



Beton Yapı Bileşenlerinin Isıl Yalıtım Özellikleri Yönünden İncelenmesi: Bir Derleme

Kemal KÖSEOĞLU^{1,*}, Onur ÜZÜM², Özge Andic ÇAKIR³

¹*Seramik, Cam ve Çinicilik Programı, Ege Meslek Yüksek Okulu, Ege Üniversitesi, 35100, İzmir, Türkiye*
²*Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, Ege Üniversitesi, 35100, İzmir, Türkiye*
³*Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, 35100, İzmir, Türkiye*

Başvuru: 19/11/2014 Kabul: 09/05/2015

ÖZET

1973'te yaşanan Petrol Krizi ile beraber doğal kaynakların kısıtlı olduğu anlaşılmış ve olabildiğince verimli kullanılması gerektiği gündeme gelmiştir. 1980'lerden itibaren ise küresel ısınmanın literatüre girmesiyle beraber "Enerji Etkinlik" günümüzde en gözde olan konulardan bir tanesi haline gelmiştir. Enerji harcamalarında binaların %32'lik gibi büyük bir paya sahip olması ise bina kabuğunun enerji etkin bir şekilde tasarlanması ihtiyacını doğurmaktadır. Bu açıdan ele alındığında en çok tüketilen yapı malzemesi olan betonun ısı geçirgenlik değerinin düzenlenmesinin binaların enerji etkin tasarımında anahtar rol oynadığı son derece açıktır. Bu nedenle, çalışma beton yapı bileşenlerinin ısı yalıtım yönünden incelenmesini konu edinmiştir.

Anahtar Kelimeler:

ABSTRACT

As one of the most important results of Oil Crisis in 1973 it has been understood that the natural sources are exhaustible and they ought to be consumed efficiently as much as possible. With discussion about Global Warming within the scope of scientific literature since 1980s "Energy Efficiency" became one of the most popular research topics until today. Since the buildings are responsible for 32% of total energy consumption energy efficient design of the building envelopes became more than an issue. As concrete is the most widely used construction material determining its thermal conductivity value by means of different techniques and experimental studies plays key role in energy efficient designing of buildings. Therefore, this study concerns with the evaluation of concrete building elements from thermal insulation viewpoint.

Keywords:

*Corresponding author, e-mail: kemalkoseoglu58@gmail.com, ozge.andic@ege.edu.tr

1. GENEL TANIMLAR

1.1. Beton

İngiliz Çimento Birliği'nin 1999 yılında yayınladığı raporda, 1985'te ilk beton kullanımının M.Ö. 7000'li yıllarda Taş Devri'nde Güney Galilee, Filistin'de keşfedildiğinden bahsedilmektedir [1]. İlk duvarcılık işleri ağır kayaların en uygun şekilde yerleştirildikten sonra boşlukların araya doldurulan toprağın tokmakla sıkıştırılmasıyla yapılmış olsa da, pişirilmiş alçının ilk kullanımı Mısır'ın erken dönemlerine denk gelmektedir. Bu malzemenin piramitlerin inşasında kullanıldığını görmek mümkündür. Daha sonraları Yunanlılar ve Romalılar kireçtaşı pişirerek sönmemiş kireç elde etmeyi başarmış, daha sonra ise bu kireci söndürerek harç yapımında kullanmışlardır. Yunanistan'ın Santorini Adası'ndan elde edilen volkanik tüf hala dünyanın çeşitli yerlerinde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Romalılar tarafından kullanılan en iyi malzeme Mt. Vesuvius yakınlarındaki Pozzuoli'den elde edilen tüf veya kül idi. Bu sebepten dolayı bağlayıcı özellikleri olan beton katkı malzemeleri günümüzde hala puzolan olarak adlandırılmaktadır. Romalılar tarafından üretilen çimento ise hidrolik çimentodur. Romadaki pek çok yapı bu malzeme kullanılarak inşa edilmiş olup, taş duvarlar bu malzemenin bağlayıcı olarak kullanıldığı sistemler ile örülmüştür. Konstantin Bazilikası taş ve kırılmış tuğla veya kiremitin agrega olarak kullanıldığı ilk örnektir [2, 3].

Orta Çağlar'da ise kaliteli harç üretimi neredeyse kaybolmaya yüz tutmuştur ve daha çok kalitesiz malzeme kullanımı yaygınlaşmıştır. 11. yüzyılda harç üretimi en düşük seviyesini görmüş ve bu tarihten itibaren gelişmeye başlamıştır, 14. yüzyıl ve sonrasında ise puzolanlar tekrar kullanılmaya başlamıştır [2, 3].

1824'de Leedsli duvarcı Joseph Aspdin Portland Çimentosu adını verdiği bir malzemenin patentini almıştır. Kireçtaşı ve kilin fırında yakılarak hidrolik bağlayıcılık özelliği olan bir malzeme üretilmesi için yöntem geliştiren kişi olarak anılmaktadır. İlk birkaç yıl boyunca çimento üretiminde çok büyük bir ilerleme kaydedilmemiştir. Aspdin'in firması tek seferde 16 ton klinker üretebilmekteydi ve üretimi birkaç gün sürmekteydi. 1850'lere gelindiğinde ise endüstri yalnızca İngiltere'de değil Almanya ve Belçika'da da yeteri kadar gelişmişti. Birleşik Devletler'e gemilerle çimento gönderimi ise 1868'de başlamış, 1895'te ise en tepe noktasına ulaşmıştır. Betonarme'nin ilk kullanımı ise 1875 yılında Birleşik Devletler'de olmuştur. 1918'e gelindiğinde ise Duff Abrams yaptığı gözlem ve çalışmaların sonucu beton kalitesinin direkt olarak su içeriği ile ilgili olduğu bildirmiştir [2, 3].

Günümüzde beton; çimento harcıyla, kırma taş/çakıl ve kum (agrega veya filler) karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Taze veya sertleşmiş halde belirli özellikleri olması için kimyasal ve mineral katkıların sıklıkla kullanıldığı kompozit bir malzemedir. Yapısal beton; elastik modül, mukavemet, tokluk, durabilite gibi pek çok avantajı dolayısıyla dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak bununla beraber, betonun düşük çekme dayanımı, düşük mukavemet/ağırlık oranı,

ortalama ısı yalıtım özellikleri, gevrekliği, hacim sabitliğinin düşük olması gibi kısıtlayıcı tarafları da bulunmaktadır [4, 5].

