

Isıl Enerji Depolama Amaçlı Yapıca Kararlı Yeni Bir Faz Değişim Malzemesi Olarak Silikafume/Laurik Asit (LA) Kompoziti

Alper BİÇER*¹

¹Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 60250, Tokat

(Alınış / Received: 05.12.2016, Kabul / Accepted: 12.04.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 08.05.2017)

Anahtar Kelimeler

LA,
Silikafume,
Kompozit FDM,
Isıl özellikler,
Isıl enerji depolama

Özet: Bu çalışma yapıca kararlı yeni bir faz değişim materyali olarak silikafume / Laurik asit(LA) kompozitinin hazırlanması, karakterize edilmesi ve ısıl enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi üzerine amaçlanmıştır. Kompozitler LA'nın silikafume içine vakum altında emdirme yöntemiyle hazırlanmıştır. Erimiş LA silikafume içerisinde akma davranışı göstermeden %30 oranında hapsedilebilmiştir. Üretilen kompozit faz değişim malzemesi (FDM); SEM ve FT-IR analiz teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Kompozit FDM'nin ısıl enerji depolama özellikleri DSC analizleri ile belirlenmiştir. DSC analiz sonuçları kompozit FDM'nin erime noktasının ve erime entalpisinin sırasıyla 43.19 °C ve 73.14 J/g olduğunu göstermiştir. Çok sayıda gerçekleştirilen ısıtma-soğutma döngüleri sonucunda kompozit FDM'lerin kimyasal olarak kararlı ve enerji depolama özelliklerini önemli düzeyde koruduğunu göstermiştir. TG analiz sonuçları silikafumeye emdirilen LA'nın termal kararlılığının yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Kompozit FDM'lerin ısıl iletkenliği farklı oranlarda karbon nano tüp (CNTs) ilave edilerek arttırılmıştır. Ayrıca CNTs ilavesinin kompozit FDM'nin ısıl enerji depolama ve salıverme süreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Silicafume/Lauric Acid (LA) Composite as a Novel Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage

Keywords

LA,
Silicafume,
Composite PCM,
Thermal properties,
Thermal energy storage

Abstract: This paper is aimed to prepare, characterize, and determine thermal energy storage properties of silicafume/lauric acid(LA) composite as a novel form-stable composite phase changematerial(PCM). The composite PCM was prepared by incorporating LA in the silicafume by using vacuum impregnation method. The LA could be retained by 30 wt% into the silicafume without the leakage of melted LA from the composite. The composite PCM was characterized by using SEM and FT-IR analysis techniques. Thermal energy storage properties of the composite PCMs were determined by DSC analysis. DSC results showed that the melting temperature and latent heat of the composite PCMs are 43.19 °C and 73.14 J/g, respectively. Thermal cycling test was conducted to determine the thermal reliability of the composite PCM and the results showed that the composite PCM had good thermal energy storage reliability and chemical stability. TG analysis revealed that the impregnated LA into the silicafume had good thermal stability. Thermal conductivity of the composite PCM was improved by adding carbon nanotubes (CNTs) in different mass fractions. The effect of CNTs addition on the thermal energy storage/release times of the produced composite PCM was also tested.

1. Giriş

Termal enerji depolama (TED) gelecekte karşılaşılabilecek enerji ihtiyacı için bir anahtar rolü oynamaktadır. Termal enerji depolamanın; Duyulur ısı depolanma, gizli ısı depolama ve geri dönüşümlü

kimyasal reaksiyonlarla ısı depolama şeklinde üç çeşidi vardır. Bunlar arasında faz değişim materyali (FDM) kullanarak gizli ısı depolama yöntemi yüksek enerji depolama miktarı ve izotermal özellikler gibi avantajlardan dolayı daha etkili ve verimli bir yöntemdir[1,2].

Son zamanlarda yapı malzemeleri içerisinde FDM ilave ederek enerji depolama ve bina iklimlendirme amaçlı çalışmalar yapılmaktadır[3,4]. Yapılan çalışmaların çoğu makro kapsülleme ve yapı malzemeleri içerisinde FDM ilavesi ile ilgilidir[5-8]. Ancak FDM'yi kapsülleyip yapı malzemesi içerisinde ilave etmek daha fazla iş gücü ve daha fazla maliyet anlamına gelmektedir. Ayrıca kapsülleme işleminden sonra yapı malzemesinin ısı transfer ve ısı iletkenliği düşmektedir. FDM'nin yapı malzemesine doğrudan ilave edilerek emdirilmesi bütün bu dezavantajların üstesinden gelinerek yapı endüstrisi için elzem bir ısı enerji depolama malzemesi üretilmesi anlamına gelmektedir [9-11]. Son yıllarda, inorganik organik ve bunların karışımı gibi pek çok türde FDM yapı malzemeleri içerisinde ilave edilerek kullanılmaktadır[12-15]. Laurik asit(LA), uygun faz değişim sıcaklığı, yüksek gizli ısı kapasitesi, düzgün erime davranışı, toksik olmama, aşırı soğuma davranışı göstermeme, düşük buhar basıncı, erime katılma esnasında hacim değişimi göstermeme, yüksek kimyasal ve termal kararlılık gibi özelliklerinden dolayı oldukça dikkat çekmektedir. Ayrıca LA doğrudan yapı malzemesinin gözenekleri içerisinde hapsedilebilir[16].

