

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA ANABİLİM DALI**

**LAURİK-MİRİSTİK ASİT ÖTEKTİK KARIŞIMININ ENERJİ DEPOLAMA  
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Kimyager Sedat KELEŞ**

139116

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**“Yüksek Lisans (Kimya)”**

**Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4.08.2003**

**Tezin Savunma Tarihi : 27.08.2003**

138116

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ**

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Halit KANTEKİN**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hasan GENÇ**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ**

**Trabzon 2003**

**TE. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
BOKÜBİANTASYON MERKEZİ**

## ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında yapılmıştır. Bu tez çalışmasının bir bölümü Üniversitemiz Makine Bölümü Termodinamik Laboratuvarında yapılmış, fakat yaşanan bazı teknik sorunlar ve zaman darlığından dolayı Fen Bilimleri Enstitüsünden izin alınarak çalışmanın geri kalan kısmı Gaziosmanpaşa Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

*Yüksek Lisans çalışmalarım süresince her türlü yönlendirme ve desteğini gördüğüm danışman hocam sayın Prof. Dr. Kamil Kaygusuz'a en içten teşekkürlerimi sunarım.*

Deneyleerin yapılmasında ve çalışmanın diğer safhalarında yardım ve desteğini esirgemeyen Gaziosmanpaşa Üniversitesi Kimya Bölümü öğretim üyesi sayın Y. Doç. Dr. Ahmet Sarı Bey'e en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

*Çalışmalarım esnasında her türlü kolaylığı sağlayan ve Gaziosmanpaşa Üniversitesi'ne gidip deney yapabilmem için izin veren KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü müdürü sayın Prof. Dr. Yusuf Ayvaz Bey'e ve diğer enstitü çalışanlarına teşekkür ederim.*

Deneyleerin yapılmasına izin veren KTÜ Makine Bölümü ve Gaziosmanpaşa Üniversitesi Kimya Bölüm başkanlarına ve her iki bölümün laboratuvar personellerine ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca Fizikokimya Anabilim Dalının diğer öğretim üye ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Hem deneysel çalışmalarımında, hem tezin yazımında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili ailemin tüm fertlerine de teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Sedat KELEŞ

Trabzon, 2003

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ ... ..	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Literatür Özetleri .....	4
1.2.1. Isı Enerjisinin Depolanması.....	4
1.2.2. Duyulur Isı Depolama.....	6
1.2.3. Gizli Isı Depolama.....	10
1.2.3.1. Faz Dengesine Genel Bir Bakış.....	10
1.2.4. Faz Değişiren Maddeler.....	21
1.2.4.1. Yağ Asitleri ve Parafin Olmayan Diğer Organik Maddeler .....	21
1.2.4.2. Parafin Hidrokarbonlar (Alkanlar) .....	22
1.2.4.3. Tuz Hidradlar .....	26
1.2.4.4. Metaller ve Alaşımlar .....	27
1.2.4.5. Clathrate ve Yarı Clathrate Hidratlar.....	27
1.2.4.6. Organik ve İnorganik Ötektikler.....	28
1.2.5. Isı Transferine Genel Bir Bakış .....	30
1.2.5.1. İletim (Kondüksiyon).....	30
1.2.5.1.1. Düz bir yüzeydeki ısı transferi.....	30
1.2.5.1.2. Silindirik tabakalardaki ısı transferi.....	32
1.2.5.2. Taşınım (Konveksiyon) .....	32
1.2.5.3. Işınım (Radyasyon).....	34

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1.	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Faz Değiştiren Maddeler.....	35
2.2.	Deney Düzenegi.....	35
2.2.1.	Enerji Depolama Ünitesi.....	37
2.2.2.	Sıcaklık Problemleri (Termo Elemanlar).....	37
2.2.3.	Veri Toplayıcı Sistem (Data logger).....	39
2.2.4.	Akış metre (Debimetre) .....	39
2.2.5.	Sirkülasyon Pompası .....	40
2.2.6.	Sabit Sıcaklık Banyoları ve Diğer Elemanlar .....	41
2.3.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analiz Tekniği .....	41
2.4.	Deneysel Çalışmalar .....	42
2.4.1.	LA-MA Ötektik Karışımının Hazırlanması ve DSC Isıl Analizi .....	42
2.4.2.	Deneyler.....	43
3.	BULGULAR ve TARTIŞMA .....	45
3.1.	DSC Isıl Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	45
3.2.	LA-MA Ötektik Karışımının Faz Değişim Karakteristikleri.....	49
3.2.1.	Isınma Sıcaklık Dağılımları .....	49
3.2.1.1.	Isınma Sıcaklık Dağılımlarının Değerlendirilmesi .....	58
3.2.1.2.	Isı Transfer Akışkanının Kütleli Akış Hızı ve Giriş Sıcaklığının Toplam Erime Süresi Üzerindeki Etkisi .....	59
3.2.2.	Soğuma Sıcaklık Dağılımları.....	62
3.2.2.1.	Soğuma Sıcaklık Dağılımlarının Değerlendirilmesi.....	71
3.2.2.2.	Isı Transfer Akışkanının Kütleli Akış Hızının ve Giriş Sıcaklığının Toplam Katılma Süresi Üzerindeki Etkisi.....	72
3.3.	LA-MA Ötektik Karışımının Isı Transfer Karakteristikleri .....	75
3.3.1.	Isı Transfer Katsayısı .....	75
3.3.2.	Isı Fraksiyonu .....	79
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
5.	KAYNAKLAR .....	84
	ÖZGEÇMİŞ .....	87

## ÖZET

Bu çalışmada laurik asit (LA) ve miristik asit (MA) ötektik karışımının bir gizli ısı enerji depolama ünitesinde ısı enerji depolama özellikleri deneysel olarak belirlendi. Bu çalışma üç aşamada gerçekleştirildi. Birinci aşamada, LA-MA ikili karışımı için ötektik bileşim oranı ve karışımın ısı özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz metodu ile belirlendi. İkinci aşamada iç içe geçmiş dikey iki silindir borudan oluşan ısı depolama deney düzeneğinde depolanan bu ötektik karışımın radyal ve eksenel erime-katılma (enerji yükleme-boşaltma) sıcaklık dağılımları, faz değişim süreleri ve ısı transfer davranışları belirlendi. Üçüncü aşamada ise, ısı transfer akışkan borusunun dış yüzeyi ile faz değişim maddesi (FDM) arasındaki ısı transfer katsayısı ve ısı kesirleri faz değişim periyotları süresince hesaplandı. Deneylerde ısı transfer akışkan giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızları deneysel parametreler olarak seçildi ve bu parametrelerdeki değişime bağlı olarak elde edilen bulgular tartışıldı. DSC ısı analiz sonuçları, kütlece %66 LA ve %34 MA bileşim oranındaki ikili sistemin 34,2 °C de eriyen ve 166,8 J.g<sup>-1</sup> erime gizli ısısına sahip bir ötektik karışım oluşturduğunu gösterdi. Ayrıca ölçülen ısı özellikler ve elde edilen ısı enerji depolama davranışları dikkate alınarak, LA-MA ötektik karışımının iklim şartlarına göre güneş enerjisinin ısıtma amaçlı depolandığı sistemler için potansiyel bir enerji depolama maddesi olduğu sonucuna varıldı.

**Anahtar kelimeler:** Laurik – miristik asit ötektik karışımı, Faz değişim maddesi, Gizli ısı depolama, DSC analizi, Isı transfer akışkan giriş sıcaklığı, Kütleli akış hızı, Isı enerji depolama özellikleri.

## SUMMARY

### **Determination of Thermal Energy Storage Characteristics of Eutectic Mixture of the Lauric Acid (LA) and Myristic Acid (MA)**

In this study, thermal energy storage characteristics of eutectic mixture of the lauric acid (LA) and myristic acid (MA) in a latent heat storage system were determined experimentally. This study was carried out at three stages. At the first stage, the eutectic combination ratio and thermal properties of the LA – MA eutectic mixture were determined by differential scanning calorimeter (DSC) analysis method. At the second stage, the melting-solidification (energy charge-discharge) temperature distributions, phase change times in radial and axial directions, the heat transfer mechanisms in the eutectic mixture, which was stored in a vertical concentric cylindrical two-pipes latent heat storage system were studied. At the third stage, the heat transfer coefficients between the outside wall of the heat transfer fluid pipe and the phase change material (PCM), heat fractions during the phase change periods were calculated. In experiments, inlet heat transfer fluid temperature and mass flow rate were selected as experimental parameters and the obtained data were discussed from view of the change in these parameters. The DSC thermal analysis results showed that the LA-MA binary system in the combination ratio of 66:34 wt% forms a eutectic which has a melting temperature of 34,2 °C and latent heat of fusion of 166,8 J.g<sup>-1</sup>. By considering the measured thermal properties and the established thermal energy storage characteristics, it was also concluded that the eutectic mixture of LA-MA is a potential heat storage material for the solar heating systems with respect to the climate conditions.

**Key words:** Eutectic mixture of the lauric-myristic acids, Phase change material, Latent heat storage, DSC analysis, Inlet heat transfer fluid temperature, Mass flow rate, Heat energy storage characteristics.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Dünyadaki yenilenemeyen enerji kaynaklarının a) rezervleri b) kullanılabilirlik oranları ( Yücel, 1994) .....	2
Şekil 1.2. Enerji Depolama Çeşitleri .....	5
Şekil 1.3. İletim, taşınım ve ışıyım ile ısı .....	21
Şekil 1.4. Düz bir yüzeydeki ısı transferi .....	22
Şekil 1.5. Bir silindirdeki ısı transferi.....	23
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü .....	36
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğraf görüntüsü .....	36
Şekil 2.3 Enerji depolama ünitesinin ve sıcaklık probleminin yerleşim düzeninin şematik görünümü.....	38
Şekil 2.4. Enerji depolama ünitesinin ve sıcaklık probleminin yerleşim ünitesinin fotoğraf görüntüsü.....	39
Şekil 2.5. Debi metre kalibrasyon grafiği .....	40
Şekil 3.1. LA-MA ötektik karışımının ısınma DSC eğrisi .....	47
Şekil 3.2. LA-MA ötektik karışımının soğuma DSC eğrisi.....	47
Şekil 3.3. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	49
Şekil 3.4. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	50
Şekil 3.5. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	50
Şekil 3.6. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	51
Şekil 3.7. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 48^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	51
Şekil 3.8. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	52
Şekil 3.9. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^{\circ}\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	52

Şekil 3.10. LA-MA ötektik karışımının eksenel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı = $0,050 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	53
Şekil 3.11. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 52^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı : $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	53
Şekil 3.12. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 52^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	54
Şekil 3.13. LA-MA ötektik karışımının eksenel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 52^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı : $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	54
Şekil 3.14. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı : $0,025 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	55
Şekil 3.15. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,025 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	55
Şekil 3.16. LA-MA ötektik karışımının eksenel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,025 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	56
Şekil 3.17. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı : $0,075 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	56
Şekil 3.18. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,075 \text{ kg.s}^{-1}$ ). .....	57
Şekil 3.19. LA-MA ötektik karışımının eksenel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,075 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	57
Şekil 3.20. Isı transfer akışkanının kütlelesel akış hızının erime süresi üzerindeki nitel etkisi.....	60
Şekil 3.21. Isı transfer akışkanının kütlelesel akış hızının toplam erime süresi üzerindeki nicel etkisi.....	60
Şekil 3.22. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının erime süresi üzerindeki nitel etkisi.....	61
Şekil 3.23. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam erime süresi üzerindeki nicel etkisi.....	61
Şekil 3.24. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı = $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	62
Şekil 3.25. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	63
Şekil 3.26. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütlelesel akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	63