1.2. Enerji

Teknolojiyle beraber hızla gelişmeye devam eden çimento ve beton endüstrisi dünyanın ihtiyacına karşılık verebilmek adına çok yoğun bir şekilde üretime devam etmektedir. Bu yoğun talebin sonucu olarak, konfor ve ihtiyaçta beklenen artışın karşılanması için binaların teknik özellikleri de artan teknolojiye paralel olarak artış göstermektedir. Artan bu konfor, kaçınılmaz olarak öncelikle ihtiyaç eşliğini yükseltmekte ve buna bağlı olarak da enerji tüketiminin daha hızlı bir şekilde artmasını tetiklemektedir. Hızlı bir şekilde artan enerji ihtiyacının sonucu olarak ise hızla tükenen enerji kaynakları, doğal kaynaklar ve kaçınılmaz olarak doğal dengenin zarar görmesi enerjinin verimli kullanılmasını son yılların en önemli konularından biri haline getirmektedir. Enerjinin verimli kullanılmasını en temel haliyle düşünecek olursak, üretilen enerjiden maksimum fayda sağlanabilmesi için metod, teknoloji, proses ve malzeme geliştirilmesi konuları son derece büyük önem arz etmektedir.

1.3. Binalar ve Yalıtım

Enerji tüketimini kullanıldığı sektöre göre sınıflandıracak olursak, EIA'dan açıklanan verilere göre (U.S. Energy Information Administration) A.B.D.'de birincil enerji kaynaklarının %22'si konutlar, %19'u ise ticari binalar olmak üzere toplamda %41'lik bir kısmı tarafından tüketilmektedir. Bu enerjinin de %45 gibi yüksek bir bölümü ise hacimlerin ısıtılması ve %9'luk bir kısmı ise soğutulması için kullanılmaktadır. Bahsedilen veriler göz önünde bulundurulduğunda, bina kabuğunu oluşturan elemanların inşasında kullanılan çimento esaslı kompozitlerin ısı yalıtım özellikleri çok büyük önem arz etmektedir [6].

Sözcük anlamıyla yalıtım, üretilen ısı, ses, elektrik, nem vs yayılmasını engellemek amacıyla yapılan işlerin tümüne verilen isimdir. Detaylı bir şekilde tanımlanacak olursa, iletim, yayılım veya ışınım yoluyla ısı enerjisinin taşınmasını ısı iletim katsayısı vasıtasıyla geciktiren malzeme veya malzeme kombinasyonları bütünüdür [7]. Isı yalıtımı; enerji tüketimi ve dolayısıyla harcamalarını düşürmesinin yanı sıra, bina değerini arttırarak hem konforu dikkate değer ölçüde arttırır. Isı yalıtım çevre dostu bina kavramının ilk basamaklarından biri olması açısından da oldukça önemlidir.

1.4. Yalıtım Kavramı

Isıl iletkenlik (k, W/mK): 1 m kalınlığındaki bir malzemenin birim alanından izotermik düzlemlere dik bir şekilde olan sürekli ısı akışının (W) zaman hızı olarak tanımlanmıştır [8].

Isıl Geçirgenlik (C, W/K, W/°C): Bir malzemenin birim alanından geçen geçen ve yüzeyler arasından birim derece sıcaklık değişimine sebep olan sabit ısı akışının zaman hızı olarak tanımlanır.

Yayımlılık (E, birimsiz): Bir malzemenin yüzeyinin ışınım yoluyla enerji yayma kabiliyetine verilen addır ve genellikle ϵ veya e olarak gösterilir. Belirli bir malzemenin ışınım yolu ile yaydığı enerjinin, aynı sıcaklıkta kara cisim tarafından yayılan ışınımın oranını temsil eden değerdir.

Isıl Geçirgenlik Direnci (R, m²K/W): Malzemenin ısı akışına karşı gösterdiği dirençtir.

Isıl İletim (U, W/m²K): Bir malzeme dizisinin toplam geçirgenliği olarak tanımlanır.

Yalıtım ise aşağıda verilen fonksiyonların bir veya daha fazlasını gerçekleştiren, ısı enerjisi akışını geciktiren malzeme veya malzeme kombinasyonlarına verilen genel addır:

1. Isıl kaybı veya kazancını azaltarak enerji tasarrufu,
2. Kişisel koruma ve konfor amaçlı yüzey sıcaklığı kontrolü,
3. Proseslerin ısı kontrolünü kolaylaştırma,
4. Buhar akışını ve soğuk yüzeylerde yoğunlaşmayı engelleme,
5. Konut ve endüstriyel uygulamalardaki ısıtma/havalandırma/soğutma, sıhhi tesisat, buhar, proses ve güç sistemlerinin işletme verimliliklerini artırma,
6. Ateşe ve korozif etkenlere maruz kalan ekipmanın zarar görmesini engelleme/azaltma,
7. Gıda ve kozmetik tesislerindeki mekanik sitemlerin gerek ve yeter şartları sağlamasına yardımcı olma,
8. Atmosfere verilen çevreyi kirleten maddelerin emisyonlarını azaltma [9]

-75°C ile 815°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen uygulamalara ısı yalıtım adı verilirken alt sınırın altındaki uygulamalar kriyojenik, üst sınırının üstündeki sıcaklıklarda yapılan uygulamalar ise refraktör uygulamaları olarak tanımlanmaktadır [9].

Düzensiz bir şekilde yapılmış ısı yalıtımının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. İhtiyaç olan iklimlendirici boyutunu, dolayısıyla masrafını azaltır,
2. Yıllık enerji tüketimini dikkate değer ölçüde azaltır,
3. Dolaylı yoldan enerji kaynaklarının tüketiminin azalmasına olanak tanır,
4. Mekanik iklimlendirmeye ihtiyaç duymadan mevsim geçişlerinde termal konfor sağlar [10].