Silikafume, 0,1-0,2µm partüklü çapındadır ve kristal silika ferrosilikon alaşımı üretiminde yan ürün olarak elektrikli ark fırınlarında üretilmektedir[17]. Silikafume yüksek saflaştırma maliyetine sahip çevre ve atmosfer kirliliğine sebep olan endüstriyel bir atıktır. Bu yan ürünü yapı sektöründe kullanarak değerlendirmek çevrenin korunması açısından oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca silikafume yıllarca çimentonun dayanıklılığını artırdığı için katkı maddesi olarak kullanılmıştır [18].

Bu çalışmanın amacı yeni bir FDM olarak Silikafume/LA kompozit materyali hazırlamak ve karakterize etmektir. Vakumda emdirme metoduyla hazırlanan kompozitin kimyasal ve morfolojik yapıları FT-IR spektroskopisi ve SEM analiz metodlarıyla aydınlatılmıştır. Isıl enerji depolama özellikleri ve termal dayanımları sırasıyla Diferansiyel taramalı kalorimetre(DSC) ve Termogravimetrik analiz(TG) ile belirlenmiştir. Ayrıca karbon nanotüp (CNTs) ilave edilerek ısı iletkenlik değerleri iyileştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise, ilave edilen CNTs ile birlikte kompozit FDM'nin faz değişim sürelerindeki değişim incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyaller

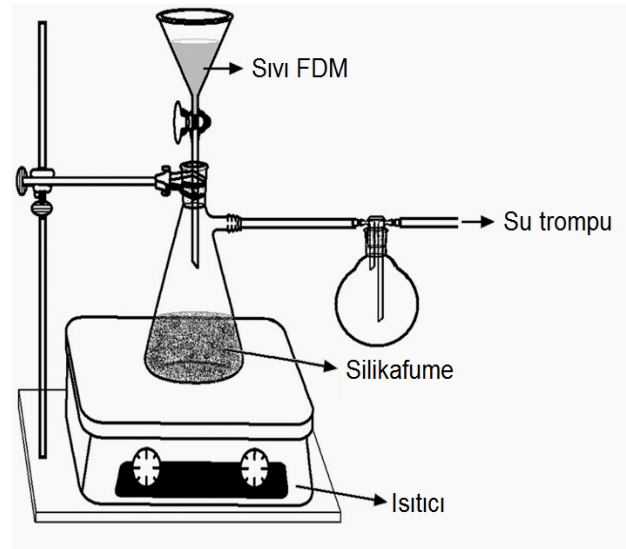
Laurik asit (e.n: 43-44°C) ve Karbonnanotüp (CNTs) Merk'ten temin edildi. Silikafume BEG-TUG mineral ve madencilikten (İstanbul, Türkiye) temin edildi. Silikafumenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Silikafume' nin kimyasal bileşimi.

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Diğer
Oran(%)	94,0	3,0	1,2	0,5	0,3	1,0

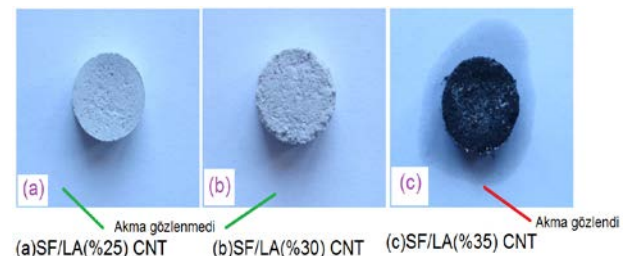
2.2. Yapıca kararlı FDM kompozitlerinin hazırlanması

Silikafume /LA kompozit FDM'ler Şekil 1'de gösterilen vakumda emdirme düzeneği kullanılarak hazırlanmıştır[19,20]. Silikafume su trompuna bağlı olan bir nüce erleninin içerisinde konmuştur. Daha sonra huni ve nüce erleni arasındaki musluk açılarak erimiş halde bulunan LA'nın silikafume ile etkileşimi sağlanmıştır. 90 dakika boyunca yaklaşık 65 kPa şiddetinde vakum uygulanarak eriyik halde bulunan LA'nın silikafume gözeneklerinin içerisinde etkili bir şekilde nüfuz edip hapsolmesi sağlanmıştır.



