,57 (25 °C) ve % -3,928 (40 °C) etkilemiştir. Beşli camyünü numunede 15 °C sıcaklık farkının etkisi, 10 °C sıcaklık farkına göre aynı ortalama sıcaklıkta % -13,07 (15 °C), % -7,739 (20 °C) ve % -2,553 (25 °C)'dir. Şekil 7'den sıcaklık farkının etkili olduğu, bu etkinin numuneye ve sıcaklığa bağlı olduğu görülebilir. Bu etki, EP500 ısı iletkenlik cihazının oda sıcaklığında doğruluğu <%2, bütün sıcaklık aralıklarında doğruluğu <%5 olduğundan dolayı önemlidir. Beşli camyünü numunede 15 °C sıcaklık farkı, 20 °C altındaki sıcaklıklarda etkili olmuştur. Ancak üçlü camyünü numunede 15 °C sıcaklık farkı cihazın beklenen doğruluk sınırları içerisinde sonuçlar vermiştir.



Şekil 6:

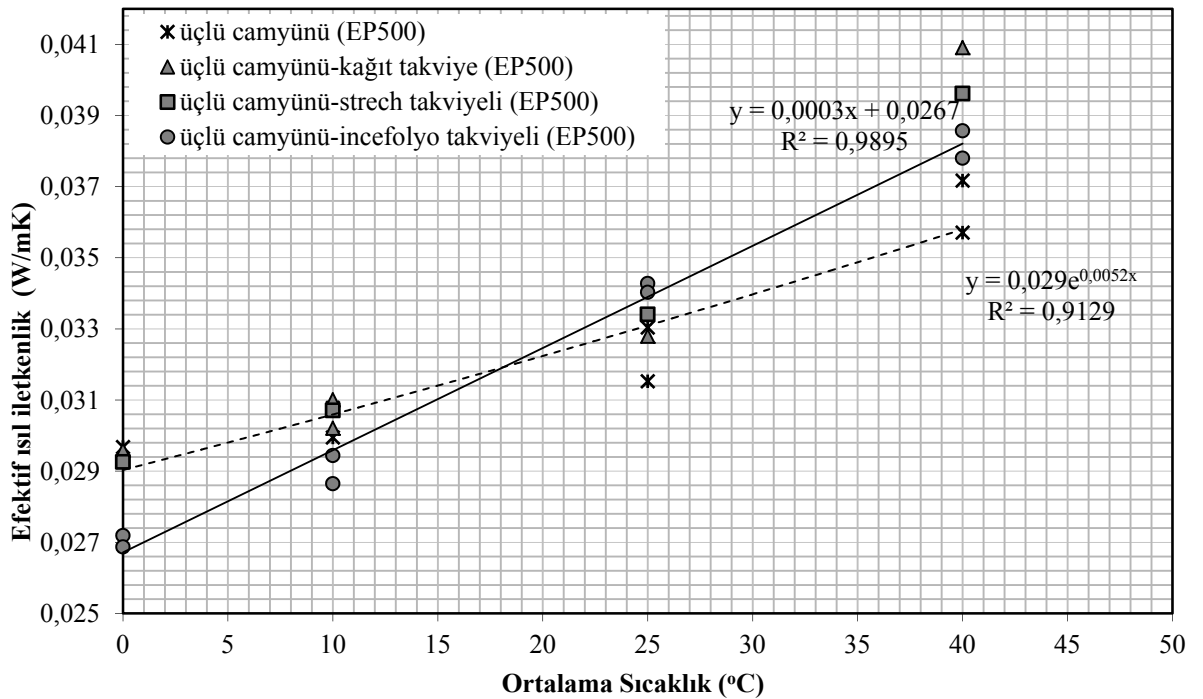
Tekli, ikili, üçlü, dörtlü ve beşli takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin farklı ölçüm cihazına göre ortalama sıcaklıkla değişimi



Şekil 7:

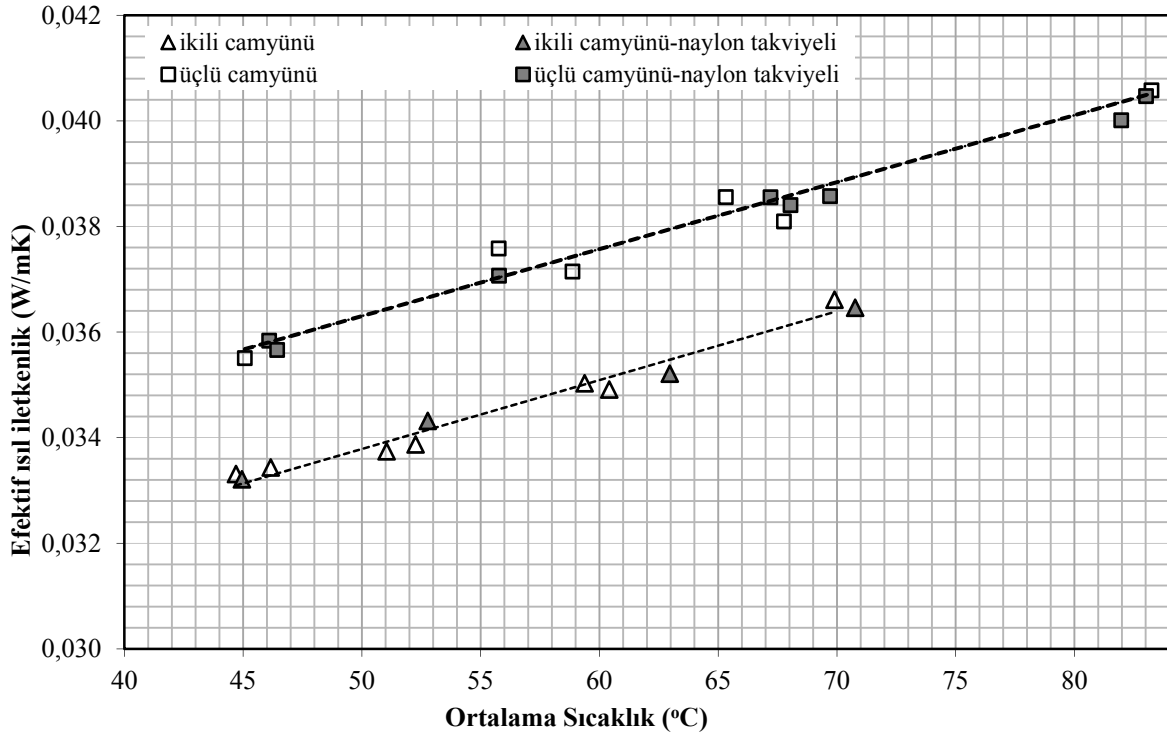
Üçlü ve beşli takviyesiz numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin 5, 10, 15 °C sıcaklık farklarına göre ortalama sıcaklıkla değişimi