Yalıtım malzemelerinin üretim yöntemlerine göre çeşitleri ise şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Mineral fiber örtüler: örgü ve rulolar (cam lifi ve taş yünü),
2. Gevşek dolgu tipi yalıtım malzemeleri (cam lifi, taş yünü) veya betonla beraber dökülebilecek, karıştırılabilecek malzemeler (selüloz, perlit, vermikülit),
3. Rijit levhalar (polistiren, poliüretan, poliizosiyanürat ve cam lifi),
4. Yerinde köpüklenecek veya spreylenecek üretilenler (poliüretan ve poliizosiyanürat),
5. Levha veya bloklar (perlit ve vermikülit),
6. Yalıtılmış beton bloklar,
7. Yalıtılmış beton hacimler,
8. Yansıtıcı malzemeler (alüminyum folyo, seramik kaplamalar) [10].

Yalıtım yapılan hacimde en etkili yol, yalıtım malzemesini ısının giriş yapacağı/yaptığı tarafa daha yakın olacak şekilde yerleştirmekle mümkündür. Bir başka deyişle, kışın ısıtmanın baskın olduğu bölgelerde hacmin içine, yaz soğutmasının daha baskın olduğu bölgelerde ise hacmin dışına yapılması daha uygundur [10]. Ancak çimentolu bağlayıcı kompozitlerden üretilen yapı eleman ve/veya bileşenlerinin enerji etkin uygulamaları katkı sağlaması için farklı üretim metod, teknik veya yöntemlerinden söz edilebilir. Eleman veya bileşenin ısı yalıtımsal özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yöntemler:

1. Çeşitli katkı maddeleri ile direkt olarak malzemenin ısı iletim katsayısının düşürülmesi,
2. Yalıtım malzemeleri kullanarak eleman/bileşenin ısı köprüsü oluşurması veya ısı iletimine katkıda bulunmasının engellenmesi,
3. Çimentolu bağlayıcı elemanların yön, doğrultu ve konumunun ayarlanması suretiyle ısı enerjisinin alacağı yolun uzatılması/engellenmesi şeklinde sınıflandırılabilir [10- 18].

2. KARIŞIM MİKTARLARI VE MALZEMELERİNİN BETONUN ISIL İLETİM KATSAYISI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Beton elemanın yapısına giren agrega tipi, su/bağlayıcı oranı, mineral katkı kullanılması gibi kompozisyonunu değiştiren uygulamalarda malzeme farklı ısı iletkenlik değerleri gösterebilmektedir [19]. Ramirez vd. yaptıkları çalışmada Valore'nin, betonda kireçtaşı agrega yerine kuvarsit kullanılması durumunda ısı iletkenlik değerinin %50 artacağını bildirmesine atıfta bulunmuştur [19, 20]. Beton elemanlarda birkaç çeşit hafif agrega kullanılabilirle beraber, bu agregalar (a) doğal (pomza, diatomit, volkanik tüf vs.) ve (b) yapay (perlit, şist, genleştirilmiş kil vs.) olmak üzere ikiye ayrılabilir. Betonda hafif agrega kullanımının en önemli avantajlarından birisi ise genelde atık olan malzemelerin yeniden değerlendirilmesi adına son derece önemlidir [21, 22].

Giannakou ve Jones 2002'deki çalışmalarında %30 oranında Uçucu Kül içeren köpük betonlarda termal iletkenliğin %12-38 oranlarında düştüğünü rapor etmiştir [23]. Jones ve McCarthy ise köpük betonun 1000-1200 kg/m³ yoğunluk aralığında 0.23-0.42 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip olduklarını bildirmişlerdir [24]. Proshin vd. ise yaptıkları çalışmada gözenekli harcın polistiren tanecikleriyle bir araya getirildiğinde 200-650 kg/m³ yoğunluk aralığında, 0.06-0.16 W/mK ısı iletkenlik değerleriyle üretilebileceğini önermiştir [25].

Kumaran en çok kullanılan yapı ve yalıtım elemanlarının ısı ve nem özelliklerini incelediği araştırmada hava sürüklenmiş betonun, geleneksel ısı yalıtım malzemelerinden daha çok ısı iletmediğini ve yüksek miktarda enerjinin hareketi söz konusu olduğunda ise ölçümdeki belirsizlik oranının (uncertainty ratio) %2'den %5'e yükseldiğini bildirmiştir. Sıcak ve soğuk yüzeylerin sırasıyla 31.51°C ve 9.75°C olduğu ölçümde ısı iletkenlik katsayısının 0.121 W/mK, 11.45°C ve -2.44°C olduğu ölçümde ise 0.119 W/mK olduğunu bildirmiştir

[26]. Narayanan ve Ramamurthy yaptıkları çalışmada ise hava sürüklenmiş betonun ısı iletkenliğinin yoğunluk, nem içeriği ve malzeme bileşenlerine bağlı olduğunu bildirmiş olup gözenekler ne kadar küçükse ısı yalıtım özelliğinin o kadar iyileşeceğini belirtmiştir. Yine aynı çalışmada RILEM [27] raporlarından birine atıfla, artan kütlece her %1'lik nem içeriği artışının ısı iletimi %42 mertebelerine kadar arttırdığı ifade edilmiştir [14].

Demirboğa ve Gül çalışmalarında geliştirilmiş perlit ve pomza agregası, bağlayıcı olarak çimento ile ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun yalıtım özelliklerine etkileri üzerine deneyler yürütmüşlerdir. Hafif beton numune üretiminde hem geliştirilmiş perlit hem de pomza kullanılmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül ise %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. En yüksek ısı iletkenlik değeri olan 0,318 W/m²K pomza agregası ile elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu kül arttıkça ısı iletkenlik değerinin azalma eğilimi gösterdiği rapor edilmiştir. En düşük değer 0.1472 W/m²K ile geliştirilmiş perlit ve %30 uçucu kül içeren numunelerde gerçekleşmiştir. Pomza yerine, geliştirilmiş perlit kullanımı betonun ısı iletkenliğini %43,5 oranında azalmıştır [28]. Gandage vd. yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonda perlit agregası miktarına bağlı olarak malzemenin ısı iletkenliğini araştırmıştır. Çimentonun %20 oranında uçucu kül ile ikame edildiği gruba ilave olarak sırasıyla ince kum içeriğinin %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında perlit agregası ekleyerek deney seti oluşturmuştur. Yapılan deneylerde yalnızca çimento ve uçucu külden oluşan grup da dahil olmak üzere tüm kontrollü deney gruplarında perlit agregası artışıyla ısı iletkenliğin düştüğü rapor edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda alınan ölçümlerde ise, ölçüm sıcaklığı arttıkça ısı iletkenlik değerinin düştüğü bildirilmiştir [29].