Şekil 1. Vakumda emdirme sisteminin şeması[21].

Bu işlem farklı kütle oranlarında da (%20, 25, %30, %35) Silikafume/LA kompozitleri için tekrarlanmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan kompozitler eş zamanlı olarak LA'nın erime sıcaklığının üzerine çıkacak şekilde ısıtılarak akma davranışı gösterip göstermediği incelenmiştir(Şekil 2). Maksimum LA hapsedme oranı toplam ağırlığın %30 olarak bulundu ve bu kompozit yapıca kararlı kompozit olarak değerlendirilmiştir. Yapıca kararlı FDM'nin ısı iletkenliklerini arttırmak için kütlece %1, %3 ve %5 oranında CNTs eklenmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri Dekagon KD2 ısı özellik analizörü ile yapılmıştır.



Şekil 2. Hazırlanan kompozit FDM'lere uygulanan akma testi sonuçları

2.3. Analiz Metotları

Yapıca kararlı kompozit FDM'lerin yüzey özellikleri LEO 440 model SEM kullanılarak incelenmiştir. FT-IR spektrumları Jasco 430 model FT-IR kullanılarak elde edilmiştir. FT-IR analizleri için FDM'ler 1:100 oranında KBr ile karıştırılarak 13 ton basınç altında peletler oluşturulmuştur. FT-IR spektrumları 4000-400 cm^{-1} dalgaboyu aralığında elde edilmiştir.

FDM'lerin erime-katılma faz değişim sıcaklıkları ve bu esnada depoladıkları-salıverdikleri gizli ısı değerleri Perkin-Elmer Jade model DSC kullanılarak ölçülmüştür. DSC analizleri 5°C/dakika ısıtma-soğutma hızıyla ve azot atmosferi altında yapılmıştır. FDM'lerin ısı kararlılıklarının belirlenmesinde Perkin Elmer TGA7 model Termogravimetrik analiz cihazı(TGA) kullanılmıştır.

Kompozit FDM'lerin ısıl güvenilirliklerinin belirlenmesi için çok sayıda tekrarlanan ısıtma-soğutma döngüsüne maruz bırakılmıştır. 1000 kez tekrarlanan ısıtma-soğutma periyodu sonrasında FT-IR ve DSC analizleri tekrarlanarak kompozit FDM'nin kimyasal özelliklerinde, erime-katılma sıcaklığı, ısıl enerji depolama gibi ısıl özelliklerinde değişiklik olup olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapıca kararlı kompozit FDM'nin erime-katılma süreleri farklı oranlarda karbonnanotüp içeren kompozitler için karşılaştırılmıştır.