Şekil 3.27. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	64
Şekil 3.28. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 28^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	64
Şekil 3.29. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	65
Şekil 3.30. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	65
Şekil 3.31. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	66
Şekil 3.32. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 31^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	66
Şekil 3.33. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 31^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	67
Şekil 3.34. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 31^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	67
Şekil 3.35. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	68
Şekil 3.36. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	68
Şekil 3.37. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,05 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	69
Şekil 3.38. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı = $0,016 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	69
Şekil 3.39. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,016 \text{ kg.s}^{-1}$ ) .....	70
Şekil 3.40. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,016 \text{ kg.s}^{-1}$ ).....	70
Şekil 3.41. Isı transfer akışkanının kütleli akış hızının toplam katılma süresi üzerindeki nitel etkisi .....	73
Şekil 3.42. Isı transfer akışkanının kütleli akış hızının toplam katılma süresi üzerindeki nicel etkisi.....	73
Şekil 3.43. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam katılma süresi üzerindeki nitel etkisi.....	74
Şekil 3.44. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam katılma süresi üzerindeki nicel etkisi.....	74

Şekil 3.45. Isınma periyodu süresince LOSF , $T_1$ , $T_2$ , ve su giriş-çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ ) .....	76
Şekil 3.46. Soğuma periyodu süresince LOSF , $T_1$ , $T_2$ , ve su giriş-çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı: $0,033 \text{ kg s}^{-1}$ ) .....	77
Şekil 3.47. Isınma periyodu süresince kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi.....	78
Şekil 3.48. Isınma periyodu süresince kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi.....	79
Şekil 3.49. Kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısınma periyoduna ait ısı fraksiyonları üzerindeki etkisi .....	81
Şekil 3.50. Kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının soğuma periyoduna ait ısı fraksiyonları üzerindeki etkisi .....	82

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. Dünyadaki petrol rezervlerinin teorik tükenme süreleri (1987 üretimine) (Yüksel, 1994).....	2
Tablo 1.2. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı sıvı maddeler(Kakaç vd., 1989 ).....	8
Tablo 1.3. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler(Kakaç vd., 1989 ).....	9
Tablo 1.4. P116 Parafin wax'ın kimyasal bileşimi ve ısı-fiziksel özellikleri (Lane, 1983).....	29
Tablo 1.5. FDM olarak kullanılan bazı Parafin Waxlar'ının ısı-fiziksel özellikleri (Lane, 1983).....	30
Tablo 1.6. FDM olarak kullanılan bazı Clathrate ve yarı Clathrate hidratların ısı-fiziksel özellikleri (Lane, 1983).....	33
Tablo 1.7. FDM olarak kullanılan bazı organik ve inorganik ötektik karışımlar (Lane, 1983).....	34
Tablo 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan faz değişim maddelerinin ısı-fiziksel Özellikleri.....	35
Tablo 2.2. DSC analiz cihazının teknik özellikleri ve ısı analiz şartları.....	41
Tablo 2.3. Deneylein yapıldığı su giriş sıcaklıkları ve kütlelel akış hızları.....	44
Tablo 3.1. LA-MA karışımlarının DSC ile ölçülen erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları.....	45
Tablo 3.2. LA-MA ötektik karışımının ısı özellikleri.....	48

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	Isı transfer akışkan borunun yüzey alanı ( $m^2$ )
$c$	Spesifik (özgül) ısı ( $J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$dt$	Zaman aralığı (s)
$D_o$	Isı transfer akışkan borusunun dış çapı (m)
$D_{k-s}$	Katılaşma esnasında oluşan katı-sıvı ara yüzeyin çapı (m)
$E$	Eksenel mesafe (mm)
$E_b$	Yayma gücü ( $W/m^2$ )
$F$	Varyans (boyutsuz)
$G$	Birim yüzeydeki kütleli akış ( $kg.s^{-1}.m^{-2}$ )
$h$	Isı transfer katsayısı ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
$k$	Isıl iletkenlik ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$k_m$	Ortalama ısı iletkenlik katsayısı ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$L$	Isı transfer akışkan borusunun uzunluğu (m)
$\dot{m}$	Isı transfer akışkanının kütleli akış hızı ( $kg.s^{-1}$ )
$R$	Radyal mesafe (mm)
$Re$	Reynolds sayısı (boyutsuz)
$Ste$	Stefan sayısı (boyutsuz)
$T_e$	FDM'nin erime sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$T_g$	Isı transfer akışkanının sisteme giriş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$T_{\phi}$	Isı transfer akışkanının sistemden çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$\dot{Q}_{duy}$	Duyulur ısı akış hızı (W)
$\dot{Q}_b$	Isı boşaltma hızı (W)
$Q^+$	Isı fraksiyonu (birimsiz)
$\Delta T_L$	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı (K)
$\Delta H_e$	Erime gizli ısısı ( $J.g^{-1}$ )
$\sigma$	Stefan- Boltzman sabiti ( $W/m^2.K^4$ )
$\mu$	Viskozite ( $N.s.m^{-2}$ )

## 1. GENEL BİLGİLER

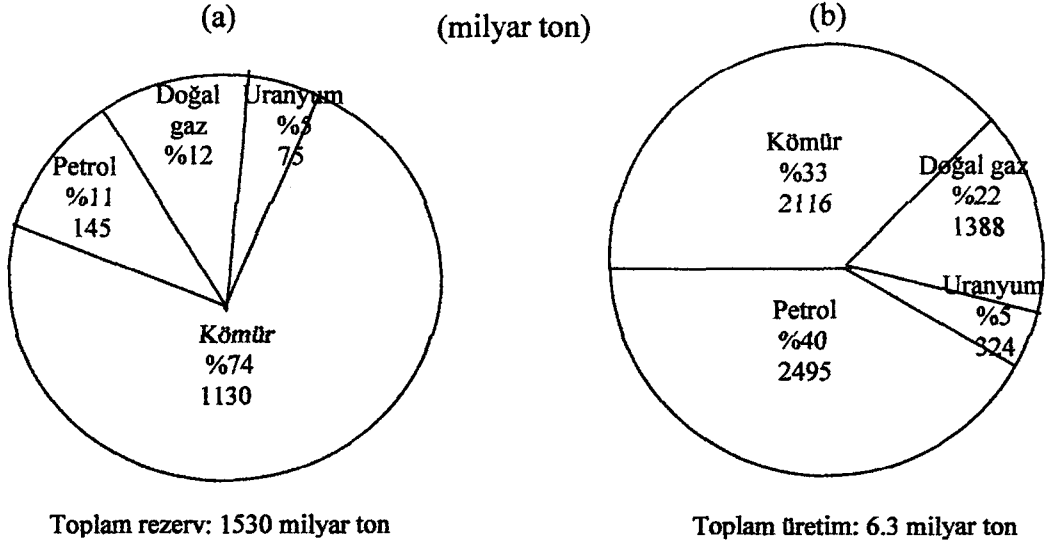
### 1.1. Giriş

Nüfus artışının ve teknolojik imkanların hızla artması sonucu; günlük hayatta kullanılan araçlarda yaygınlaşmakta ve enerji tüketimi gittikçe artmaktadır. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bilim ve insan yaratıcılığının birleşmesiyle ortaya çıkan teknolojik yeniliklerin en önemli gereksinimi enerjidir. Bu hızlı sanayileşme ve artan yatırımlar nedeniyle alışılmış enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Bu enerji kaynakları büyük oranda petrol, doğal gaz, kömür ve odundan elde edilmektedir. Bu enerji kaynaklarının tükenebilir olmaları yanında kullanımları sırasında çevre kirliliğine de yol açmaktadırlar. Enerjinin herhangi bir değişim yada dönüşüm uygulanmamış biçimine "birincil (primer )" enerji denir. Bunlar;

- katı yakıtlar ( kömür, linyit, vs,)
- petrol (petrol ürünleri )
- doğal gaz
- hidrolik enerji
- nükleer enerji
- yeni ve yenilenebilir enerjiler ( güneş, jeotermal, rüzgar, vs)
- geleneksel veya ticari olmayan enerjiler ( odun, bitki ve hayvan artıkları).

Bu birincil enerji kaynaklarından katı yakıtlar, doğal gaz, petrol ve nükleer enerjiler tükenebilir enerji kaynaklarını oluşturur.

1900 yılında dünyanın enerji ihtiyacının %58' i fosil kökenli enerji kaynaklarından karşılanırken yaklaşık yüzyıl sonra bu oran %78 değerine yükselmiştir. Enerjideki yıllık büyüme hızı yaklaşık %4 olarak alınacak olursa fosil yakıt rezervlerinin yaklaşık 90 yıllık ömürlerinin kaldığı açıktır (Yücel, 1994). Yapılan araştırmalar neticesinde önümüzdeki 25 yıl içinde sadece 10-12 ülkede petrol bulunabilecek, bu durum Tablo 1.1'de verilmiştir. Enerji alanında arz ve talep yapısı arasında derin bir dengesizlik vardır. Bir tarafta pazarı yönlendiren güçlü ve az sayıdaki arz sahipleri, diğer tarafta enerji fiyatına göre kendini ayarlayan büyük sayıdaki talep sahipleri.



Şekil 1.1. Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının  
a) rezervleri b) kullanılabilirlik oranları ( Yücel, 1994).

Tablo 1.1. Başlıca petrol ülkelerinin rezervlerinin teorik süresine göre sıralanması(1987 Üretimine göre) (Yücel, 1994).

10 yıldan az	10-15 yıl	15-25 yıl	25-40 yıl	40-80 yıl	80 yıldan fazla
İngiltere	Brezilya	Endonezya	Nijerya	İran	Venezuela
ABD	Ekvator	Malezya	Norveç	Meksika	Abudabi
Kanada	Arjantin	Angola	Katar	Libya	Kuveyt
Avustralya	Cezayir	Çin		Irak	S.Arabistan
Dubai	Rusya	Hindistan			
	Kolombiya				
	Mısır				

Doğanın bu kaynakları oluşturmak için milyonlarca yıl geçirmesine karşılık insanoğlu bunları birkaç yüzyılda kullanıp bitirmiş olacaktır. Bu durumda kömürün dışında, yenilenebilir enerji kaynakları kalacaktır. Gelecekte bir gün dünyayı besleyen enerji güneş enerjisi olacağı için enerji ihtiyacımızı karşılamak için güneş enerjisinden yetinmek zorunda kalacağız. Büyük miktarda enerjinin üretilmesi ve dağıtılması sonucu

çevrenin dengesi bozulmaktadır. CO<sub>2</sub> gazları ve diğer muhtelif gazların yayılmasıyla sera etkisi ve bunlara bağlı iklimsel değişiklikler, yanma tesisleri ve kara taşıt araçlarından yayılan gazlardan oluşan asit yağmurları ve nükleer enerji atıklarının saklanması gibi çevresel enerji faaliyetleri sonucu çevre büyük oranda dengesini kaybetmektedir.