Kodur ve Sultan yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklıklarda betonun ısı davranışlarını incelemiş olup değişen bileşen ve sıcaklıklardaki özelliklerini rapor etmiştir. Silis içerikli agrega kullanımında yüksek sıcaklıklarda, kalkerli agrega ile üretilen numunelere kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik elde ettiklerini raporlamıştır [30]. Bu durumu Lie'nin 1993'teki çalışmasında, artan kristalinitenin ısı iletimi arttırdığı bulgusu ile açıklamıştır [31].

Saygılı ve Baykal ise yaptıkları çalışmada uçucu kül içeren harç numunelerin toplam su içeriklerinin %10, 20 ve 30'u oranlarında kar (veya kırılmış buz) ekleyerek ısı iletkenlikleri ölçülmüş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Kar eklenen numunelerin ısı iletkenliklerinde %13.6-22.4 aralığında bir düşüş rapor etmiştir [12]. Demirboğa, 2007'deki kapsamlı çalışmasında silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bu mineral katkıların ikili kombinasyonlarını kapsayan beton özelliklerini araştırmış ısı iletkenliğin en düşük olduğu grubun çimento yerine %30 oranında uçucu kül içeren grup olduğunu bildirmiştir. Mineral katkı içeren tüm grupların ısı iletkenlik değerlerinde ise sadece çimento içeren kontrol numunelerine göre düşüş gözlemlendiği ifade edilmiştir [32]. Wang vd.'nin %60, 70 ve 80 oranlarında arıtma çamuru külünün çimento ile ikamesiyle ürettiği hafif harç elemanların ısı iletkenliklerinin 0.0763 ile 0.2474 W/mK arasında

değiştirdiği gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada yalnızca arıtma çamuru külü ile üretilen elemanların ısı iletkenlik değeri olan 0.2945 W/mK'nin yalnızca çimento ile üretilen elemanların ısı iletkenliği 0.5667 W/mK'den daha düşük olduğu bildirilmiştir [33].

Aldridge ve Ansell yaptıkları çalışmada, 1000 kg/m³ birim hacim ağırlıktaki köpük betonun çimento-kum karışımı bir harcın 1/6'sı ısı iletkenliğe sahip olduğunu bildirmiştir [13]. Taylor yaptığı çalışmada, tuğla duvarın iç kısmının 800 kg/m³ yoğunluğunda köpük beton ile kaplanması durumunda ısı yalıtımının %23'e kadar iyileştirilebildiğini rapor etmiştir [34]. Betonun ısı iletim katsayısının birim hacim ağırlığıyla bir şekilde ters orantılı olduğu bilinmektedir. Weigler ve Karl ise beton yoğunluğunun 100 kg/m³'ler mertebesine düşmesiyle ısı iletim katsayısının da 0.04 W/m²K değerlerine düştüğünü bildirir [35].

Al Jabri vd yaptıkları çalışmada, beton elemanları oluşturan bileşenlerin; karışım oranlarındaki değişim, kimyasal veya mineral katkı ikamesi vb işlemlerle ısı iletkenliklerindeki değişimleri test etmek yerine, delikli ve dolu halde üretilen beton elemanların boşluk dizilişlerini değiştirmek suretiyle bir çalışma gerçekleştirmiştir. Her bir beton elemandaki delik sırasının tek bir dizi oluşturmadan, atlamalı olarak yerleştirildiği kombinasyonda beton bloklar boyunca enerjinin kat edeceği yol bu boşluklarla kesintiye uğrayacağından daha az ısı iletkenlik değerine sahip olduğunu bildirmiştir. Bu şekilde atlamalı şekilde yerleştirilen blokların ısı yalıtım açısından, delikleri sıralı olarak yerleştirilenlere göre 1,5 ile 2,6 ve tamamen dolu olan bloklardan ise 2,1 ile 3,4 kat daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Aynı çalışmada delikleri atlamalı olarak üretilen beton elemanların ısı iletim katsayılarının 0,57 - 0,68 W/mK arasında, delikleri sıralı olarak üretilen beton elemanların ısı iletim katsayılarının 0,87 - 0,92 W/mK arasında, tamamen dolu beton elemanların ısı iletim katsayılarının ise 1,2 W/mK değerlerinde olduğu rapor edilmiştir [11].

3. YENİ NESİL MALZEMELERİN BETONUN ISI YALITIMINDA KULLANIMI

Isı yalıtımı yalnızca, hacmi ısıtma/soğutma amacıyla gereksinim duyulan enerjiyi azaltma yöntemiyle verimlilik sağlayan bir yöntem olarak düşünülmemelidir. Elemanların ısı iletim katsayılarını azaltma yöntemine ek olarak akıllı malzemeler sınıfına girebilecek olan Faz Değişim Malzemeleri (Phase Change Materials-PCM) kullanılmasıyla yapı elemanlarında ısının depolanması da bir başka yöntem olarak düşünülebilir. Gün içinde FDM'nin erimesi sırasında fazladan ısı enerjisi depolanırken, akşamları daha serin saatlerde FDM katılaşmaya başlarken de depolanmış ısı ortama geri kazandırılır. Bunun sonucunda, FDM içeren betonlar insanlara daha iyi bir ısı konforu sağlanabilecek ortamların yaratılmasında yardımcı olabilecek malzemelerdir [36].