Yalıtım numunesinin efektif ısı iletkenliklerine farklı takviyenin etkisi (kalınlık farkı olmaksızın) Şekil 8'den EP500 ısı iletkenlik ölçüm cihazına göre incelenebilir. Şekil 8'de, üçlü camyünü numunesinin kağıt, stretch naylon, ince folyo takviyelerinin etkileri takviyesiz duruma göre verilmiştir. 10 °C sıcaklık farkında kağıt takviye, 0 °C, 10 °C, 25 °C sıcaklıklarda cihazın doğruluk aralığında (<%5) sonuç verirken 40 °C'de %10,06'lık bir sapma göstermiştir. Bununla birlikte stretch naylon takviyede benzer eğilim göstermiştir ve 40 °C'de % 6,591 farklılık tespit edilmiştir. Bu sonuçlara karşın ince folyo takviye, 0 °C, 10 °C, 25 °C ve 40 °C'de sırasıyla % -7,106, % -4,353, % 3,753, % 3,766 farklılık göstermiştir. Aynı deney tekrarlandığında % -8,199, % -6,92, % 2,99, % 1,695 farklılık tespit edilmiştir. Buradan ince folyonun 25 °C sıcaklık altındaki 0 °C, 10 °C sıcaklıklarda yalıtım efektif ısı iletkenliğini azalttığı anlaşılmaktadır. Bu durumun takviyelerin emisivite değerleri ile ilişkili olduğu (folyonun 0,030-0,09, kağıdın 0,68-0,90 ve stretch naylonun 0,84-0,94 aralığında) görülebilir. Üçlü camyünü numunede ince alüminyum folyo, m²'de maliyeti % 12,64 arttırmıştır. Mevcut sıcak plaka tesisatında naylon takviyenin etkisi, ikili ve üçlü camyünü numuneler için Şekil 9 verilmiştir. Burada naylon takviyenin takviyesiz ikili ve üçlü numunelere göre etkilemediği görülebilir. Bu etkinin yanında sıcaklık farkının etkisi de bağıl olarak incelenebilir. Bunun için mevcut sıcak plaka tesisatında alt ve üst numunelerin sıcaklık farkları ele alınmıştır. Şekil 10'da ortalama sıcaklığa göre sıcaklık farkları arası ilişki verilmiştir. Aynı ortalama sıcaklıkta alt numunelerin (hem ikili hem de üçlü) sıcaklık farkının üst numuneye göre maksimum % 1,93 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Bu oran, ortalama sıcaklık azaldıkça % 0,5'e kadar düşmektedir. Bu farkın düşük çıkmasının nedeni, üst numunelerde gerçekleşen doğal taşınım olarak açıklanabilir. Bununla birlikte takviyesiz camyünü numunelerin de etkilendiği görülebilmektedir (Şekil 7 ve 8). Gözenekli camyünü yalıtım malzemesi aralarına koyulan takviyelerden ince folyo, naylon ve kağıdın doğal taşınımı engellediği buna karşın ince folyonun yansıtıcı özelliği nedeniyle farklılık gösterdiği anlaşılmıştır.



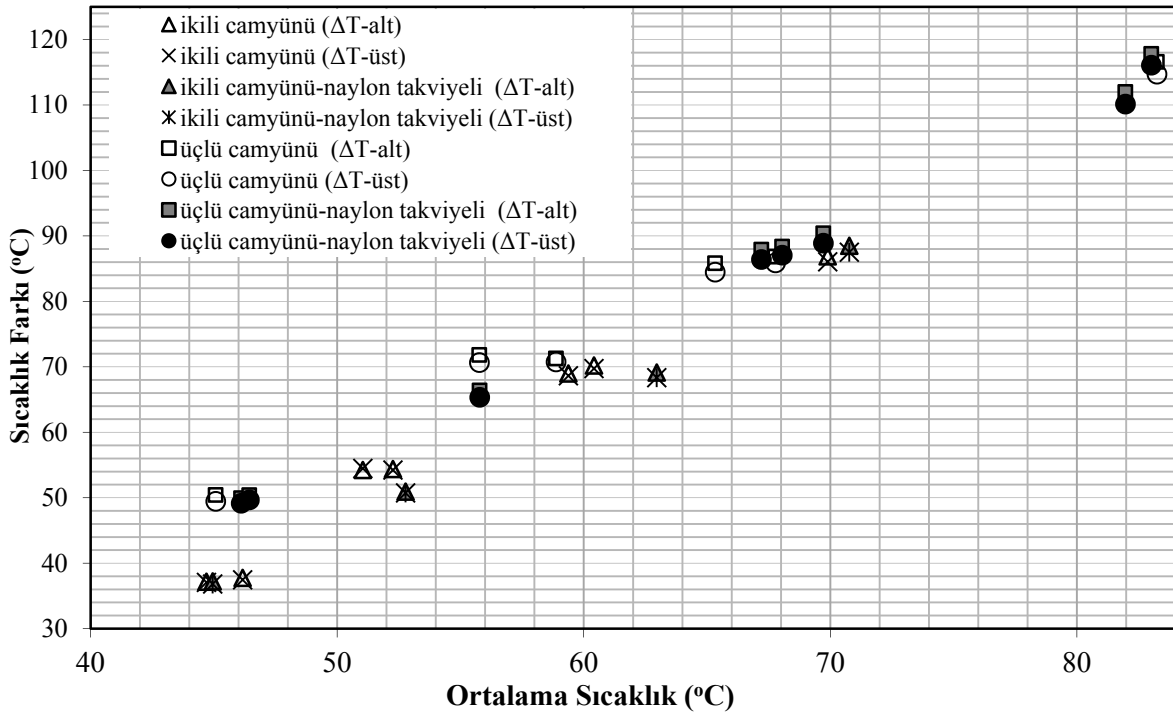
Şekil 8:

Üçlü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin takviyeye göre ortalama sıcaklıkla değişimi



Şekil 9:

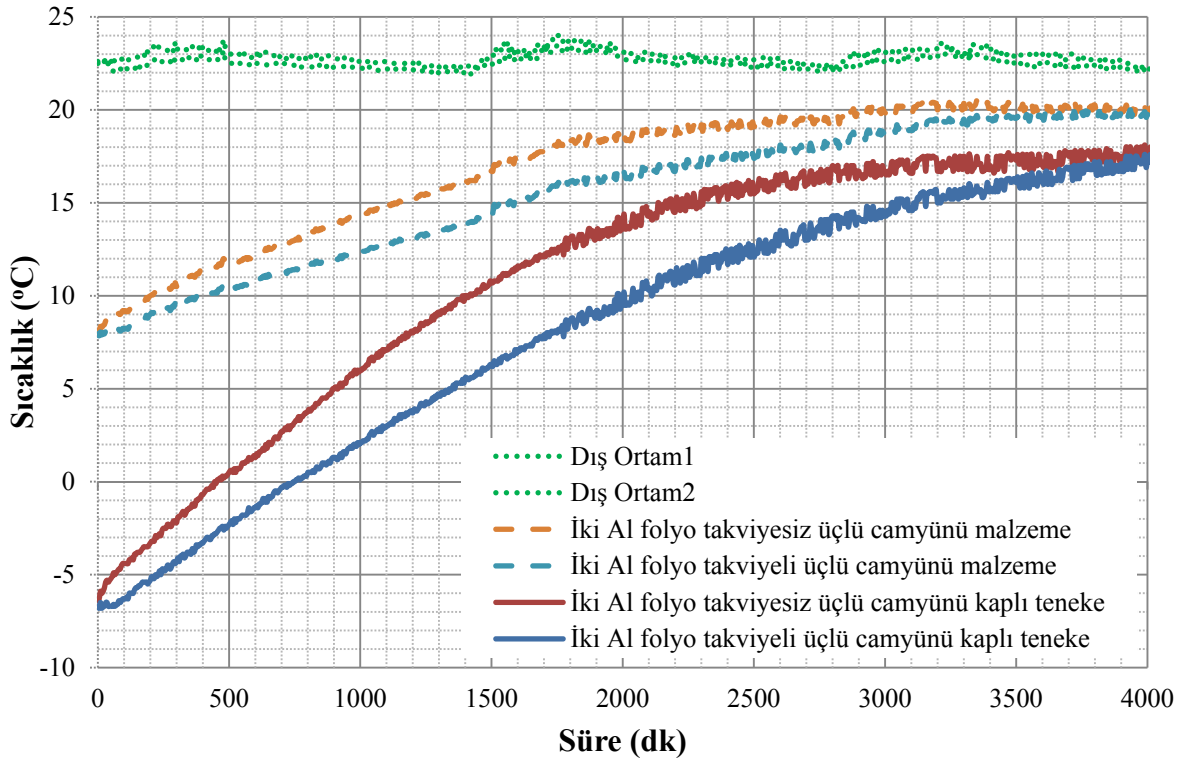
Takviyesiz ve takviyeli ikili, üçlü numunelerin efektif ısı iletkenliklerinin ortalama sıcaklıkla değişimi