Fosil kökenli enerji kaynaklarındaki hızlı tüketim nedeniyle yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gittikçe artmaktadır. Bu nedenle enerjinin bulunabilirliği ve sürekliliği çok önemlidir. Enerji; insanlık için temel bir ihtiyaç olduğu için gelecek nesillere ulaştırılması gerekir, yani sürekliliği şarttır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gittikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, biyolojik atıklar, biomass, gelgit, dalga, rüzgar, su ve jeotermal enerjilerdir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları 3 guruba ayrılır;

- Bir ısı yenilenmesinde türeyen enerjiler “jeotermal, güneş enerjisi, denizlerin yüzeyi ile dibinin sıcaklıkları farkından oluşan okyanusların ısı gücü.”
- Bir hareket yenilenmesinden türeyen enerjiler “rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, gelgit enerjisi (med-cezir), dalgalar ve akımlar enerjisi. ”
- Bir madde yenilenmesinden türeyen enerji “biomass gurubu yani fotosentez yoluyla türeyen bitkisel maddelerden elde edilen enerjidir.”

Kuşkusuz yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş enerjisi başta gelmektedir. Güneş enerjisi güvenli bir kaynak olup yaygın olarak kullanılabilir ve yüksek bir teknoloji gerektirmemektedir. Ayrıca kullanımı sırasında hiçbir çevre kirliliğine neden olmaz, bol ve tükenmeyen bir enerji kaynağı oluşu dışı bağımlı olmayışı ve işletme masraflarının düşük olması gibi avantajlarının yanında, yüksek yatırım maliyeti yoğunluğunun düşük olması, geniş alanlara ihtiyaç göstermesi gibi dez avantajları da vardır.

Dünyada 1971 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim miktarı 5.1 Kton iken ; 1995 yılında bu değer yaklaşık 7 katına çıkarak 36Kton değerine ulaşmıştır (Koopmans, 1999). Bu durum şekil 1.1 de gösterilmiştir. Ülkemizde ise 1991 yılında yenilenebilir enerji kaynakları tüketimi %18.5 değerinde iken; 1998 yılında bu oran %29.4 değerine yükselmiştir (Kaygusuz, 1999).

## 1.2. Literatür Özetleri

### 1.2.1. Isı Enerjisinin Depolanması

Yenilenebilir enerji kaynakları ve bunların depolanmaları ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır (Abhat, 1983; Lane, 1983; Garg, vd., 1985; Duffie and Beckman, 1991; Boyle, 1996; Khartchenko, 1998; Kaygusuz, 1999; Sarı ve Kaygusuz, 2002; Liu ve Chung, 2001; Dinçer ve Rosen, 2002). Gün boyunca sürekli gelmeyen güneş ışınımı; geceleri hiç gelmediği gibi gündüzleri de saatlere göre farklılık gösterir. Oysa enerji tüketimi süreklilik arz eder ve günün saatlerine ve aylara göre değişimi azdır. Hatta güneş ışınının olmadığı veya az olduğu zamanlarda enerji tüketimim daha da çoktur. Depolama yapılmadığı takdirde güneş enerjisinden sadece güneş ışınının olduğu saatlerde faydalanılır.

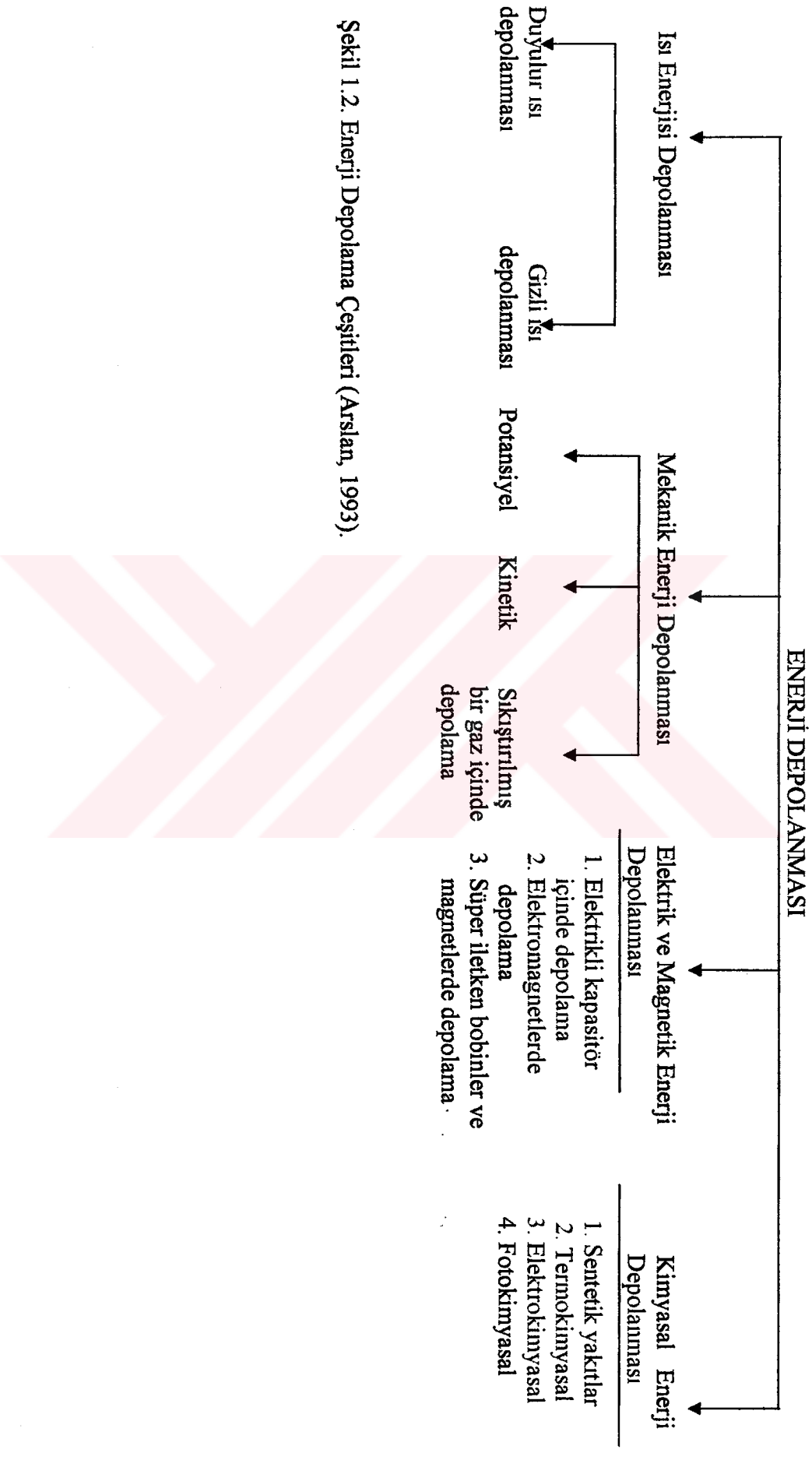
Depolama yöntemlerinden en verimli ve ekonomik olanı termal enerji depolama yöntemidir. Daha sonra kullanılmak amacıyla, farklı sıcaklıklarda gelen güneş enerjisinin depolanması anlamına gelen termal ısı depolama sistemlerinin başlıca avantajları aşağıda sıralanmıştır;

- Depolama için ilk yatırım maliyetinin ve enerji kaybının düşük olmasıdır.
- Kullanılan aletlerin basit ve imalatlarının kolay olması.

Termal enerji depolama sistemlerinin seçimi; depolama periyodu, ekonomiklik, teknolojik olarak uygulanabilirliği, çalışma şartları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu tür depolama; bina, ısıtma, soğutma ve hava kullanılan uygulamalar için en ideal olanıdır.

Güneş enerjisinin ısı olarak depolanması düşük sıcaklıkta güneş uygulamaları için önemlidir. Isıl depolama iki şekilde gerçekleştirilir: duyulur (sensible) ısı depolama ve gizli (latent) ısı depolamadır. Isıl depolamanın yapıldığı birinci durumda (sensible) enerjinin depolanacağı maddenin sıcaklığı ısı yükleme ve boşaltma süresince değişir. Oysa depolamanın ikinci şeklinde (latent) faz değişimi yoluyla madde sıcaklığının çok az orandaki değişimiyle ısı depolanır. Diğer bir deyişle birinci şekilde maddenin ısı kapasitesinden yararlanılarak ısı depolanır. İkinci şekilde ise maddenin faz değişimi sırasında iç enerjisindeki artış ile sabit sıcaklıkta ısı depolanır





Şekil 1.2. Enerji Depolama Çeşitleri (Arslan, 1993).

Isı depolama ortamı olarak çok sayıda madde kullanılabilir. Isı depolayıcı bu maddelerde aranan özellikler aşağıdaki verilmektedir;

- Yaygın olarak bulunabilmeli ve ucuz olmalı
- Çevre kirliliğine yol açmamalı
- Yanıcı, patlayıcı ve zehirleyici olmamalı
- Korrozif olmamalı ve yapı malzemeleriyle kimyasal reaksiyona girmemeli
- Fiziksel özellikleri iyi bilinmeli
- Yüksek yoğunluklu olmalı ( duyulur ısı depolama için)
- Yüksek füzyon ısısı olmalı ( gizli ısı depolama için )
- Yüksek ısı transfer özellikleri olmalı
- Normal atmosfer basıncında depolanabilmeli
- Uzun süre kullanımdan sonra bile özelliklerini muhafaza edebilmelidir.

Enerji depolama bir yandan enerjinin kullanıldığı alanda oluşan atık enerjileri depolama (sanayideki atık ısının depolanması gibi), diğer yandan yalnız belirli zamanlarda enerji verebilen (güneş enerjisi gibi) yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak enerji temin zamanı ile enerji talebi arasındaki doğacak farkı gidermeyi amaçlar.

### 1.2.2. Duyulur Isı Depolama

Termal ısı depolamanın bir çeşidi olan duyulur ısı depolamada maddenin ısı kapasitesi özelliğinden faydalanılır. Sıcaklık artırılarak enerji duyulur ısı şeklinde depolanır. Bu tür depolamada yükleme veya ortamdan ısı çekme esnasında ortamın sıcaklığı değişir.

Örneğin, m kütleli bir maddenin sıcaklığı  $T_1$  den  $T_2$ 'ye çıkarıldığında depolanan duyulur ısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) = V \rho C_p \Delta T \quad (1.1)$$

Burada V, maddenin hacmi,  $\rho$ , maddenin yoğunluğu ve  $C_p$ , sabit basınçtaki özgül ısıdır.

Bu tür depolama maddelerinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır;

- Hacimsel özgül ısıları büyük olmalı
- Madde uzun süre özelliklerini korumalı
- Yanma ve alevlenme özellikleri olmamalı
- Zehirli ve korrozif olmamalı
- Kolay temin edilebilir ve ucuz olmalıdır.