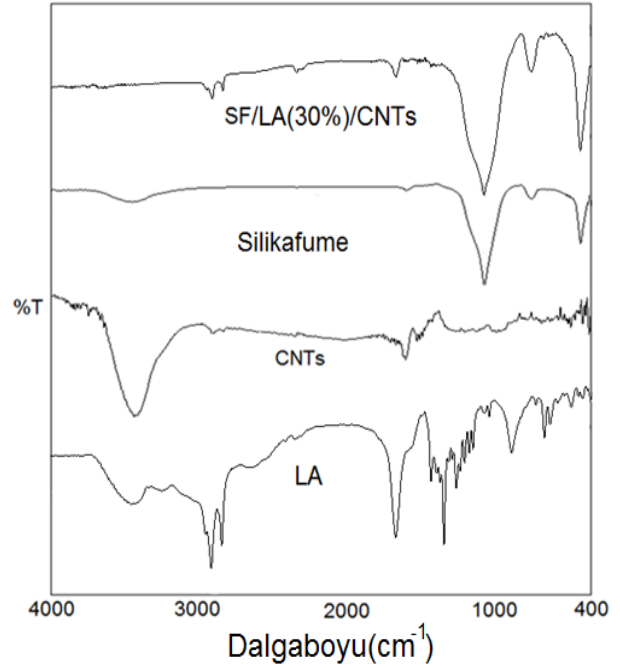
3. Bulgular

3.1. Hazırlanan silikafume/LA kompozit FDM'nin karakterizasyonu

LA ve Silikafume arasındaki absorpsiyonun aydınlatılması için kompozit FDM'lerin FT-IR analizleri yapılmıştır. Şekil 3'de 931, 1301, 1382, 1469, 1695, 2846, 2915 ve 3438 cm^{-1} 'de LA'ya ait karakteristik pikler görülmektedir. Bunlardan 3438 cm^{-1} 'deki (O-H) fonksiyonel gruplarına ait gerilme titreşimleri, 2846 ve 2915 cm^{-1} dekiler ise asimetrik (-CH₂ -CH₁) gerilme titreşimleridir. 1695 cm^{-1} 'de ise LA'nın karbonil (-C=O) gruplarına ait gerilme titreşimleri vardır. 931, 1301, 1382, 1469 cm^{-1} 'deki pikler ise (-CH₂),(C-H) ve (C-C) etkileşimlerine ait gerilme pikleridir. Saf silikafumeye ait gerilme pikleri ise 3748, 1652, 1195, 1093, ve 792 cm^{-1} 'de bulunmaktadır. Bunlardan 3748 cm^{-1} 'deki (SiO-H) gruplarına, 1093 cm^{-1} 'deki siloksan(-Si-O-Si-) gruplarına, 792 cm^{-1} 'deki ise SiO-H gruplarına ait titreşim bantlarıdır. Silikafume /LA kompozit FDM'nin FT-IR spektrumuna baktığımızda 806, 1116, 1472, 1701, 2850 ve 2920 cm^{-1} 'de LA'ya ait karakteristik piklerin oluştuğu açıkça görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde yeni tür piklerin oluşmadığı fakat LA'ya ait piklerin dalga boylarında bazı kaymaların olduğu görülmektedir. Bütün bu bulgular LA ve silikafume arasında kimyasal bir etkileşim değil fiziksel bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Sonuç

olarak LA başarılı bir şekilde yerleşmiş, yüzey gerilimi ve kapilarite gibi fiziksel kuvvetlerle silikafume içerisinde tutunmuştur [22,23].

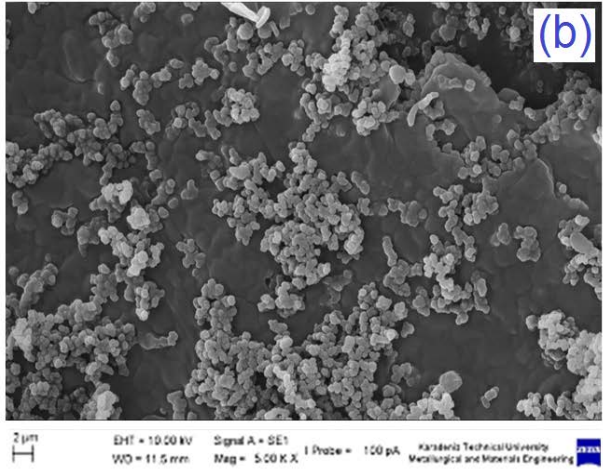
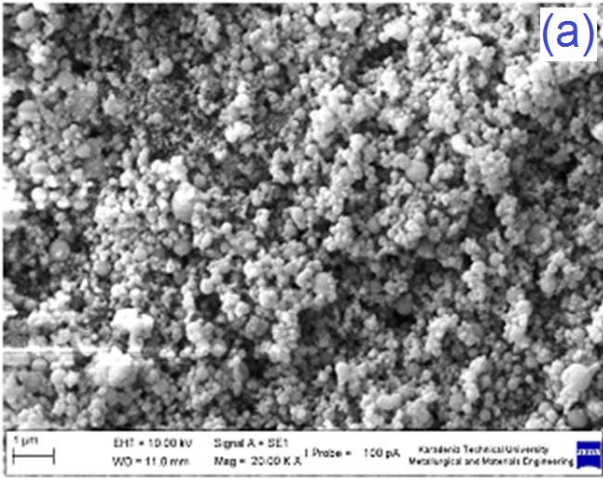


Şekil 3. Silikafume, LA ve hazırlanan silikafume/LA(%30) için elde edilen FT-IR spektrumları