Şekil 10:

Takviyesiz ve takviyeli ikili, üçlü numunelerin (hem alt hem de üst) sıcaklık farkının ortalama sıcaklığa bağlı değişimi

Çalışmanın son kısmı, alüminyum folyo takviyesiz ve takviyeli üçlü camyünü yalıtımlı depolarla yapılmıştır. Bunun için su depolarına takviyesizde $-6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve takviyelide $-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ başlangıç sıcaklıklarında su (%30 antifrizli) konulmuş ve bu depolar $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ çevre sıcaklığında tutulmuştur. Ortam ve su sıcaklıkları, antifrizli suyun ısınması sırasında 5 dakika da 1 ölçülmüştür. Bu sıcaklıkların zamanla değişimi ise, Şekil.11'de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, alüminyum folyo takviyeli yalıtımın sıcaklık değişimi daha yavaş iken takviyesiz olanın daha hızlıdır. Deneyde yalıtımın iç ve dış ortama göre ortalama sıcaklıkları değişmekte olup ortalama sıcaklık arttıkça iki depodaki sıcaklık değişim hızı birbirine yaklaşmaktadır. Örneğin $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktan $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa yükselmesi için gerekli süre takviyelide yaklaşık 1050 dak iken takviyesizde 750 dak'dır. Buna karşılık $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ den $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ çıkması için geçen süre yaklaşık 1150 dak ya karşı 945 dak olmaktadır. Isınma sürelerindeki azalma, birinci aralıkta % 28,57 oranında ikincide % 17,82 oranındadır. Bu sonuçlardan iç ve dış dirençler eşit alındığında efektif ısı iletim katsayılarının ciddi olarak sıcaklıkla azaldığı anlaşılmaktadır. Benzer durum standart ölçüm cihazında da elde edilmiştir (Yüksel, 2010; Yüksel ve ark., 2012). Bu deneyde elde edilen ısınma sürelerinin ve efektif ısı iletim katsayılarının ölçülen değerlerle karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir. Sonuçlardan alüminyum takviyenin efektif ısıl iletkenliğini azalttığı ısınma sürelerinden ve yapılan ölçümlerden ifade edilebilir. Benzer bir etki olarak $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ yüksek sıcaklıklarda altın, paslanmaz çelik gibi perdelerin çok tabakalı gözenekli malzemeler arasına yerleştirildiği numunelerde ışınlama efektif ısıl iletkenliğinin azaldığı bulunmuştur (Spinnler ve ark., 2004).



Şekil 11:

Alüminyum folyo takviyesiz ve takviyeli üçlü cam yünü numunelerin ortam sıcaklığında (antifrizli suyun) ısınması

Tablo 2. 6 °C ve 12,5 °C sıcaklıklarında alüminyum folyo takviyesiz ve takviyeli üçlü camyünü numunelerinde ısınma süreleri ve efektif ısı iletkenlikleri

Akışkan Kütlesi (kg)	5		
Numune Sıcaklığı (°C)	6	12.5	
Sıcaklık Aralığı (°C)	2 ÷ 10	9 ÷ 15	
Ortalama Sıcaklık Farkı (°C)	16,5	10,5	
Takviyesiz Numune	Süre (dk)	750	945
	k_e (W/mK)*	0,0299	0,0314
Takviyeli Numune	Süre (dk)	1050	1150
	k_e (W/mK)*	0,0286	0,0304
	k_e (W/mK)**	0,0154	0,0233

* standart ölçüm cihazında 10 °C sıcaklık farkı için ölçülen takviyesiz ve ince alüminyum folyo (1 µm) takviyeli numunelerin Şekil.8'deki efektif ısı iletkenlik değerleridir.