Duyulur ısı depolamada kullanılan ve bu özellikleri sağlayan depolama ortamları olarak genellikle su, toprak, kaya, tuğla, seramik, beton ve değişik bina yapım malzemeleri kullanılabilir. Bina ısıtma/soğutma ve su ısıtma gibi ısı uygulamalarında duyulur ısı depolama ortamı olarak genellikle su kullanılır. Su, özellikle donma ve kaynama noktaları arasında tutulduğu zaman istenilen özelliklerin tümünü sağlar. Daha düşük sıcaklık uygulamalarında su ile karıştırılmış ikincil soğuyucular ( tipik olarak glikol çözeltileri) sık sık ısı transfer ortamı olarak kullanılırlar. Bunlar donma noktası ve faz değişim noktalarının aşağısında kullanılabilen belirli depolama ortamlarıdır. Yüksek sıcaklıktaki ısı depolama için ısı depolama ortamı olarak genellikle kaya, tuğla veya seramik maddeleri kullanılır. Ayrıca bu maddeleri ikili karışım şeklinde bulunduran depolama ortamları da mevcuttur.

*Duyulur ısı depolama ortamlarının genel işletim problemleri aşağıdaki sıralanmıştır.*

- Isı depolama esnasında depolama sıcaklığı sürekli olarak arttığından sistemdeki ısı kayıpları fazladır.
- Sistemden ısı çekerken depolama sıcaklığı sürekli düştüğünden ısı akış dağılımı oldukça düzensizdir.
- Isı depolama işlemi çevre sıcaklığından oldukça yüksek olduğu için iyi bir izolasyon şarttır.

Tablo 1.2. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı sıvı maddeler (Kakaç, vd., 1989).

Ortam	Akış tipi	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Spesifik ısı (J/kg.K)	Isıl İletkenlik (W/m.K)
Su		0-100	1000	4190	0,63
Su-etilen glikol			1050	3479	
Terminol 55	Yağ	(-18)-(315)		2400	
Terminol 66	Yağ	(-9)-(343)	750	2100	0,106
Etilen glikol			1116	2382	0,249
Motor yağı	Yağ	<160	888	1880	0,145
Lityum	Sıvı metal	180-1300	510	4190	38,1
Sodyum	Organik sıvı	100-760	960	1300	67,5
Etanol	Organik sıvı	<78	790	2400	-
Propanol	Organik sıvı	<97	800	2500	-
Bütanol	Organik sıvı	<118	809	2400	-
İzobütanol	Organik sıvı	<100	808	3000	-
İzopentanol	Organik sıvı	<148	831	2200	-
Oktan	Organik sıvı	<126	704	2400	-

Tablo 1.3. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler (Kakaç, vd., 1989).

Depolama maddesi	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı, c, (J/kg.K)	Isı kapasitesi, c, 10 <sup>-6</sup> J/m <sup>3</sup> .K	Isıl iletkenlik (W/mK)	Isıl yayılma A=kc10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s
Alüminyum	2707	896	2,4255	20 °C de 204	84,10
Alüminyum oksit	3900	840	3,2760		
Alüminyum sülfat	2710	750	2,0325		
Tuğla	1698	840	1,4263	29 °C de 0,69	0,484
Beton	2240	1130	2,5310	0,9-1,3	0,35-0,51
Dökme demir	7900	837	6,6123	29,3	4,431
Saf demir	7897	452	3,5694	20 °C de 73	20,45
Kalsiyum klorür	2510	670	1,6817		
Bakır	8954	383	3,4294	20 °C de 385	112,3
Toprak(yaş)	1700	2093	3,5581	2,51	0,705
Toprak(kuru)	1260	795	1,0017	0,25	0,25
Magnezyum oksit	3570	960	3,4272		
Potasyum klorür	1980	670	1,3266		
Potasyum sülfat	2660	920	2,4472		
Sodyum karbonat	2510	1090	2,7359		
Sodyum klorür	2170	920	1,9964		
Sodyum sülfat	2700	920	2,4840		
Granit	2640	820	2,1648	1,73-3,98	0,79-1,84
Kum taşı	2200	710	1,5620	1,83	0,56-0,59
Kireç taşı	2500	900	2,2500	1,26-1,33	0,99-1,41
Mermer	260	800	2,0800	2,07-2,94	1,72

### 1.2.3. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı enerji depolama sistemlerinde ısı; depolama ortamlarındaki faz değiştiren maddeler tarafından depolanır. Faz değişim ortamında erime ve donma olayları ile ilgili iki temel işlem vardır. Erime işlemi sũresince, verilen ısı erime gizli ısı olarak depolanır ve katılaşma işlemi sũresince bu gizli ısı serbest bırakılır. Bu çevrimin gerçekteşebilmesi için hava veya su gibi bir ısı taşıyıcı akışkana ihtiyaç vardır. Faz değiştiren ısı enerji depolamada ısı, faz değiştirme gizli ısı yardımıyla depolanır. Faz değiştiren maddenin sıcaklığı faz değişimi sũresince hemen hemen sabit kalır ( Abhat, 1983; Cardelli vd., 2000; Sarı ve Kaygusuz, 2002; Bo vd, 1999; Natalia vd, 2001). Isı depolamada erime gizli ısı bir maddenin spesifik ısısından oldukça büyük olduğundan faz değişimiyle enerji depolama, duyulur ısı depolamaya göre daha avantajlıdır. Faz değiştiren maddeler (FDM) geniş ısı depolama kapasiteleri ve izotermal davranışları nedeniyle son yıllarda enerji depolama uygulamalarında çok önem kazanmıştır.

#### 1.2.3.1. Faz Dengesine Genel Bir Bakış

Her hangi bir katı-sıvı FDM'sinde erime ve donma sırasında sıvı faz en azından bir katı fazla etkileşmelidir. Fakat bu fazların termodinamik bakımdan dengede olmasına gerek yoktur. Heterojen denge şartları altındaki mevcut karşılıklı etkileşimleri, bu ilişkinin sıcaklık ve basınçla nasıl değiştiğini belirlemek için faz diyagramları (denge diyagramları) kullanılmaktadır. Bu diyagramlar ilk olarak 1876 yılında Willard Gibbs tarafından açıklanmıştır. Gibbs; kimyasal bir sistemde dengede mevcut olan fazların sayısını, sistemin serbestlik derecesi ve sistemdeki kimyasal bileşen sayısı arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde türetmiştir:

$$F = C + 2 - P \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte F: varyans veya serbestlik derecesi, C: mertebeye veya bileşen sayısı, P: faz sayısı olup bu terimlerin her birini kısaca açıklamaya çalışalım.

Faz; bir sınırla sistemin diğer kısımlarından mekanik yolla ayrılabilen, sistemin homojen olan kısmıdır. Sınırın mevcut olmasına gerek yoktur, aynı kristal yapıdaki ve

bileşimdeki farklı kristaller tek bir faz oluştururlar. Yinede kimyasal olarak farklı kristal yapıdaki aynı maddelerin bile kabul edilen farklı kristal karışımında her bir kristal formu ayrı bir faz olarak düşünülebilir. İki maddeden oluşan homojen olarak karışmış bir katı çözeltisi tek bir faz olarak düşünülebilir, çünkü bileşenler mekanik yolla birbirlerinden ayrılamazlar.

Dizin veya Bileşen sayısı; Sistemin tüm fazlarında mevcut olan en küçük bağımsız madde sayısıdır. Faz değişim uygulamalarının çoğunda dizin kavramı daha doğru olarak kullanılır.

Varyans veya serbestlik derecesi; tamamıyla dengedeki bir sistemin gereklerine uyan, bağımsız olarak dıştan değiştirilebilen faktörlerin sayısıdır. Genellikle kullanılan bu faktörler basınç, sıcaklık ve konsantrasyondur. Denge olan bir sistemde basınç ve sıcaklık sistemin her noktasında aynı olmalı ve faz için de her bir konsantrasyonun aynı olması gerektiği vurgulanmaktadır.

Faz kuralı dengedeki sistemler için depolamada kullanılacak FDM'leri araştırmada büyük oranda kullanılmaktadır. Faz kuralı yalnızca dengedeki sistemlere uygulanır. Gibbs 1876 da yalnızca teorik olarak faz kuralını açıklamıştır. Bu kuralı fizikokimyaya H.W. Roozeboom uygulamıştır.

Faz diyagramları dengedeki bir sistemin sıcaklık, konsantrasyon ve basınç ilişkilerini belirlemenin en uygun yoludur. Bu diyagramlar ısı depolayıcı FDM araştırma-geliştirme çalışmaları için oldukça kullanışlıdır ve sistemin şartlarını tarif etmekte kullanılırlar.

Bir maddenin, faz değiştiren enerji depolamada kullanılabilmesi için yoğunluğunun, spesifik ısısının ve füzyon ısısının bilinmesi gerekir. Yüksek gizli ısılarda birim ağırlık başına daha yüksek ısı enerji depolanması gerekir. Daha küçük büyüklükteki depolama kaplarına olanak sağladığı için yüksek yoğunluk daha çok arzu edilmektedir. Özel uygulamalar için FDM'lerin seçiminde ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalışma sıcaklığı FDM'nin enerji depolama sıcaklığıyla uyum sağlamak zorundadır, FDM'nin erime noktası çalışma sıcaklığından biraz yüksek bir aralıkta seçilmek zorundadır. Bu aralık yeterli miktarda sıcaklık gradienti sağlayacak kadar büyük olmalıdır, fakat bu aralık çok fazla olmamalıdır, çünkü, ısı kaybı artar ve sistemin etkinliği azalır.

Faz değişiminde genelde dört durum söz konusudur. Bunlar katı-katı, katı-gaz, katı-sıvı ve sıvı-gaz geçişleridir. Katı-katı geçişi için faz değişim gizli ısısının mutlak değeri katı-sıvı geçişinden genellikle daha azdır. Bu geçişlerden katı-gaz ve sıvı-gaz geçişleri ısı depolamada kullanılmazlar, bunun nedeni; gazlar çok geniş hacim kapladıkları için çok

büyük depolama ortamlarına ihtiyaç gerektirirler. Katı-katı ve katı-sıvı geçişlerinde ise çok az miktarda hacim değişmesi olduğundan gizli ısı depolama uygulamaları için iyi bir durumdur. FDM olarak genellikle organik ve inorganik bileşikler kullanılır. İnorganik bileşiklerin termal enerji depolama gizli ısı kapasiteleri organik bileşiklerin yaklaşık iki katı olmalarına rağmen organik maddelerin uygun erime yetenekleri, kendiliklerinden çekirdekleşmeleri nedeniyle FDM olarak daha çok tercih edilmektedirler

Gizli ısı depolama uygulamalarında düşük, orta ve yüksek işlem sıcaklıkları için çok sayıda FDM araştırılmıştır (Abhat, 1983; Lane, 1983). İyi bir faz değiştiren maddenin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir:

- Yüksek gizli ısı değerine sahip olmalı
- Erime sıcaklığıyla sistemin işlem sıcaklığı aynı olmalıdır.
- İyi bir faz ayrımı olmalıdır.
- Yoğunluğu yüksek olmalıdır.
- Aşırı soğuma olayı görülmemelidir.
- Kristal büyüme hızı yüksek olmalıdır.
- Kimyasal olarak kararlı olmalıdır.
- Güvenli olmalı, zehirleyici, yanıcı ve patlayıcı olmamalıdır.
- Ekonomik olmalı ve bol bulunmalıdır.