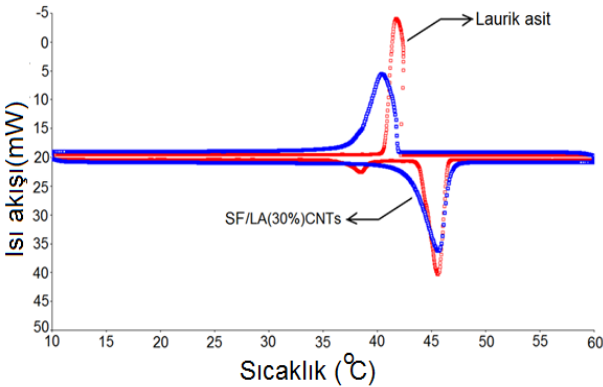
Şekil 4(a-b) sırasıyla silikafumeye LA emdirilmeden önceki ve sonraki SEM fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 4(a)'da silikafumenin tipik küresel partüküllerden meydana gelmiş morfolojisi görülmektedir. Şekil 4(b)'de ise, LA'nın destek materyali olarak kullanılan bu küresel partüküller arasında tamamen homojen bir biçimde dağılarak hapsoldüğü görülebilmektedir. Ayrıca, küresel silika partüküllerinin LA içerisinde gömülü halde bulunduğu söylenebilir. Bu yapı kompozit materyale mekanik dayanıklılık sağlamaktadır. Bu sayede LA'nın erime sıcaklığının üzerinde bile kompozit yüzeyinden akma davranışı göstermemektedir.

3.2. Saf LA ve hazırlanan yapıca kararlı FDM'nin ısıl enerji depolama özellikleri

Şekil 5 LA ve silikafume/LA kompozitine ait DSC spektrumlarını göstermektedir. Erime ve katılma sıcaklıkları saf LA için 44.07 ve 43.11°C, kompozit FDM için ise bu değerler; 43.02 ve 41.92°C olarak belirlenmiştir. LA'nın erime sıcaklıklarında meydana gelen küçük değişiklikler FT-IR analizi ile karakterize edilen fiziksel kuvvetlerden doğmaktadır[24,25]. Diğer yandan erime ve katılma gizli ısıları saf LA için 103.52 ve -201.38 J/g, kompozit FDM için ise 72.21 ve -67.24 J/g'dır. Bu sonuçlar dikkate alınarak; hazırlanan kompozit FDM'nin bina içi soğutma uygulamaları için oldukça uygun faz değişim sıcaklığına sahip olduğu ve bu amaçla kullanım için yeterli düzeyde ısıl enerji depolama/salıverme kapasitesine sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.



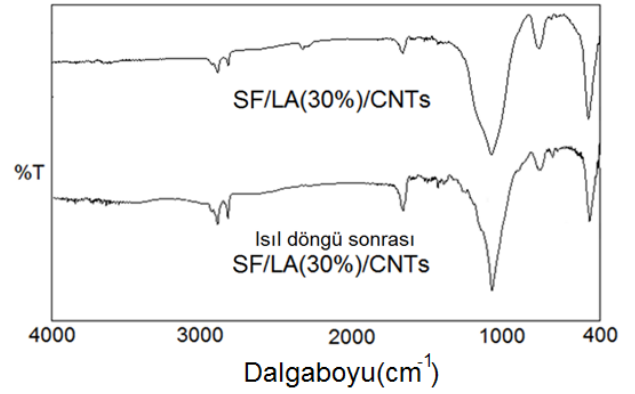
Şekil 4. SEM fotoğrafları (a) saf silikafume (b) yapıca kararlı kompozit FDM



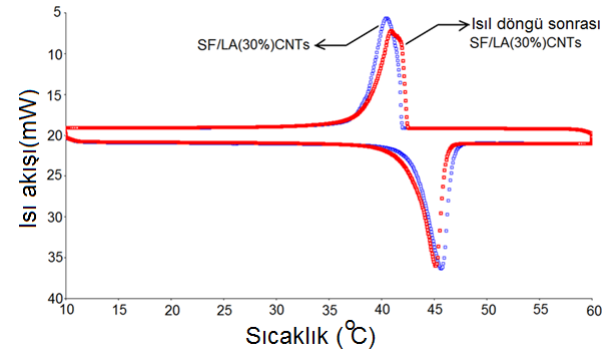
Şekil 5. LA ve yapıca kararlı silikafume/LA kompozitinin DSC spektrumu

3.3. Yapıca kararlı silikafume/LA kompozitinin ısı enerjisi depolama karakteristiklerindeki güvenilirlik

Kompozit FDM'lerin çok sayıda erime-katılma işleminden (uzun vadeli kullanım) sonrasında bile kimyasal yapısını ve ısı özelliklerini koruması beklenir. Hazırlanan kompozit FDM'nin ısı güvenilirliğinin test edilmesi amacıyla 1000 kez tekrarlanan erime-katılma döngüsüne maruz bırakılmıştır.