** standart ölçüm cihazında 10 °C sıcaklık farkı için ölçülen takviyesiz ve alüminyum folyo (0,1 mm) takviyeli numunelerin efektif ısı iletkenlik değerleri, Yüksel (2010) ve Yüksel ve ark. (2012) çalışmalarından alınmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, takviyesiz ve takviyeli camyünü numuneleri tasarlanarak efektif ısı iletkenlikleri farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık farklarında iki ölçüm cihazında ve uygulamalı tesisatta araştırılmıştır. Ayrıca sıcaklık farkları ele alınmış ve takviye cinsi açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma ile elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir;

- Gözenekli cam yünü numuneleri arasına yerleştirilen takviyelerden ince folyonun kağıt ve strech naylona göre efektif ısı iletkenliği 20 °C altındaki 0 °C ve 10 °C sıcaklıklarda azalttığı bulunmuştur. İnce folyo takviye, gözenekli yalıtım malzemenin efektif ısı iletkenliğini % 9 oranına kadar azaltmıştır.
- İnce alüminyum folyo takviyeli camyünü numunesinde, 5 °C, 10 °C ve 15 °C sıcaklık farklarının etkili olduğu ve bu etkinin numuneye, sıcaklığa bağlı değiştiği görülmüştür. 15 °C sıcaklık farkı, beşli camyünü numunede 20 °C altında etkili olmuştur. Ancak bu etki, üçlü camyünü numunede cihazın doğruluk sınırları (<%5) içerisinde bulunmuştur.
- Kağıt, strech naylon gibi düşük yansıtıcı malzemeleri kullanarak geliştirilen cam yünü yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenliği, takviyesiz camyünü sonuçlarıyla benzer bulunmuştur. Ancak aynı sıcaklık farkında kağıt takviye, 40 °C'de %10,06 farklılık göstermiştir.
- İnce alüminyum folyo takviyenin, yalıtım malzemesinin ısınma süresini arttırdığı görülmüştür. Uygulamalı deney düzeneğinde sıcaklık değişimine göre, takviyesiz üçlü camyününün ısınma süresi takviyeli numuneninkinden % 28,57 daha yavaştır.
- Mevcut sıcak plaka cihazından elde edilen sonuçlardan, numunelerin içerisinde doğal taşınımın etkisinin az olduğu görülmüştür. Bu sonuç, üst ve alt numunelerin sıcaklık farkları açısından da ele alınmıştır.

Bu sonuçlardan, yansıtıcı malzemenin ve ışınımının önemli artırıcı ve azaltıcı bir mekanizma olduğu ve standart davranışın dışında sıcaklığa bağlı etkiler oluşturabildiği anlaşılmıştır. Kullanım yerinde, sıcaklığın yanı sıra sıcaklık farkının azalması ve artması da dikkate alınmalıdır. Sonuçta, en iyi performansa ulaşılacak bir yalıtım malzemesi

tasarımında takviyenin etkili olabileceği ve enerji tasarrufu açısından önemli olabileceği düşünülmektedir. Endüstriyel kullanıcılar, bu malzemenin düşük efektif ısı iletkenlik özelliği nedeniyle etkin ve verimli cihazlar, malzemeler tasarlayabilir. Bilimsel açıdan ise, takviyenin, ışınım ile ilgili özelliklerin ve kavramların tasarımlarda ele alınması gereklidir. Böylece ülkemizin enerji ihtiyacının azaltılması, çevrenin korunması ve enerjide dışa bağımlılığın azaltılması gibi problemlerin çözümüne önemli katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma projesi birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No. M-2008/48).