Faz değiştiren maddelerle yapılan ısı depolama işleminde duyulur ısı depolamaya göre çok daha fazla ısı depolanır. FDM'lerle yapılan ısı depolama işlemlerinde bir miktar duyulur ısıda depolanır, fakat bu faz değişim gizli ısı yanında çok küçük kalır.

Faz değiştiren bir sistemde; kimyasal değişim yoksa, termodinamiğin birinci kanununa göre sabit basınçtaki toplam ısı enerjisi depolama;

$$q_p = \int_{T_k}^{T_e} c_k dT + h_{ks} + \int_{T_k}^{T_e} c_s dT \quad (1.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $c_k$  ve  $c_s$  (kJ/kgK), sırasıyla katı ve sıvının sabit basınçtaki özgül ısıları;  $dT$  (K), sıcaklık farkı (gradienti) ve  $h$  (kJ/kg), erime gizli ısısıdır. Bu eşitlikteki ilk terim katı fazdaki FDM'nin duyulur ısısını, ikinci terim FDM'nin erime gizli ısısını ve üçüncü terim ise sıvı fazdaki FDM'nin duyulur ısısını temsil etmektedir.



Gizli enerji depolama için yaygın olarak kullanılan depolama ortamları su-buz, tuzlu su-buz çözültisi, hidrat tuzları ve polimerler gibi diğer faz değişim maddeleri kullanılabilir. Değişik sıcaklıklardaki gizli ısı depolama sistemleri için kullanılan alternatif depolama ortamları içinde yaygın olarak Clathrates tuzları, CO<sub>2</sub> ve parafin waksarı kullanılır. İklimlendirme uygulamaları için su-buz karışımı en yaygın olarak kullanılan depolama ortamıdır ve bu ortam yukarıda listesi verilen özelliklerin çoğunu sağlar.

Bu çalışmada faz değiştiren enerji depolama ortamı olarak laurik –miristik asit ötektik karışımı FDM olarak kullanılmıştır, bunlar düşük sıcaklık FDM'si olarak 273-393 K sıcaklık aralığında işlem yapmaktadırlar.

Literatürde enerji depolama ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Sarı ve Kaygusuz (2002a) yapmış oldukları çalışmada FDM olarak yağ asitlerinin enerji depolayıcı madde olarak kullanımları sırasındaki ısı kararlılıklarını incelemişlerdir. Bu çalışma için kullandıkları yağ asitleri %90-95 saflıkta ve erime sıcaklıkları 40-63 °C arasında olan stearik asit, miristik asit, palmitik asit ve laurik asittir. FDM'lerin erime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasitelerini 40, 410, 700 ve 910 çevrimden sonra Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analiz tekniğiyle belirlemişlerdir. Sonuçta DSC ölçümleri orta sıcaklık termal ısı depolama uygulamaları için tüm yağ asitlerinin faz geçiş sıcaklıkları ve gizli ısıları açısından iyi bir ısı kararlılığına sahip olduklarını göstermişlerdir. Bununla birlikte uzun süreli FDM uygulamalarında palmitik ve miristik asidin diğer yağ asitlerinden daha fazla kullanışlı olduğunu belirlemişlerdir.

Sarı ve Kaygusuz (2001a) yapmış oldukları bir diğer çalışmada stearik asidin enerji depolama maddesi olarak kullanımındaki faz değişim kararlılığını ve termal performansını deneysel olarak belirlemişlerdir ve elde ettikleri bu deneysel sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada FDM olarak stearik asidin faz değişim kararlılığı üzerine ısı akış hızının etkisi gibi katı sıvı ara yüzeyinin büyümesi, geçiş sıcaklığı ve geçiş zamanları gibi parametreler çalışılmıştır. Sonuçta FDM'nin erime kararlılığının aksiyel yöne oranla radyal yönde daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca su giriş sıcaklığının değişmesiyle FDM'nin erime ve katılaşma periyodundaki değişimi belirlemişlerdir, buradan ısı değiştirici tüpün dikey pozisyona oranla yatay pozisyonda daha kararlı faz değişim özellik gösterdiğini belirlemişlerdir.

Sarı ve Kaygusuz (2002b) Palmitik asidin enerji depolama için FDM olarak kullanılabilirliğini, performansını ve ısı transfer karakteristiklerini araştırmışlar ve elde ettikleri sonuçları literatürdekilerle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada FDM

olarak palmitik asidin faz değişim kararlılığı üzerine ısı akış hızının etkisi, katı-sıvı ara yüzeyinin büyümesi, geçiş sıcaklığı ve geçiş zamanları gibi parametreler araştırılmıştır. Deneyler sonucunda erime işleminde sıvı fazda taşınım (konveksiyon) yoluyla ısı transferinin daha etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Jaw vd. (2000) polimerler, dispersantlar, çözücüler ve plastikleştiriciler gibi organik proses katkı maddelerini çoğunlukla seramik taşlarının oluşum kapasitelerini artırmak için kullanmışlardır. Bu tür katkı maddelerini sonraki ısı işlemleri boyunca bileşenin yoğunlaştırılmasından önce tamamen uzaklaştırılması gerektiğini belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada; stearik asit, parafin wax ve polivinil butirat gibi bağlı sistemlerin termal ayrışma davranışlarını DTA (Diferansiyel Thermal Analiz)/ TG (Thermal Gravimetry) metotlarını kullanarak belirlemişlerdir.

Kauranen vd. (1991) pratik güneş ısıtma uygulamaları için FDM seçiminde özel depolama sıcaklığının önemli bir kriter olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada iklim Şartlarına göre erime sıcaklıklarını ayarlanabilen karboksilik asit karışımları hazırlayarak yeni bir uygulama geliştirmişlerdir. FDM'yi duvar dizaynında kullanarak metodu endüstriye uygulamışlardır.

Hasan (1994) yaptığı çalışmada FDM olarak stearik asidin kullanıldığı basit iç içe geçmiş iki borudan oluşan bir enerji depolama sistemi üzerinde çalışarak böyle bir sistemin ısı transfer özelliklerini ve FDM'nin faz geçiş sıcaklık aralığını deneysel olarak belirlemiştir. Erimenin radyal konumda ısı transfer borusundan dışarı doğru geręekleřtięini, aksenal yönde ise FDM tüpünün altından yukarıya doğru geręekleřtięini belirlemiştir, ayrıca böyle bir sistemde erime hızının erimiş FDM içinde konveksiyonun artmasıyla arttığını belirlemiştir. Isı transfer hızı ve buna bağlı olarak faz geçiş zamanının su giriş sıcaklığının değişmesiyle değişebileceğini belirlemiştir. Daha hızlı bir faz geçiş hızı gözlemek için ısı değiştiriciyi dikey pozisyondan ziyade yatay pozisyona yerleştirilmesi gerektiğini belirlemiştir.

Sarı ve Kaygusuz (2001b) yapmış oldukları bir çalışmada FDM olarak laurik asidin kullanıldığı ısı depolama sistemi içindeki termal ve ısı transfer karakteristiklerini belirlemişlerdir. Laurik asidin erime ve katılaşma periyotlarını iç içe geçmiş dikey çift borulu bir enerji depolama sistemi kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada üç önemli konuyu vurgulamışlardır. İlki, faz değişim işlemi boyunca FDM içindeki radyal ve aksenal konumlardaki zamana ait sıcaklık değişimlerini ve sıcaklık dağılımlarını belirlemişlerdir. İkincisi, toplam erime ve katılaşma sürelerini içeren termal

karakteristikliklerini, erimiş ve katılaşmış FDM'nin ısı transfer doğasını ve faz geçiş parametreleri üzerine ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı gibi Reynolds ve Stefan sayılarının etkisini belirlemişlerdir. Son olarak ise, ısı transfer akışkanını ve ısı akış hızlarını hesaplamışlar ve ısı transfer parametreleri üzerine Reynolds ve Stefan sayılarının etkilerini incelemişlerdir.

Natalia vd (2001) yapmış oldukları deneysel çalışmada FDM olarak kaprik-laurik asit-pentadekan kombinasyonunun performansını soğutma uygulamaları için araştırmışlardır. FDM olarak %65 kaprik asit ve %35 laurik asidin ötektik bir karışım oluşturduğunu, erime noktasının  $18^{\circ}\text{C}$  olduğunu bu nedenle soğutma uygulamaları için oldukça kullanışlı olduğunu belirlemişlerdir. Bu ötektik karışımın erime noktasını pentadekan ilavesiyle  $9,9^{\circ}\text{C}$ 'ye düşüğünü belirlemişlerdir. Değişik bileşim oranlarında hazırlanmış pentadekan katılmış kaprik-laurik asit karışımlarının DSC'lerini alarak termal özelliklerini araştırmışlardır. Hazırlanan bu karışımların her birinin termal özelliklerini değişik eksenel ve radyal konumlara yerleştirilen termo elemanlarla belirlemişlerdir. Sonuçta, laurik-kaprik asit karışımına 90:10 oranında pentadekan katılmasının kaprik-laurik asit ötektik karışımının erime karakteristiklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir.

Bo vd. (1999) yapmış oldukları deneysel çalışmada soğutma amaçlı depolama uygulaması olarak bölgesel soğutma sistemlerinde FDM olarak tetradekan ve hegzadekan ikili karışımlarının termal davranışlarını incelemişlerdir. Soğuk depolama sistemlerinde kullanılan faz değişim maddeleri düşük bir sıcaklık aralığına ve duyulur ısı depolamayla karşılaştırıldığında FDM'nin erime ve katılaşmasında yüksek bir erime yoğunluğuna sahip olması gerekir. Bu şekilde depolama hacminden, ısı kaybından ve ekipman büyüklüğünden avantaj sağlanacağını belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada hegzadekan, tetradekan ve bunların bazı ikili karışımlarının donma noktası, füzyon ısısı, termal kararlılık ve faz değişim işlemi boyunca ki hacim genişlemesi gibi ısıl özelliklerini ve soğuk depolama için kullanılabilme potansiyellerini araştırmışlardır. Sonuçta bu maddelerin FDM olarak soğuk depolama için iyi birer faz değişim maddesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

Natalia vd. (1998) yapmış oldukları deneysel çalışmada düşük sıcaklık termal depolama uygulamaları için FDM olarak kaprik-laurik asit karışımını kullanmışlardır. DSC analiz tekniğini kullanarak bu asit karışımlarının literatürde var olan farklı kombinasyonlarıyla karşılaştırmışlardır ve termodinamik, fiziksel ve diğer kinetik özelliklerini belirlemişlerdir. 120 çevrim boyunca maddenin erime sıcaklığının  $11,63^{\circ}\text{C}$  olduğunu ve maddenin fiziksel olarak kararlı olduğunu belirlemişlerdir.

Zhang vd. (2000) yağ asitlerinin ikili karışımlarının katı-sıvı faz geçişleri üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Değişik sıcaklıklardaki laurik asit, palmitik asit ve stearik asit ile bunların ikili karışımlarının termal ve yapısal özelliklerini DSC ve IR teknikleri ile belirlemişlerdir. Bu yağ asitlerinin ikili karışımlarının katı-sıvı faz geçiş sıcaklıklarını  $32,84 \pm 0,71$  °C ve  $\Delta H$  değerlerini 146,5-195,1 J/g olarak belirlemişlerdir. Yağ asitlerindeki katı-sıvı faz geçişlerinin moleküller arası hidrojen bağlarıyla ilgili olduğunu belirlemişlerdir.