Şekil 6. Isıl döngü işlemi öncesi ve sonrasında silikafume/LA kompozitinin FT-IR spektrumu



Şekil 7. Isıl döngü işlemi öncesi ve sonrasında silikafume/LA kompozitinin DSC spektrumu

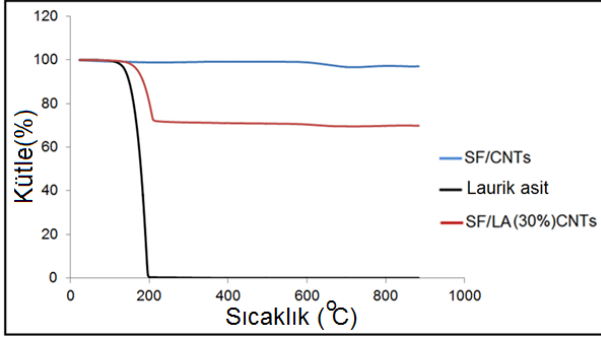
Tablo 2. Isıl döngü işlemi öncesi ve sonrasında silikafume/LA kompozitinin DSC verileri.

Kompozit Materyal	Isıtma periyodu		Soğutma periyodu	
	Erime sıcaklığı (°C)	Erime gizli ısısı (J/g)	Katılma sıcaklığı (°C)	Katılma gizli ısısı (J/g)
Silikafume/LA (30%) (ısı döngü sonrası)	43.02	72.21	41.92	-67.24
Silikafume/LA (30%)	42.88	69.63	42.49	-64.58

Şekil 6 ve Şekil 7 kompozit FDM'lerin 1000 kez tekrarlanan ısı döngü işleminden sonraki FT-IR ve DSC spektrumlarını göstermektedir. FT-IR spektrumundan kompozitlerin verdiği titreşim ve gerilme piklerinde herhangi bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır. Tablo 2'den ise ısı döngü işlemi sonrasında erime sıcaklıklarında ve ısı enerjisi depolama miktarlarında önemli ölçüde bir değişim olmadığı görülmektedir.

Şekil 8'de saf LA, Silikafume/CNTs ve hazırlanan yapıca kararlı silikafume/LA kompozitine ait TG analiz sonuçları görülmektedir. TG eğrilerinden de görüldüğü gibi, Silikafume/CNTs bozunma davranışı göstermiyor. Buna karşın LA'nın bozunması 160°C'de başlayıp 196°C'de biterken Silikafume/LA kompoziti ise 205°C'de başlayıp 232°C'de bitmiştir. Bu bozunma basamağı toplam kütlede %27.6' sına

karşılık gelmektedir. Bu oran; LA'nın yaklaşık %30 oranında silikafume içerisinde hapsedildiğini doğrulamaktadır. Diğer taraftan, kompozite ait birinci bozunma basamağının alt sınır değeri (205°C) LA'nın faz değişim sıcaklığının (yaklaşık 161°C) oldukça üzerindedir. Bu sonuç hazırlanan kompozit FDM'nin 232°C'ye kadar olan sıcaklığa kadar ısıl bozunmaya uğramadan rahatlıkla kullanılabileceğini ve bu bağlamda, gayet iyi bir ısıl kararlılığa sahip olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 8. Saf LA, Silikafume/CNTs ve üretilen silikafume/LA kompozitine ait TG spektrumu.

3.4. Yapıca kararlı kompozit FDM'nin CNTs (karbonnanotüp) ilavesiyle ısıl iletkenliğinin iyileştirilmesi

Faz değişim materyalinin enerji depolama ve geri salma hızı ısıl iletkenliğine büyük ölçüde bağlıdır. Bu kriter dikkate alınarak bu çalışmada hazırlanan kompozit FDM'nin ısıl iletkenliği kütlece farklı oranlarda (%1, %3 ve %5) CNTs ilavesiyle artırılmıştır.

Tablo 3'de saf LA, saf silikafume ve kütlece %1, %3 ve %5 oranlarında CNTs ilave edilmiş ve kompozitlerin ısıl iletkenlik değerleri verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde kompozit FDM'lerin ısıl iletkenlik değerlerinin CNTs ilavesiyle önemli düzeyde (özellikle %5 ilavesi sonrasında) arttığı açıkça görülmektedir.

Tablo 4'de kompozit FDM'lerin CNTs ilave edildikten sonraki ısıl özellikleri verilmektedir. Tablodan da görülebileceği gibi CNTs ilave edildikten sonra erime-katılma sıcaklığı ve ısıl enerji depolama özelliklerinde büyük değişiklikler meydana gelmediği görülmektedir. Sonuç olarak yapıca kararlı kompozit FDM'nin ısıl enerji depolama özellikleri korunarak ısıl iletkenlik değerleri iyileştirilmiştir.