KAYNAKLAR

1. 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.
2. Gupta, M., Yang, J. ve Roy, C. (2003) Predicting the effective thermal conductivity of polydispersed beds of softwood bark and softwood char, *Fuel*, 82, 395-404.
3. Hütter, E.S., Kömle, N.I. (2008) Determination of the radiative contribution to the effective thermal conductivity of a granular medium under vacuum conditions. *5th European Thermal-Sciences Conference*, Netherlands, pp 8.
4. Infrared Services Inc. (2010) Çeşitli malzemelerin emisivite değerleri. <http://www.infrared-thermography.com>.
5. Lambda-MessTechnik GmbH Dresden (2008) The thermal conductivity measurement process of guarded hot plate. <http://www.lambda-messtechnik.de/>.
6. Lim, T.K., Axcell, B.P. ve Cotton, M.A. (2007) Single-phase heat transfer in the high temperature multiple porous insulation, *Applied Thermal Engineering*, 27, 1352–1362.
7. Moffat, R.J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, 3 - 17.
8. Mohammadi, M. (1998) *Heat barrier properties of heterogeneous nonwoven materials*, PhD Thesis, North Carolina State University, p. 174.
9. Ochs, F., Heidemann, W. ve Müller-Steinhagen, H. (2008) Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 539–552.
10. Reiss H (1988) *Radiative transfer in nontransparent dispersed media*. Spri.-Verlag, Berlin.
11. Safavisoohi, B., Sharbati, E., Aghanajafi, C., Reza, S. ve Firoozabadi, K. (2009) Finite difference solution for radiative–conductive heat transfer of a semitransparent polycarbonate layer, *J. of Applied Polymer Science*, 112, 3313–3321.
12. Spinnler, M., Winter, E.R.F. ve Viskanta, R. (2004) Studies on high-temperature multilayer thermal insulations, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 47, 1305–1312.
13. Stark, C. ve Fricke, J. (1993) Improved heat-transfer models for fibrous insulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 617–625.
14. Tseng, C., Yamaguchi, M. ve Ohmorit, T. (1997) Thermal conductivity of polyurethane foams from room temperature to 20 K, *Cryogenics*, Cilt 37, 305-312.

15. Tseng, P. ve Chu, H. (2009) An Experimental study of the heat transfer in PS foam insulation, *Heat Mass Transfer*, 45, 399–406.
16. Weidenfeld, G., Weiss, Y. ve Kalman, H. (2004) A theoretical model for effective thermal conductivity (ETC) of particulate beds under compression, *Granular Matter*, 6, 121–129.
17. Wu, H., Fan, J. ve Du, N. (2007) Thermal energy transport within porous polymer materials: effects of fiber characteristics, *Journal of Applied Polymer Science*, 106, 576–583.
18. Wulf, R., Barth, G. ve Gross, U. (2007) Intercomparison of insulation thermal conductivities measured by various methods, *Inter. Journal of Thermophysics*, 28, 1679–1692.
19. Yuksel, N., Avcı, A., ve Kilic, M. (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.
20. Yuksel, N. ve Avcı, A. (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.
21. Yuksel, N., Avcı, A., ve Kilic, M. (2012) The effective thermal conductivity of insulation materials reinforced with aluminium foil at low temperatures , *Heat and Mass Transfer*, in press.
22. Yüksel, N. (2010) *Gözenekli yapılarda yapı ve işletme parametrelerinin ısı iletim katsayısına etkisinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
23. Zerroung, A., Zehar, K. ve Refoufi, L. (2007) “Thermal conductivity models of porous materials, *J. of Engineering and Applied Sciences*, 2 (4), 722-727.
24. Zhang, B., Zhao, S. ve He, X. (2008) Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 109, 1309–1324.
25. Zhao, S., Zhang, B. ve He, X. (2009) Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation, *Inter. Journal of Thermal Sciences*, 48, 440–448.

Makale 09.05.2012 tarihinde alınmış, 07.08.2012 tarihlerinde düzeltilmiş, 08.08.2012 tarihinde kabul edilmiştir.