Sarı ve Kaygusuz (2002c) yapmış oldukları başka bir çalışmada laurik ve stearik asitten oluşan ikili (ötektik) bir karışımı eş merkezli halka şeklindeki iki boru arasına yerleştirerek o karışımın termal performansını deneysel olarak belirlemişlerdir. Yapılan bu çalışmada, laurik ve stearik asidin ötektik karışım oranı ve DSC analiz tekniğiyle de ısı özellikleri belirlendi. Toplam erime ve katılaşma zamanları ile FDM'nin erime ve katılaşma işlemleri süresince ısı transfer modlarını, Reynolds ve Stefan sayılarının etkileri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, ısı transfer borusunun dış yüzeyi ile FDM arasındaki ısı transfer katsayısı ve karışımın erime ve katılaşma periyotlarındaki ısı fraksiyonu da belirlenmiştir.

Banu vd. (1998) faz değiştiren gizli ısı depolama maddelerinin depolama kapasitelerini belirlemek için DSC ve geniş ölçekli termal testlerin uygulanmalarını incelemişlerdir. Faz değiştiren maddenin alçı taşına %20 oranında katılmasıyla elde edilen karışımın iyi bir enerji depolama maddesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir. Bu tür duvar kaplamalarının performanslarının en iyi şekilde DSC analizleriyle incelenebileceğini fakat daha ayrıntılı sonuçlar elde etmek için geniş ölçekli termal testlerin uygulanması gerektiğini belirlemişlerdir.

Watanabe (1993) hızlı şarj ve deşarj oranlı bir gizli ısı depolama modülü geliştirmişlerdir. Bu tür ısı depolama modülünü farklı erime sıcaklığında üç çeşit FDM ile doldurulmuş yatay silindirik kapsüllerden oluşturmuşlardır. Ayrıca bu depolama modülünün geçici davranışını tahmin etmek için bir nümerik analiz yöntemi geliştirmişler ve modelin hem deneysel hem de nümerik sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Xiao vd. (2001) yapmış oldukları deneysel çalışmada, parafini termoplastik bir elastomerle (stiren-butadien-stiren) birleştirerek sıcaklığın parafinin erime sıcaklığı üzerine çıktığı zaman bile bir katı hal içinde aynı biçimde kalabilen kararlı yapıdaki FDM'leri incelemişlerdir. Kararlı yapıdaki bu FDM'ler parafinler gibi aynı faz geçiş karakteristikleri sergiledikleri ve gizli ısılarının parafinin gizli ısılarının %80 ine kadar

uzandığını belirlemişlerdir. Kararlı yapıdaki FDM'nin termal iletkenliği grafitin içine katılmasıyla önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir.

Banaszek vd. (1999) yaptıkları deneysel araştırmada gizli ısı enerji depolama sisteminde dikey sarmal bir ısı değiştirici kullanımı üzerine yeni bir metod geliştirmişlerdir. Bu yaptıkları çalışmada iki önemli konuyu açıklamışlardır. Birincisi sarmal bir kanal içinde bir akışkanın akışıyla çift taraflı ısıtma ve soğutma süresince izotermal olmayan katı-sıvı faz değişim etkisi altındaki bir faz değişim ortamının zamana göre davranışları. İkincisi ise enerji yükleme ve boşaltma işlemleri süresince *Arshimeds*'in sarmal geometrisinin parafin wax-hava termal enerji depolama ünitesinin zamana göre ısı özelliklerinin analizidir. Çalışmada her iki ortamın sıcaklık değişimleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Zamana göre enerji depolamada tüm yükleme hızı, yükleme ve boşaltma işlemlerinin toplam süresi ve depolama ortamının erime ve katılaşma fazlarının zamanla değişimi araştırılmıştır.

Velraj vd. (1999) gizli ısı enerji depolama sisteminde ısı transferini iyileştirme metotlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, güneş enerjisi ısı depolama tekniklerinin ekonomik ve ticari yönden kabul edilebilmelerinin enerji depolama sistemlerinin etkili bir şekilde dizayn edilmesine ve geliştirilmesine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek enerji depolama kapasitesi olan çoğu FDM'nin kabul edilemeyecek kadar düşük iletkenlikleri vardır. Bu nedenle her hangi bir gizli ısı depolama uygulamaları için ısı transfer iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada gizli ısı termal depolama sistemleri için çeşitli ısı transferi iyileştirme teknikleri araştırılmıştır. Isı transferini iyileştirmek için 3 farklı deneme yapılmıştır.

Farid vd. (1999) bilgisayar simülasyonu yardımıyla FDM kullanarak binaların zemin altından elektrikle ısıtılmasını teorik olarak çalışmışlardır. Enerji, ihtiyacın en fazla olduğu zamandan en düşük olduğu zamana değiştiğine göre enerjiyi istenildiği zaman kullanmak için ısı depolama uygulamalarına ihtiyaç vardır. Yaptıkları çalışmada zeminin ısı transfer özelliğini yapısını artırmak için zemin tuğlalarıyla ısıtıcı yüzey arasına yerleştirilen bir FDM'nin ısı performansını incelediler. Ayrıca bu prensibin evin çatı ve duvarlarına uygulanabileceğini de araştırdılar. Yeterli miktarda ısı depolama sağlamak için bir gün süreliğine, 30 mm kalınlığında erime noktası 40 °C civarında olan bir FDM'nin kullanılmasının yeterli olacağını belirlemişlerdir. Simülasyon çalışması yüksek erime sıcaklığına sahip bir depolu ısıtıcının zemin altı ısıtma için daha uygun olduğunu göstermiştir.

Beasley ve Ramanayaraya (1989) faz değiştiren maddeyi içeren küre şeklinde paketlenmiş bir yatağın ısıl özelliklerini hesaplayan bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmayla tek boyutlu ayrılmış bir fazın oluşunu keyfi başlangıç koşulları ve giren akışkanın zamana göre sıcaklık değişimleri için sıvının ısı transfer akışına maruz kalan bir yatağın dinamik tepkisinin nümerik bir analizini geliştirmek amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada Faz değişim modelleri izotermal olan ve izotermal olmayan erime davranışları için geliştirilmiştir. Çalışmada hem enerji depolama hem de kesit periyotları için ticari türde enerji depolama sistemlerinin modelleri teorik olarak incelemişlerdir.

Royon vd. (1997) düşük sıcaklıkta ısı depolama için yeni bir maddeyi deneysel olarak incelemişlerdir. Bu madde poliakrilamid gibi çapraz bağlı bir polimerle suyun kararlı bir karışımıdır. Bu maddenin termofiziksel özellikleri hakkında ayrıntılı kantitatif bulgular verilmiştir. Bu parametreler sınırlı boyuttaki kalın bir tabaka önünde ilerleyen bir faz değişimini tarif eden teorik bir yaklaşım içinde verilmiştir. Maddenin erimesi ve katılaşması sırasında alınan teorik sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sergilediği deneysel olarak gözlemlenmiştir.

Farid vd. (1998) dikdörtgen şeklindeki bir depoda faz değiştiren madde olarak dimetilslfoksitin soğuk depolama için kullanımını araştırmışlardır. Kullanılan havanın zamana göre giriş ve çıkış sıcaklıkları ve FDM'nin içindeki sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. İki boyutlu ısı iletim eşitliği nümerik olarak FDM'nin iki fazındaki sıcaklık dağılımlarının belirlemek için çözülmüştür. Hem FDM hem de hava için model tahmini ve deneysel olarak ölçülen sıcaklıklar arasında iyi bir uyumum olduğu gözlemlenmiştir. Soğutma amaçlı depolama için yapılan deneyler, hemen hemen beş saatlik bir ısı kullanımını için ısı değişiminin FDM içindeki konveksiyon etkisi nedeniyle iki saat olduğunu göstermiştir.

Kardelli vd. (2000) Modüllü Adyabatik Tarama Kalorimetresi'yle (MASC) n-dodekanın katı-sıvı faz geçişini deneysel olarak incelemişlerdir. Bir n erime bölgesinin varlığı ve tarama hızı üzerine erime eğrisinin bağlılığı gibi erimenin iyi bilinen özellikleri; erime eğrisinde oluşturulamayan küçük ikincil bir pikin varlığı gibi daha önce hiç ifade edilmeyen bu durumu dikkate alarak faz geçişini incelemişlerdir. Bu sonuç  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ K s}^{-1}$  den daha düşük hızlardaki tarama hızlarında çalışarak elde etmişlerdir. Hem sürekli tarama modunda hem de yarı izotermal modunda sıcaklık modülasyonu ve erime kinetiğinin açıklayıcı bir özelliğini elde etmede kullanmışlardır. Ölçülen geçiş entalpi değerleri

literatürdekilerle karşılaştırıldı. n- Dodekanın erime eğrisindeki iki piki analiz ettiler ve 2. pikin mümkün olan açıklamalarını yaptılar.

Cho ve Choi (2002) donma ve erime işlemleri süresince parafinin ısı enerjisi depolama özelliklerini incelemişlerdir. Deneyle n-tetradekan ve n- tetradekan (%40) – n- hekzadekan (%60) ve suyun bir karışımı olan parafinlerle gerçekleştirdiler. Parametreler olarak FDM ısı depolama sisteminde erime işlemi boyunca başlangıç sıcaklığı ve donma işlemi boyunca girdi sıcaklığı ve Reynold sayılarını kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada depolama tankının ağzındaki bir kapsülün faz değişim periyodu depolama tankının ortasındaki bir kapsülden daha kısa olduğunu gördüler ve bunun nedeni olarak da merkezde depolama tankının ağzına oranla daha küçük gözeneklerin bulunmasını göstermişlerdir. Bilindiği gibi su, parafinden daha büyük bir aşırı soğuma özelliği gösterir. Su için boyutsuz depolama kapasitesinin 1'e ulaşması daha uzun zaman alır. Erime işlemi boyunca bu sürenin parafin için daha kısa olduğu belirlenmiştir. Parafin için ortalama ısı transfer katsayısı, erime ve donma işlemleri boyunca suyunkinden max %40 kadar daha fazla olabileceğini belirlemişlerdir.

Abhat (1983) düşük sıcaklıkta (0-120 °C ) gizli ısı depolayan FDM 'lerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini DSC analiz tekniğini kullanarak incelemiştir. Isı depolama maddelerinin erime ve donma karakteristikleri hakkında geniş bilgi elde edebilmek için FDM'lerin yapı malzemeleriyle uygunluklarını, ısı çevrim (erime-katılaşma) yapabilme yeteneklerinin ve performans sürelerinin belirlenmesinin esas olduğu sonucuna varmıştır.

Laroicx (1993) içinde ısı transfer akışkanının dolaştığı silindirler ve bu silindirlerin dış kısmına temas eden bir FDM'nin depolandığı bir ünite içindeki faz değişim davranışını inceleyebilmek için teorik bir model geliştirmiştir. Sonuçta ısı transfer akışkanının dolaşımında olduğu silindirlerin çaplarının, akışkan debisinin ve ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığının depolama ünitesinin performansını iyileştirmek için dikkate alınması gereken parametreler olduğunu ortaya koymuştur.