Regin vd. çalışmasında Faz Değişim Malzemelerini, maddenin faz değişimi esnasında ihtiyaç duyulan veya salınan çok yüksek miktarlardaki ısı enerjisini depolama kabiliyeti olan malzemeler olarak tanımlamıştır

[37]. Belli bir sıcaklıkta fiziksel fazlarını değiştiren bu malzemeler, ısıtma sırasında kullanılan enerjiyi absorbe eder ve soğuma esnasında da ortama geri verirler. Böylece ısı enerjisinin depolanması gerçekleşmiş olur [38]. Piyasada organik bileşikler (parafinler, hidrat tuzları, poliglükol, dimetil sülfoksit, naftalin, vb), yağ asidi türevleri faz değişim malzemeleri olarak kullanılabilir [39].

Eddhahak-Ouni vd. beton elemanların ısı özelliklerini inceledikleri çalışmada, toplam numune hacminin %1, 3, ve 5'i oranlarında FDM kullanılmışlar ısı iletim katsayılarında dikkate değer bir değişim yakalayamazken numunelerin termal depolama kapasitelerinin 17.06 kJ/kg'den 36.64 kJ/kg değerine arttığını rapor etmişlerdir. Isıl iletim katsayıları etkilenmesi dahi, ısı akışının gerçekleştiği malzemede ısıyı depolayabilme özelliği de yalıtım anlamında son derece dikkate değer bir husus olarak göze çarpmaktadır [40]. J. Shi vd. yaptıkları çalışmada karışımlara hacimce %0, %10, %30 ve %45 oranlarında sıvı halde bulunan parafini ekledikleri beton numunelerde ısı özellikleri incelemiştir. Matris fazında %0 ve %1 oranlarında bazalt lifi kullanarak ise iyileştirilmiş elastik modül ve mukavemette numune üretmeyi amaçlamıştır. Bazalt lifi ve parafinin hacimce yüzdeleri arttıkça ısıl iletkenliklerinde azalma olduğunu rapor etmiştir. Hacimce %0'dan %45'e artan parafinin ısıl iletkenliği 0.921 W/m°C'dan 0.5082 W/m°C'a düşürdüğü, %1 oranında bazalt lifi eklenmesinin ise 0.4258 W/m°C'a düşürdüğü bildirilmiştir. 30°C ve 75°C sıcaklıklarda alınan ölçümlerde ise, yüksek sıcaklıkta ısıl iletkenlik değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. 53-61°C arasında erime sıcaklığına sahip olan parafinin sıvı hali katı haline göre ısıl anlamda daha az iletkenidir. 75°C'taki ısıl iletkenlik değerlerinin 30°C'a kıyasla daha düşük olmasının sebebi bu durumdan kaynaklanabileceği ifade edilmiştir [41].

X. Shi vd. yaptıkları çalışmada makro boyutlarda FDM kullanılan beton elemanların iç mekan konforuna olan etkisini incelemiştir. 545 x 545 x 560 mm boyutlarında model hacimler üretilmiş, paslanmaz çelik içine hapsedilmiş FDM küreleri beton elemanlara üç farklı şekilde uygulanmıştır. Bir seride FDM içeren paslanmaz çelik kutular, duvarların dışına sabitlenmiş, birinde iki beton eleman arasında yerleştirilmiş ve diğerinde ise içeriden sabitlenmiştir. Toplam beton kalınlığı tüm numunelerde eşit olup 40 mm'dir. İki beton arasına yerleştirildiği durumda ise yirmişer milimetre içeride ve dışarıda olmak üzere sandviç panel şeklinde uygulanmıştır. Model hacimlerin çatıları ahşap ve ısı yalıtım malzemesi uygulanması ile özdeş olarak üretilmiştir. Taban ise hepsinde 20 mm beton örtü olarak seçilmiştir. Çalışmada FDM makrokapsülleri uygulaması olmayan hacimlerin günlük sıcaklık değişimlerinde dikkate değer ölçüde daha fazla dalgalı değişim gösterdiklerini ve hacim sıcaklığının ortam sıcaklığından 4°C daha sıcak olduğunu bildirmiştir. Öte yandan, FDM'nin hacmin iç kısmından uygulanması durumunda ise ortamdaki bağıl nemi %16 azalttığını rapor etmiştir. Ortam sıcaklığının Güneş'in konumu ve saatle değiştiği düşünülecek olursa FDM uygulanmış duvarların olduğu odalardaki sıcaklık değişimleri kontrol numunelerine kıyasla bu değişimlere daha yavaş ve kademeli bir şekilde uyum sağlamış gündüzleri sıcaklığın çok artmasını engellerken, geceleri de ortamın kontrol

numunelerine göre daha sıcak olmasına olanak tanımıştır [42].

Cabeza vd. yürüttüğü çalışma ise benzer şekilde model hacimler üzerinde FDM uygulanmış ancak bu çalışmada FDMler mikrokapsüller şeklinde beton karışımına dahil olacak şekilde düzenlenmiştir. Benzer sonuçların alındığı çalışma, FDM kullanılmasının ısı depolamanın yanı sıra belli bir ölçüde yalıtımın da sağlandığını vurgulamaktadır. FDM içerikli beton duvarların olduğu hacimlerde yine aynı şekilde gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkı daha yumuşak geçişlerle sağlanmış ve aradaki fark daha küçük mertebelerde kaldığı rapor edilmiştir. Hem makrokapsül hem de mikrokapsül uygulamalarının dezavantajlarının bulunduğu da vurgulandığı çalışmada, mikrokapsül uygulamasının pratikte daha kolay olduğu belirtilmiştir [43]. FDM performansı; yapının konumlandırılma şekli, kullanım amacı, içinde bulunduğu iklim, kullanılan malzemelerin türü ve miktarı gibi pek çok değişkene bağlıdır. Buna bağlı olarak seçilecek tip, kullanım şekli ve dozu önem arz etmektedir [44]. FDM direkt olarak karışıma eklenebileceği gibi, sıvısına daldırılan yapı malzemesinin boşluklarına doldurmak suretiyle de uygulanabilir. Mikro ve makro kapsül uygulamalarıyla elemana entegre olabileceği gibi şekli belirlenmiş cisimler şeklinde veya eleman içine yerleştirmeyi mümkün kılan bir muhafaza ile de yerleştirilebilir [45].