3.5. CNTs ilave işleminin kompozit FDM'nin faz değişim süresi üzerindeki etkisi

Şekil 9'da kütlece farklı oranlarda CNTs ilave edilmiş kompozit FDM'lerin erime-katılma süreleri karşılaştırılmıştır. Kütlece %1, %3 ve %5 CNTs ilave edilmiş silikafume/LA kompozitlerin erime süreleri sırasıyla; 84 s, 81 s ve 78 s olarak belirlenmiştir.

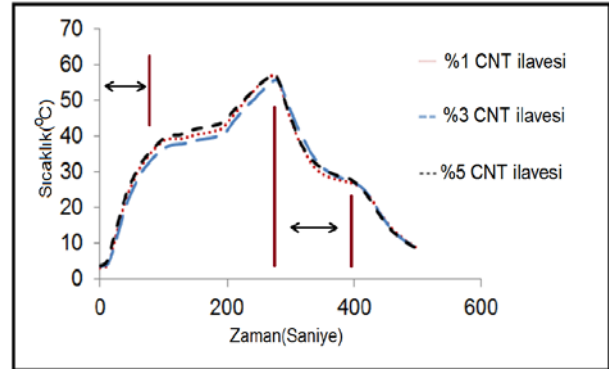
Katılma süreleri ise sırasıyla 126 s, 123 s ve 129 s olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. LA, silikafume ve hazırlanan FDM'lerin ısıl iletkenlik değerleri.

Kompozit FDM	Isıl iletkenlik	
	Isıl iletkenlik değeri (W/m.K)	
Laurik asit	0,21	
Silikafume	0,05	
Silikafume/LA(30%)/CNTs(1%)	0,15	
Silikafume/LA(30%)/CNTs (3%)	0,16	
Silikafume/LA(30%)/CNTs (5%)	0,18	

Tablo 4. Silikafume/LA(%30) ve CNTs eklenen FDM'lerin termal özellikleri.

Kompozit FDM	Isıtma periyodu		Soğutma periyodu	
	Erime sıcaklığı (°C)	Erime gizli ısı (J/g)	Katılma sıcaklığı (°C)	Katılma gizli ısı (J/g)
CNTs ilavesi yok	43.19	73.14	43.10	-72.81
(1%)CNTs ilavesi	43.02	72.21	41.92	-67.24
(3%)CNTs ilavesi	42.96	65.12	42.85	-64.20
(5%)CNTs ilavesi	41.36	59.62	41.03	-58.45



Şekil 9. CNTs ilave edilmiş kompozit FDM'lerin erime-katılma süreleri.

Elde edilen sonuçlara göre kompozit FDM içerisindeki CNTs'nin kütlece % miktarı arttıkça erime-katılma sürelerinin de lineer olarak azaldığı açıkça görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada vakumda emdirme yöntemi kullanılarak bir yapıca kararlı yeni bir FDM olan silikafume/LA kompoziti hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit içerisinde LA enerji depolayıcı FDM amacıyla kullanılırken, silikafume ise destek matrix görevini üstlenmiştir. TG analiz metoduyla LA'nın silikafume içerisinde maksimum hapsolme oranı %30 olarak belirlenmiştir. LA ve silikafume arasındaki etkileşimler FT-IR spektrumları ile aydınlatılmış, ısıl enerji depolama ve erime-katılma sıcaklığı gibi ısıl özellikler DSC analiz metoduyla belirlenmiştir. 1000 kez gerçekleştirilen erime-katılma döngüsü

sonrasında tekrarlanan FT-IR ve DSC analizleri; üretilen kompozitin kimyasal yapısında ve ısıl enerji depolama özelliklerinde kayda değer bir değişimin olmadığını ortaya koymuştur. TG analizleri sonucunda söz konusu kompozitin gayet yüksek ısıl dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca kompozitin ısıl iletkenliği CNTs ilavesiyle iyileştirilmiş ve bu bağlamda erime-katılma faz değişim sürelerinde önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Bütün bu elde edilen sonuçların ışığında; hazırlanan silikafume/ LA kompozitin tatmin edici ısıl enerji depolama özellikleri ve yüksek ısıl/kimyasal performansından dolayı farklı tip bina yapı malzemeleri için katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