Hoogen ve Bart (1992) iç kısmına içinden su geçirilen silindirik boruların yerleştirildiği 400 litrelik bir kaptaki gizli ısı 150 kJ/Kg, katılaşma sıcaklığı 40-44 °C olan 300 Kg lık bir parafin maddesini FDM olarak kullanmışlardır. FDM içerisine parafinin hacminin %1,6 sını kadar hacimde bir metal kafes (ısı iletimini artırmak için) yerleştirmişlerdir. Böylece borularda akan suyun ölçülen ve hesaplanan çıkış sıcaklığını zamanın bir fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. Sonuçta; parafin türü maddelerin en önemli dezavantajı olan düşük termal iletkenlik faktörünün, ısı transferini artırmak amacıyla FDM

içerisine bir metal kafes kullanılmasıyla termal iletkenlik faktörünün artırılabilirliğini belirlemişlerdir.

Das ve Dutta (1993) faz değişim materyali olarak parafin wax kullandıkları deneysel çalışmada; içteki borudan geçen ısı transfer akışkanı (su) vasıtasıyla FDM nin eriyip katılaşmasını sağlamışlardır. Böylece katı ve erimiş wax arasındaki ısı transfer hareketini deneysel olarak belirlemişlerdir, ve kurdukları matematiksel modelden elde ettikleri teorik çözümle karşılaştırmışlardır. Sonuçta erime zamanının Rayleigh sayısına bağlı olarak doğal konveksiyona bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmaya göre; Rayleigh sayısı ne kadar artarsa doğal konveksiyon miktarı o kadar artar ve erime zamanı da o kadar azalır. Yani suyun sıcaklığı artırılarak erime miktarının artırılması ve böylece ısı transfer katsayısını artırarak zamanın azaltılmasının mümkün olduğunu belirlemişlerdir.

Ghoneim vd. (1991) yaptıkları çalışmada faz değişim materyalini bina duvarlarında enerji depolama amacıyla kullanmışlardır. FDM olarak  $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , medikal parafin ve P-116 wax kullandıkları bu çalışmayla FDM'nin depolandığı ve hem güneş kolektörü hem de ısı depo olarak görev yapan bu duvarların kalınlık ve hacim açısından duyulur depoların kullanımına alternatif olabileceğini göstermişlerdir. Sonuçta FDM'lerin pasif güneş sistemleri için uygun malzeme olarak kullanılabilirliğini, FDM'lerin konulduğu kapların uzun süre dayanıklılığını koruyabilmesi için FDM ile kimyasal uyum göstermeleri gerektiğine ve depolama maddesi ile bina arasındaki enerji alışverişi için etkili bir ısı transfer yüzeyi sağlamaları gerektiği sonucuna varmışlardır.

Velraj vd. (1996) yapmış oldukları deneysel çalışmada dairesel iki boruyu eş merkezli ve dikey olarak yerleştirdikleri bir düzenekte, faz dönüşüm materyali olarak parafin RT-60 kullanmışlardır. İçteki boruda bulunan FDM'nin içine ise dikdörtgen kesitli kanallar yerleştirmişlerdir. Böylece ısı transferinde gerçekleşen iyileşmeleri incelemişlerdir. Termal depolama sistemlerinin dizaynında boru çapı, yüzeydeki ani ısı akışı ve kanat sayısına karşılık gelen katılma yüzdesinin son derece etkili olduğunu görmüşlerdir. Kullandıkları kanatlar vasıtasıyla FDM'nin ısı iletkenliğinin birkaç kat daha arttığını belirlemişlerdir.

Das ve Dutta (1989) gizli ısı depolama maddesi olarak kullandıkları  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dik bir silindirik ısı depolama kabı içerisine, dikey bir boruda ısı transferi sağlamak için yerleştirmişlerdir. FDM eridiği sırada borudan FDM'ye olan ısı transferi miktarını ölçmüşlerdir. Sonuçta borudan malzemeye geçen ısının, erime sınır bölgesindeki konveksiyondan fazlaca etkilendiğini belirlemişlerdir.



S.Himran vd. 1994 yılında yaptıkları çalışmada düşük sıcaklık (298-323K) faz değiştirme uygulamaları için alkanlar ( $C_1-C_{100}$ ) ve parafin wax'larının özelliklerini incelemişlerdir. n-Alkan ailesinin gizli ısılarının, erime noktalarının, yoğunluklarının ve spesifik ısılarının geniş bir spektruma sahip olduklarının belirlemişlerdir. Parafin waxların dan alınan deneysel verileri analiz etmişlerdir.

#### 1.2.4. Faz değiştiren maddeler

##### 1.2.4.1. Yağ Asitleri ve Parafin Olmayan Diğer Organik Maddeler

Genellikle bu gurup yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikolleler gibi bir çok organik maddeyi kapsamaktadır. Literatürde erime aralığı 7-187 ve erime entalpisi 42-250 kJ/kg olan yaklaşık 70 civarında parafin olmayan organik maddeler faz değiştiren madde olarak araştırılmıştır (Lane, 1983).

Parafin olmayan organik maddeler

1. yağ asitleri
2. yağ asidi karışımları
3. diğer parafin olmayan organik maddeler olarak 3 sınıfa ayrılırlar.

Bu guruplardan yağ asitlerinin ısı değerleri parafinlerle karşılaştırılacak kadar yüksektir. Doymuş yağ asitlerinin tümü bir alkil gurubu ile ona bağlı bir karboksil gurubundan oluşmaktadır. Genellikle  $RCOOH$  yada  $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$  genel formülleri ile gösterilmektedirler. Oda sıcaklığında düşük karbon sayılılar sıvı halde bulunurken karbon sayısı arttıkça viskoziteleri artar ve daha yüksek karbon sayısında kristalin formda bulunurlar. Düşük karbon sayılı üyeler suda çözünürler ve zayıf asit özelliği gösterirler. Yağ asitlerinden FDM olarak genellikle aşağıdaki yağ asitleri kullanılmaktadır;

n-Kaprik asit (dekanoik asit);  $CH_3(CH_2)_8COOH$  kapalı formülüne sahip beyaz kristal halinde erime noktası  $31,6\text{ }^{\circ}C$  'dir suda çok az çözünür,(0,015 gr/100gr su,  $20\text{ }^{\circ}C$ ) fakat organik çözücülerde rahatlıkla çözünmektedir.

n-Laurik asit (dodekanoik asit);  $CH_3(CH_2)_{10}COOH$  kapalı formülünde, doğada palmitik ve stearik asitle birlikte en çok bulunan doymuş yağ asitlerinden biridir. Laurik asit erime noktası  $44,2\text{ }^{\circ}C$  olan kristalin bir katıdır, suda pratikçe hiç çözünmez (0,0055

gr/100gr su, 20 °C ), dietil eterde rahatlıkla çözünürken etanol ve propanolde pek çözünmez.

*Miristik asit (tetradekanoik asit);  $CH_3(CH_2)_{12}COOH$  kapalı formülünde, düşük oranda tüm bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunmaktadır. Beyaz kristalin yapıda ve erime noktası 53,9 °C dir. Organik çözücülerde rahatlıkla çözünürken suda oldukça az çözünmektedir (0,0020 gr/100gr su, 20 °C).*

*Palmitik asit (hekzadekanoik asit);  $CH_3(CH_2)_{14}COOH$  kapalı formülünde tüm hayvansal ve bitkisel yağlarda düşük oranda bulunmaktadır (%5 'den daha az). Waxlı yapıdadır suda hemen hemen hiç çözünmez (0,00072 gr/100gr su, 20 °C) fakat organik çözücülerde rahatlıkla çözünmektedir, ticari olarak %90 saflıkta satılmaktadır.*

Yağ asitleri parafin ve tuz hidratlara nazaran daha iyi uygun erime özellikleri sergilemektedirler, ayrıca yağ asitleri aşırı soğuma özellikleri sergilememektedirler (Sarı ve Kaygusuz, 2002a).

Yağ asitleri dışındaki diğer parafinik olmayan organik maddelerde yağ asitlerine benzer özellikler sergilemektedirler.

Enerji depolama ortamı olarak kullanılan parafin olmayan organik maddeler genellikle aşağıdaki özelliklere sahiptirler;

- 1) Yüksek füzyon ısıları vardır
- 2) Alevlenme özellikleri yoktur
- 3) Düşük termal iletkenliğe sahiptirler
- 4) Düşük oranda zehirlenme özelliğine sahiptirler
- 5) Yüksek sıcaklıklara dayanıksızdırlar

#### **1.2.4.2. Parafin Hidrokarbonlar (Alkanlar)**

Parafinler karbon sayısının  $n \geq 16$ , kimyasal formüllerinin  $C_nH_{2n+2}$  olduğu büyük oranda ağır hidrokarbonlardan oluşan mineral yağ (petrol) ürünleridir. Saf parafinler sadece alkanları içerirler. Serideki ilk dört alkan oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gazdırlar. 5 ile 17 karbon arasındaki bileşikler sıvıdırlar ve 17 karbon üzerindeki alkanlar ise oda sıcaklığında waxlı katılar halinde bulunurlar. Alkanların erime ve füzyon ısıları karbon sayısı artmasıyla artar.

Parafin waxları yaklaşık 20-30 C atomu içeren erime noktaları 30-70 °C arasında değişen az miktarda yapısında %2 ile %10 arasında izo ve/veya sikloalkanlar ve %0,1 ile %3 arasında yağ içeren düz zincirli parafinik hidrokarbonlardan oluşurlar. Erime noktaları 30-40 °C arasında olan waxlar match parafinler olarak bilinirler, erime noktaları 38-42 °C arasında olanlar yumuşak parafin wax'ları, erime noktaları 44-46 °C arasında olanlar orta sertlikteki parafin wax'ları ve erime noktaları 50-65°C arasında olanlarda sert parafin wax'ları olarak adlandırılırlar. Parafin wax'ları esas olarak n-alkanların karışımlarından oluşurlar. Bir parafin wax'ındaki normal alkan yüzdesi %75'i geçer ve hemen hemen %100'e ulaşabilir. n-Alkanların dışında parafin wax'larının geriye kalan kısmını çoğunlukla izo alkanlar, siklo alkanlar ve alkilbenzenler oluştururlar. Suntech P116 adlı %100 n-alkanlardan oluşan bir parafin wax'ı üretilmiştir, bu wax'ın termofiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi Tablo 1.4'de verilmiştir. Waxlar genellikle az veya çok dallanmış parafinik hidrokarbonları içeren karışımlardır. Parafin waxları'nın füzyon ısıları 34 kcal/kg ile 64Kcal /kg arasında değişir .

Moleküldeki atomların düzenlenmesiyle ortaya çıkan stearik etki yüzünden çift ve tek numaralı karbon atomları arasında bir fark vardır. Türdeş çift sayılılar türdeş tek sayılılardan daha yüksek gizli ısıya sahiptirler. Çift sayılı C atomlu alkanlar bu geçişi tek sayılı C atomlu alkanlara göre erime noktasına daha yakın bir bölgede sergilerler. Kafes geçişi, genellikle erime noktasının 2-5 K aşağısında sergilenir. Geçiş sıcaklığı ve erime noktası arasındaki bu fark moleküler ağırlığının artmasıyla azalır ve 36 C dan büyük C atomlu alkanlarda görülmez. Tablo 1.5'de ise alkanların C sayılarının artmasıyla kimyasal özelliklerinin değişimi verilmektedir.