Beton karışımlarında agrega ile ikame etmek suretiyle kullanılan bir başka malzeme türü ise aerojellerdir. İlk kez 1864 yılında T. Graham'ın silis jelindeki suyun bir başka sıvıyla yer değiştirilebileceğini bildirmesinin ardından 1931 yılından Kistler'in silis jelindeki suyun hava ile yer değiştirmesiyle üretilmiştir [46, 47]. Aerojeller üretim tekniklerine bağlı olarak 0.0131 ile 0.0136 W/mK ısıl iletkenlik değerine sahip olan özel malzemelerdir [48]. Değerlerin ne kadar küçük olduğunun bir göstergesi olarak, piyasada kullanılan üstün nitelikli yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik değerlerinin yaklaşık olarak 0.030-0.40 arasında değiştiğini göz önünde bulundurmak gerekir [49]. Gao vd. 2014 yılında yaptıkları çalışmada hafif betonda kullanılan agrega ile ikame ettikleri aerogeli hacimce %60 (ağırlıkça %9.07) oranlarına kadar artırarak 0.26 W/mK ısıl iletkenlik değeri elde etmiştir. Çalışmadaki kontrol grubu hafif beton karışımının ısıl iletkenliği 1.86 W/mK ölçülmüş olup aerogel kullanımı ile ısıl performansta ısıl iletkenlik bakımından %86 gibi bir iyileşme bildirilmiştir [50]. Kim vd. yaptıkları çalışmada çimento ağırlıkça %0.5-2.0 oranlarında aerogel içeren beton numunelerde %75'lere kadar ısıl iletkenlik performansında iyileşme olduğunu bildirmiştir [51].

4. KATI ATIKLARIN BETONDA YALITIM MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Sayırsız endüstri alanında üretilen malzemelerin bazıları, kimyasal ve fiziksel geçmişleri, kimyasal yapı ve özellikleri, yüksek geri dönüşüm masrafları veya zahmetli geri dönüşüm prosesleri dolayısıyla geri dönüşüme müsait olmayabilirler. Bu sebepten ötürü, bu tür malzemelerin tekrar kullanımı malzemelerin tekrar değerlendirilmesi adına bir çözüm olabilmektedir. Çevresel etkinin yanı sıra, tekrar kullanılan atık

malzemeler ile elemanın üretim maliyetinin de düşürülebileceği göz önünde bulundurulması gereken bir gerçektir. Beton neredeyse tüm atık malzemelerin tekrar kullanımı amacıyla ortam yaratabilme potansiyeli ile pek çok çalışmaya konu olmuş bir malzemedir.

Betondan bağımsız olarak, atık malzemelerin tekrar kullanımı yeniden üretilen malzemelere katkı maddesi olarak veya ana malzemelerle ikame edilmesi yoluyla gerçekleşir. Malzemelerin beton içinde yeniden kullanılması ise elemanların yalnızca daha ucuz ve hafif üretilmesine ilişkin bir konu değildir. Bir başka önemli sonuç ise, Dünya'nın her yerinde ciddi bir sorun olan atık yönetimi hususunda da çözüm yolu sunmasıdır. Atıkların, beton gibi çok yüksek miktarlarda üretilen ve kullanılan malzemelerin üretiminde değerlendirilmesi, normalde bu atıkların tekrar kullanılabilmesi için gerekli olan geniş alanın yaratılması için ek zaman ve bütçe ayrılmasına da çözüm olabilecek niteliktedir.

Birleşik Devletler'deki en önemli sıkıntılardan bir tanesi de, katı atık yönetimidir. Birleşik Devletler'de her yıl 5 milyar ton zararsız katı atık üretilmektedir [52]. Kauçuk Üreticileri Derneği'nin 2000 yılında açıkladığı verilere göre Birleşik Devletler'de 270 milyon adetten fazla lastik üretilmekte, 300 milyon adeti ise atık olarak depolanmış vaziyette bulunmaktadır. Bu atıkların kauçuk ve plastik malzeme üretiminde, elektrik üretiminde, çimento üretimindeki döner fırınlara yakıt olarak kullanılması ve asfalt betonu üretilmesi alanında çalışmalara konu olmaktadır [53].

Yeşilata vd. yaptıkları çalışmada beton numunelere atık PET (Polietilen Tereftalat) ve kauçuk eklemek suretiyle elemanların ısı geçirgenliklerini incelemiştir. Farklı şekil ve boyutlarda beton numunelere henüz plastik haldeyken karıştırılan pet şişe parçaları %10.27 ile %18.16 oranında, yuvarlak kauçuk parçaları ise %18.52'ye kadar numunelerin ısı performanslarını iyileştirdikleri bildirilmiştir [15]. Dweik vd. %0, 20, 40 ve 60 oranlarında termoset bir polimer olan melamin formaldehitin (MF) kum ile ikamesi ile yürüttükleri bir çalışmada %30 oranlarında MF ile ikame edilen kum içeren numunelerin ısı yalıtım özelliklerinde %15'lere kadar iyileşme gördüklerini bildirmişlerdir [54]. Ramirez vd., arasına hindistan cevizi lifleri doldurulan ferroçimento sandviç panellerin ısı iletkenliklerinin 0.221 W/mK gibi bir değeri yakalayarak hafif beton tuğla (0.683 W/mK) ve boşluklu beton blok (0.93 W/mK) gibi çok kullanılan malzemelerin ısı iletkenliklerinden daha başarılı sonuçlar doğurduğunu ifade etmiştir [16]. Olmeda vd. farklı dane büyüklüğünde ve yüzdelerde agrega ile ikame ettikleri pet koku atıklarının malzemenin ısı iletkenliğini %76'lara kadar oranlarda düşürerek 0.12 W/mK değerlerine erişilebildiğini bildirmiştir. Bahsedilen en yüksek düşüşün ise %75 oranında kaba agrega ikamesiyle mümkün olduğunu ifade etmiştir [55].