TG analizleri için Prof. Dr. Ahmet KARADAĞ'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Hadjieva, M., Kanev, St., Argirov, J. 1992. Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27(1992), 181-187.
- [2] Rozanna, D., Salmiah, A., Chuah, T.G., Medyan, R., Thomas Choong, S.Y., Sa'ari, M. 2005. A study on thermal characteristics of phase change material (PCM) in gypsum board for building application. *Journal of Oil Palm Research*, 17(2005), 41-46.
- [3] Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D. 1993. Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*, 20(1993), 77-86.
- [4] Sarı, A., Karaipekli, A., Kaygusuz, K. 2008. Capric acid and stearic acid mixture impregnated with gypsum wallboard for low-temperature latent heat thermal energy storage. *International Journal of Energy Resources*, 32(2008), 154-160.
- [5] Schossig, P., Henning, H.M., Gschwander, S., Haussmann, T. 2005. Microencapsulated phase change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2005), 297-306.
- [6] Schossig, P., Henning, H.M., Haussmann, T., Raicu, A. 2003. Encapsulated phase change materials integrated into construction materials, in: *Proceedings of the Ninth International Conference on Thermal Energy Storage "Futurestock 2003"*. Warsaw, Poland, September.
- [7] Neeper, D.A. 2000. Thermal Dynamics of wallboard with latent heats storage. *Solar Energy*, 68(2000), 393-403.
- [8] Khudhair, A., Farid, M., Ozkan, N., Chen, J. 2003. Thermal performance and mechanical testing of gypsum wallboards with latent heat storage, in: *Proceedings of Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials and Chemical Reactions Feasibility Studies and Demonstration Projects*. Indore, India.
- [9] Zhou, X., Xiao, H., Feng, J., Zhang, C., Jiang, Y. 2009. Preparation and thermal properties of paraffin/poroussilica ceramic composite. *Composites Science and Technology*, 69(2009), 1246-1249.
- [10] Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., Ghanbaria, E. 1991. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Materials*, 22(1991), 231-242.
- [11] Mehling, H., Hiebier, S., Cabeza, L.F. 2002. Newson the application of PCMs for heating and cooling of buildings. *Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions feasibility studies and demonstration Project*. Third workshop, IEA, ECESIA Annex17,1-2October, Tokyo, Japan.
- [12] Nomura, T., Okinaka, N., Akiyama, T. 2009. Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage. *Material Chemistry and Physics*, 115(2009), 846-850.
- [13] Feldman, D., Banu, D., Hawes, D.W. 1995. Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36,(1995), 147-157.
- [14] Hadjieva, M., Stoykov, R., Filipova, T. 2000. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. *Renewable Energy*, 19(2000), 111-115.
- [15] Hawes, D.H., Feldman, D. 1992. Absorption of PCMs in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27(1992), 91-101.
- [16] Karaipekli, A., Sarı, A. 2011. Preparation and characterization of fatty acid ester/building material composites for thermal energy storage in buildings. *Energy and Buildings*, 43(2011), 1952-1959.
- [17] Soltan, M.E., Rageh, H.E., Rageh, N.M.M.E. 2005. Experimental approaches and analytical technique for determining heavy metals in fallen dust at ferrosilicon production factory in Edfu, Aswan, Egypt. *Journal of Zhefiang University of Science*, 6B8(2005), 708-718.
- [18] Bar-Nes, G., Peled, Y., Arbel-Haddad, M., Zeiri, Y., Katz, A. 2011. The effect of high salt concentration on the integrity of silica-fume blended cementitious matrices for waste

- immobilization applications. *Materials and Structure*, 44(2011), 291–297.
- [19] Zhang, D., Zhou, J., Wu, K., Li, Z. 2005. Granular phase changing composites for thermal energy storage. *Solar Energy*, 78(2005), 471–480.
- [20] Karaipekli, A., Sarı, A. 2009. Capric-myristic acid/vermiculite composite as form- stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy*, 83(2009), 323–332.
- [21] Karaman S., Karaipekli, A., Sarı, A., Biçer, A. 2011. Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2011), 1647-1653.
- [22] Karaipekli, A., Sarı, A., Kaygusuz, K. 2009. Thermal characteristics of paraffin/ expanded perlite composite for latent heat thermal energy storage. *Energy Sources Part A*, 31(2009), 814–823.
- [23] Fang, X., Zhang, Z., Chen, Z. 2008. Study on preparation of montmorillonite-based composite phase change materials and their applications in thermal storage building materials. *Energy Conversion and Management*, 49(2008), 718–723.
- [24] Radhakrishnan, R., Gubbins, K.E. 1999. Free energy studies of freezing in slit pores: an order-parameter approach using Monte Carlo simulation. *Molecular Physics*, 96(1999), 1249–1267.
- [25] Zhang, D., Wu, K., Li, Z. 2004. Tuning effect of porous media's structure on the phase changing behavior of organic phase changing matters. *Journal of Tongji University*, 32(2004), 1163–1167.