5. SONUÇ

İncelenen çalışmaların sonuçlarına genel anlamda bakıldığında, çalışmaların neredeyse hiçbirinde bir malzemeyi ısı yalıtım malzemesi olarak adlandırabilmek için gerekli olan 0.06 W/mK değeri yakalanamasa da beton gibi ısı yalıtım açısından zayıf malzemelerin

yaklaştığı ısı iletim katsayıları değerleri oldukça dikkat çekicidir. Binaların çevre dostu olabilmeleri için gerekli en önemli özelliklerden biri olan enerji tüketimlerinin azaltılması anlamında bu çalışmalar son derece büyük önem arz etmektedir. Yukarıda detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere bazı düzenlemelerle tek başına ısı yalıtım özelliği gösteremese de çok sayıda çalışma ile bu halde bile gelinecek aşamalar son derece umut vericidir. Literatürdeki çalışmalarda, kontrol numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları kullanılan çimento dozajı, agrega, mineral katkılarına bağlı olarak 0.3 ile 2.9 W/mK değerleri arasında değişmektedir. Polietilen Tereftalat, Melamin Formaldehit gibi polimer esaslı atıkların kullanımıyla birlikte bu iletkenlik değerleri sırasıyla %18.52 ve %15'e kadar iyileşme göstermektedir. Poroz agregalarla birlikte mineral katkı kullanımının söz konusu olduğu çalışmalarda 0.1472 W/mK iletkenlik değeri perlit ve uçucu külün birlikte kullanımı ile mümkün olmuştur. Isı yalıtım malzemelerinin iletkenlik mertebelerinin yakalandığı çalışmalar ise betonun kimyasal yapısında değişim yapmaktansa, daha çok betonun birim hacim ağırlığının değiştirilmesi ile mümkün olmuştur. 200 kg/m³ değerlerinde 0.06 W/mK olan iletkenlik değeri, 100 kg/m³ mertebelerinde ise 0.04 W/mK'e kadar düşmüştür. Bu durumda betonun taşıyıcılığın ziyade yalıtımsal özellikleri ön plana çıkmaktadır. Beton tuğlaların içindeki deliklerin tuğla sıralanması göz önünde bulundurularak yerleştirilme şekillerine göre değişim ise 1,2 W/mK'den 0.57-0.68 W/mK mertebelerine düşmesine olanak tanımaktadır.

Tüm bu sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, üretilen yeni malzemenin bir başka atık tipi oluşturacağı göz önünde bulundurularak mümkün mertebe atık fazlası olan malzemelerin betonda değerlendirilmesi hususuna dikkat edilmelidir. Hali hazırda, yoğun bir şekilde polimer ve seramik atıklarının üretildiği günümüzde endüstrisinde ısı yalıtım açısından kıymetli bu malzemelerin betonda yeniden kullanımı ileri çalışmalar için oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Beton elemanların kullanıldığı bölgelerde coğrafi ve iklimsel şartlar da göz önüne alınmalı, yalnızca fiziksel ve kimyasal yapı değiştirmekle kalmayıp en uygun tasarım da bu şartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmelidir.

Gelişen teknolojinin bir sonucu olarak genişleyen sektörlerin en ciddi problemlerinden biri de yeni ürünlerle beraber üretilen yeni ve artan miktardaki atıklardır. Atıkların değerlendirilmesi ile birlikte şu an yüksek maliyetlerle üretilen malzemelerin ileride daha üstün özelliklerle daha düşük maliyetlere üretilmesi mümkün olması geleneksel ürünlere alternatif oluşturmasını da beraber getirebilecek bir durumdur.

REFERENCES

- [1] British Cement Association (1999). Concrete through the Ages from 7000 BC to AD 2000. Birleşik Krallık: BCA. p. 37.
- [2] Neville A.M., Brooks J.J. (2010). Concrete Technology 2nd Ed., Harlow: Pearson Ed. Ltd.

- [3] International Code Council (2006). Concrete Manual: Concrete Quality and Field Practices 1st Ed., (Cengage Learning), ss.3.
- [4] Newman, J., Choo B.S. (2003). Advanced Concrete Technology – Concrete Properties, ElsevierLtd.
- [5] Mehta, P.K. (1986). Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice Hall Inc. ss. 1-16.
- [6] Buildings Energy Databook (Online, 10.05.2014), <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov>
- [7] American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers-ASHRAE (2001). Handbook of Fundamentals. Atlanta, ABD.
- [8] ASTM Standard C 168-97 (1997). Terminology relating to thermal insulating materials, 1997.
- [9] Thermal Insulation Association of Canada (2013). Mechanical Insulation Best Practices Guide (Online, Access: 15.06.2014)
- [10] http://www.tiac.ca/downloads/best-practices-guide/BestPracticesGuide_E.pdf
- [11] Al-Homoud, M.S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. Building and Environment 40 ss. 353–366.
- [12] Al-Jabri K.S., Hago A.W., Al-Nuaimi A.S., Al-Saidy A.H. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. Cement and Concrete Research Vol. 35, Iss. 8, ss. 1472-1479
- [13] Saygılı A., Baykal G.(2011). A new method for improving the thermal insulation properties of fly ash Energy and Buildings Volume 43, Issue 11 ss. 3236–3242.
- [14] Aldridge D., Ansell T. (2001). Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential. Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments.
- [15] Narayanan K., Ramamurthy K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: A review, Cement and Concrete Composites, Volume 22, Issue 5 ss. 321–329.
- [16] Yeşilata B., Işiker Y., Turgut P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials 23 ss. 1878–1882.
- [17] Alavez-Ramirez R., Chiñas-Castillo F., Morales-Dominguez V.J., Ortiz-Guzman M. (2012). Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. Construction and Building Materials, Volume 37 ss. 425–431.
- [18] Friess W.A., Rakhshan K., Hendawi T.A., Tajerzadeh S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. Energy and Buildings Vol. 44 ss. 26–32.
- [19] Melo M.O. B. C., Bueno da Silva L., Coutinho A. S., Sousa V., Perazzo N. (2012). Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil. Energy and Buildings Vol. 47 ss. 35–43.
- [20] Ramírez F.M.D., Muñoz F.B. , López E., Agustín Valcarce Polanco A.V. (2013). Thermal evaluation of structural concretes for construction of biodigesters. Energy and Buildings Volume 58 ss. 310–318.
- [21] Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, Redacción: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA, Archivo: CAT-EC-v5.0(MAYO08).doc, 2008.
- [22] http://www.codigotecnico.org/web/galerias/archivos/CAT-EC-v05.0_MAYO08.pdf
- [23] Tanyıldızı H, Coşkun A. (2008). The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. Construct Build Mater 22 ss. 2269–75.
- [24] Demirdağ S, Gündüz L. (2008). Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. Construct Build Mater 22 ss. 135–42.
- [25] Giannakou A., Jones M.R. (2002). Potentials of foamed concrete to enhance the thermal performance of low rise dwellings (R.K. Dhir, P.C. Hewelett, L.J. Csetenyi Eds.) Innovations and development in concrete materials and construction. Birleşik Krallık: Thomas Telford ss. 533–544.
- [26] Jones M.R., McCarthy A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density. Cem Concr Res, 36 (6) ss. 1032–1041.
- [27] Proshin A., Beregovoi V.A., Beregovoi A.M., Eremkin I. A. (2005). Unautoclaved foam concrete and its constructions, adapted to the regional conditions Use of foamed concrete in construction (R.K. Dhir, M.D. Newlands, A. McCarthy Eds.). Londra: Thomas Telford, ss. 113–120.
- [28] Kumaran M. K. (2006). A Thermal and Moisture Property Database for Common Building and Insulation Materials. ASHRAE Transactions Volume 112, Part 2.
- [29] Rilem Technical Committees (1993). Recommended practice: Autoclaved aerated concrete – Properties,

- testing and design. Londra ve New York: E&FN SPON.
- [30] Demirboğa R., Gül R. (2003). The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cem. Concr. Res.*, 33 ss. 723–727.
- [31] Gandage A.S., Rao V.R.V., Sivakumar M. V. N., . Vasan A., Venu M., Yaswanth A.B. (2013) Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self Compacting Concrete, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104, , ss. 188 – 197.
- [32] Kodur V.K.R., Sultan M.A. (2003). Effect of temperature on thermal properties of high strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 2 ss. 101-107.
- [33] Lie T.T., Editor (1993). *Structural Fire Protection: Manual of Practice*. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, No. 78 ss. 241.
- [34] Demirboğa R.(2007). Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. *Building and Environment* Volume 42, Issue 7 ss. 2467–2471.
- [35] Wang K.S., Tseng, C.J., Chiou I.J., Shih M.H.(2005). The thermal conductivity mechanism of sewage sludge ash lightweight materials. *Cement and Concrete Research* Volume 35, Issue 4 ss. 803–809.
- [36] Taylor, W.H. (1969). *Concrete technology and practice*. Londra: Angus and Robertson.
- [37] Weigler H., Karl S. (1980). Structural lightweight aggregate concrete with reduced density – lightweight aggregate foamed concrete *International Journal of Lightweight Concr*, 2 ss. 101–104.
- [38] Ling T.C., Poon C.S.(2013). Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. *Construction and Building Materials* Volume 46 ss. 55–62.
- [39] Regin A.F., Solanki S.C., Saini J.S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renew Sust Energy Rev*, 12 ss. 2438–2458.
- [40] Mondal S. (2008). Phase Change Materials for smart textiles – An overview. *Applied Thermal Engineering* Volume 28, Issues 11–12 ss. 1536–1550.
- [41] Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* Volume 23, Issue 3 ss. 251–283.
- [42] Eddhahak-Ouni A., Drissi S., Colin J., Neji J., Care S. (2014). Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs). *Applied Thermal Engineering* Volume 64, Issues 1–2 s. 32–39.
- [43] Shi J., Chen Z., Shao S., Zheng J. (2014) Experimental and numerical study on effective thermal conductivity of novel form-stable basalt fiber composite concrete with PCMs for thermal storage. *Applied Thermal Engineering* Volume 66, Issues 1–2, ss. 156–161.
- [44] Shi X, Memon S.A., Tang W., Cui H., Xing F. (2014). Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. *Energy and Buildings* Volume 71 ss. 80–87.
- [45] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castellon, Miquel Nogués, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2007) 113–119.
- [46] Edwin Rodriguez-Ubinas , Letzai Ruiz-Valero,, Sergio Vega,, Javier Neila, Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses, *Energy and Buildings* Volume 50, July 2012, Pages 49–62.
- [47] D. Zhou, C.Y. Zhao Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* Volume 92, April 2012, Pages 593–605.
- [48] T. Graham, *J. Chem. Soc.* 12, 318 (1864).
- [49] Kistler SS (1932) Coherent expanded aerogels. *J Phys Chem* 36:52–64.
- [50] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings* 43 (2011) 761–769.
- [51] Aegerter M.A., Leventis N., Koebel M.M. (eds), *Aerogels Handbook*, Series: Sol-Gel Derived Materials (1st Ed.), Springer, New York, (2011).
- [52] Tao Gao, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Stefan Jacobsen, Aerogel-incorporated concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials*, Volume 52, 15 February 2014, Pages 130–136.
- [53] Kim S., Seo J., Cha J., Kim S., Chemical Retreating for gel-typed Aerogel and Insulation Performance of Cement Containing Aerogel, *Construction and Building Materials* 40 (2013). Pp: 501–505.
- [54] Siddique R., Naik T.R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste Management* 24 ss. 563–569.

- [55] Rubber Manufacturer_s Association, (2000), Washington, DC.
- [56] Online: <http://www.rma.org/publications/scrap-tire-publications/> (07.07.2014)
- [57] Dweik H.S., Ziara M. M., Hadidoun M.S. (2008). Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste. *International Journal of Polymeric Materials*, 57, ss. 635–656.
- [58] Olmeda J., Sánchez de Rojas M.I., Frías M., Donatello S., Cheeseman C.R. (2013). Effect of petroleum (pet) coke addition on the density and thermal conductivity of cement pastes and mortars. *Fuel* Volume 107 ss. 138–146.