Parafinler kullanışlı özelliklerinin yanında istenmeyen özelliklere de sahiptirler.

Bunlar;

- 1) Düşük termal iletkenliklere sahiptirler
- 2) Faz değişimi süresince büyük hacim değişimi sergilerler.
- 3) Alevlenme riskine sahiptirler.

Yukarıda bahsedilen olumsuz özelliklerin tamamı wax'ın ve depolama ortamının düzenlenmesiyle giderilebilmektedir. Faz değişim sonucu oluşan %10 civarındaki hacim artışı önemli bir sorun oluşturmaktadır.

Tablo 1.4. P116 Parafin wax'ın kimyasal bileşimi ve ısı-fiziksel özellikleri (Lane, 1983).

Hidrokarbon	Yüzde Ağırlığı (%)
n-C-20	2,0
n-C-21	5,5
n-C-22	14,0
n-C-23	23,0
n-C-24	22,0
n-C-25	14,0
n-C-26	6,5
n-C-27	3,0
n-C-28	2,5
n-C-29	2,0
n-C-30	1,7
n-C-31	1,5
n-C-32	1,3
Erime aralığı	316-329K
Erime ısısı	266 kJ/kg
Sıvı haldeki spesifik ısısı	2,51 kJ/kg.K
Katı haldeki spesifik ısısı	2,95 kJ/kg.K
Sıvı haldeki termal iletkenliği	0,24 W/mK
Katı haldeki termal iletkenlik	0,24 W/mK
Sıvı haldeki yoğunluk	760 kg /m <sup>3</sup>
Katı haldeki yoğunluk	818 kg /m <sup>3</sup>
Sıvı haldeki viskozite	1,90 kg \ms
Mol ağırlığı	332 g/mol

Tablo 1.5. FDM olarak kullanılan bazı Parafin waxlar'ının ısı-fiziksel özellikleri (Lane, 1983).

Hidrokarbon	Formülü	Kaynama nok. 3mmHg °C	Kapilerdeki Erime nok. °C	Yoğunluk 70 °C	Yoğunluk 90 °C	Kırılma İndisi D çizgisi		Moleküler Kırınım $\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{d}$ (90 °C)	Viskozite (poise)		
						70 °C	90 °C		70 °C	80 °C	90 °C
n-Heneicosan	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	179,8	40,3-40,4	0,7587	0,7468	1,4240	1,4166	99,46	0,0252	0,0212	0,0181
n-Tricosan	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	199,5	47,3-47,4	0,7654	0,7531	1,4270	1,4196	108,64	0,0312	0,0261	0,0220
n-Tetracosan	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	208,6	50,7-50,8	0,7682	0,7562	1,4283	1,4205	113,23	0,0346	0,0287	0,0242
n-Octacosan	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>	242,0	61,25-61,3	0,7759	0,7639	1,4324	1,4248	131,83	0,0501	0,0410	0,0340
n-Triacontan	C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	258,5	65,8-65,95	0,7795	0,7676	1,4342	1,4266	141,03	0,0604	0,0487	0,0404
n-Hentriacontan	C <sub>31</sub> H <sub>64</sub>	266,2	67,2-67,3	0,7827	0,7709	1,4354	1,4278	146,76	0,0660	0,0535	0,0437
n-Tetatriacontan	C <sub>34</sub> H <sub>70</sub>	285,4	72,6-72,7	-	0,7728	-	1,4296	159,65	-	0,0683	0,0514
n-Pentatriacontan	C <sub>35</sub> H <sub>72</sub>	292,3	74,4-74,5	-	0,7734	-	1,4301	164,38	-	0,0726	0,0557
n-Hekzatriacontan	C <sub>36</sub> H <sub>74</sub>	298,0	75,8-75,85	-	0,7783	-	1,4308	168,25	-	-	0,0589
n-Tetraacontan	C <sub>40</sub> H <sub>82</sub>	-	81,35-81,45	-	-	-	1,4326	-	-	-	-
n-Tetraacontan	C <sub>43</sub> H <sub>88</sub>	332,0	85,25-85,35	-	0,7812	-	1,4340	201,37	-	-	0,0872

### 1.2.4.3. Tuz Hidratlar

Tuz hidratlar kullanılan en önemli inorganik FDM'lerdendir. Genellikle sahip oldukları yüksek yoğunlukları, ideal ısıl özellikleri, düşük maliyetleri ve alevlenme riskleri olmadığı için genellikle tercih edilirler. Kullanılan tuz hidratların sahip oldukları faz değiştirme sıcaklık aralığı 0-150 °C arasındadır. Tuz hidratların tercih edilmelerine neden olan yukarıda bahsedilen olumlu özelliklerinin yanında yaygın olarak karşılaşılan uygunsuz erime, faz ayrılması güçlüğü, aşırı soğuma göstermeleri, korrozif olmaları ve kullanımlarının süreklilik göstermemeleri gibi istenmeyen özelliklere sahiptirler.

Erime esnasında açığa çıkan kristalizasyon suyu ortamdaki katı fazı çözmeye yetmediği için ve katı faz sıvı faza nazaran daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu için kabın alt kısmına çöker ve sonuçta faz ayrılması ve uygunsuz erime özellikleri ortaya çıkar.

Tuz hidratlardaki faz ayrımını ortadan kaldırmak için aşağıdaki işlemler uygulanabilir;

- Susuz tuzun çökmesini önlemek için koyulaştırıcı kullanmak
- Karıştırma, titreştirme gibi mekanik yöntemler uygulamak
- Fazla su ilave etmek
- Faz ayrımını azaltmak için FDM'yi kapsül içine koymak, fakat korozyonu

önlemek için kapsül kullanımında plastik kapsüller tercih edilmelidir.

Tuz hidratlardaki aşırı soğumayı önlemek için maddenin kristal yapısına benzer yapıdaki bir kristal, çekirdekleşmeyi hızlandırmak için ilave edilmelidir veya çekirdekleşmeyi hızlandırmak için kullanılan ısı değiştirici veya kapsüllerin yüzeyleri pürüzlü yapılarak aşırı soğuma ortadan kaldırılabilmektedir.

En çok üzerinde araştırma yapılan tuz hidrat  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  dır (Glouber tuzu). Yapılan uzun süreli çalışmalar sonucunda Glouber tuzunun sergilediği uygunsuz erime, kristalizasyon ve kullanımları sonucunda performanslarındaki düşüş gibi olumsuz özellikleri giderilmiştir. Glouber tuzunun fiziksel ve kimyasal özellikleri oldukça ilgi çekicidir. Bu tuzun erime sıcaklığı 32,4 °C, erime gizli ısısı 241 kJ/Kg ve uygun inorganik tuzlar ilave edilerek erime sıcaklığı 4 dereceye kadar düşürülebilir.

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  pasif solar ısıtma sistemleri üzerine çalışılan diğer yaygın bir tuz hidrattır. Erime noktası 29,8 °C dir ve fizyon ısısı 170 kJ/kg dır. Burada karşılaşılan uygunsuz erime dezavantajı  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{SrCO}_3$  ve  $\text{BaF}_2$  gibi çekirdekleştiricilerle giderilebilmektedir.

#### 1.2.4.4. Metaller ve Alaşımlar

Metaller ve alaşımların faz değiştiren madde olarak kullanılmalarının en büyük dezavantajları bazı hallerde maliyetlerinin yüksek olması ve depolama güçlüğü göstermelerine rağmen termal iletkenliklerinin çok iyi olmasıdır. Alaşımlarını çoğunun geçiş sıcaklıkları 343 ile 956 °C arasındadır, fakat metaller ve alaşımlar depolama ortamı olarak pek tatmin edici özelliklere sahip olmadıkları için kullanımları pek tercih edilmemektedir.

#### 1.2.4.5. Clathrate ve Yarı Clathrate Hidratlar

Bu sınıf maddeler son yıllarda termal enerji depolama ortamı olarak yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. Gerçek clathrate hidratlar, su ile güçlü bir şekilde etkileşmeyen komşu moleküller ve ana moleküller içinde kapalı boşluklar içeren sürekli olarak katı sulu yapıda olan moleküllerdir. Bu ana moleküller buz yapısında sürekli ve kararlı bir şekilde kalan moleküllerdir. Ayrıca direkt olarak su kafesi içine ana moleküllerin katılımıyla oluşan başka yapılar da vardır, bunlar yarı clathrate hidratlar olarak bilinir, bunlara amin hidratlar ile tetraalkil amonyum tuzları örnek verilebilir. Clathrate hidratlar 0 °C den daha yukarı erime noktalarına sahiptirler ve uygun erime özellikleri göstermektedirler. FDM olarak kullanılan bazı Clathrate hidratların termofiziksel zellikleri Tablo 1.6'de verilmektedir.

Tablo 1.6. FDM olarak kullanılan bazı Clathrate ve Yarı Clathrate hidratların termofiziksel özellikleri (Lane, 1983).

Madde	Erime nok. °C	Füzyon ısısı
<b>1.tür clathrate hidratlar</b>		
SO <sub>2</sub> .6 H <sub>2</sub> O (101,3 kPa)	7,0	247
SO <sub>2</sub> .6 H <sub>2</sub> O (233 kPa)	12,1	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O. 6.9H <sub>2</sub> O	11,1	
<b>2.tür clathrate hidratlar</b>		
C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O.17.2 H <sub>2</sub> O	4,4	255
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N.10.25H <sub>2</sub> O	5,9	239
<b>Tetrabutilamonyumtuzları</b> <b>Yarı clathrate hidratlar</b>		
Bu <sub>4</sub> NCl.32.H <sub>2</sub> O	15,7	
Bu <sub>4</sub> NN <sub>3</sub> .32.H <sub>2</sub> O	5,8	
Bu <sub>4</sub> NOH.32.H <sub>2</sub> O	30,2	
(Bu <sub>4</sub> N) <sub>2</sub> .C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> . 64.H <sub>2</sub> O	16,8	
<b>Tetraizoamilamonyum tuzları</b> <b>Yarıclathrate hidratlar</b>		
i-Am <sub>4</sub> NCl . 38 H <sub>2</sub> O	29,8	
i-Am <sub>4</sub> NCHO <sub>2</sub> . 40 H <sub>2</sub> O	15-20	

#### 1.2.4.6. Organik ve İnorganik Ötektikler

Bu sınıfa giren organik ve inorganik bileşiklerin belli yüzde oranlarıyla birleşmiş olan bu karışımlar sabit bir erime noktası göstermektedirler. Bu karışımların entropi değişimleri bileşenlerinin entropi değişimlerinin toplamına yaklaşık olarak eşittir. Tablo 1.7 Bazı organik ve inorganik ötektik karışımların erime noktaları ve füzyon ısıları verilmiştir.

Organik ötektik karışımlar olarak yağ asidi ötektik karışımları diğer FDM'lerden daha iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduklarından enerji depolama uygulamaları için tercih edilmektedir. Literatürde bu ötektik karışımların ısıl özelliklerinin incelenmesi için çok sayıda araştırma yapılmış, fakat bu maddelerin pratik amaçlar için enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar az sayıdadır. Bu çalışmada laurik-miristik asit ötektik karışımının ısıl özellikleri ve ısıl enerji depolama



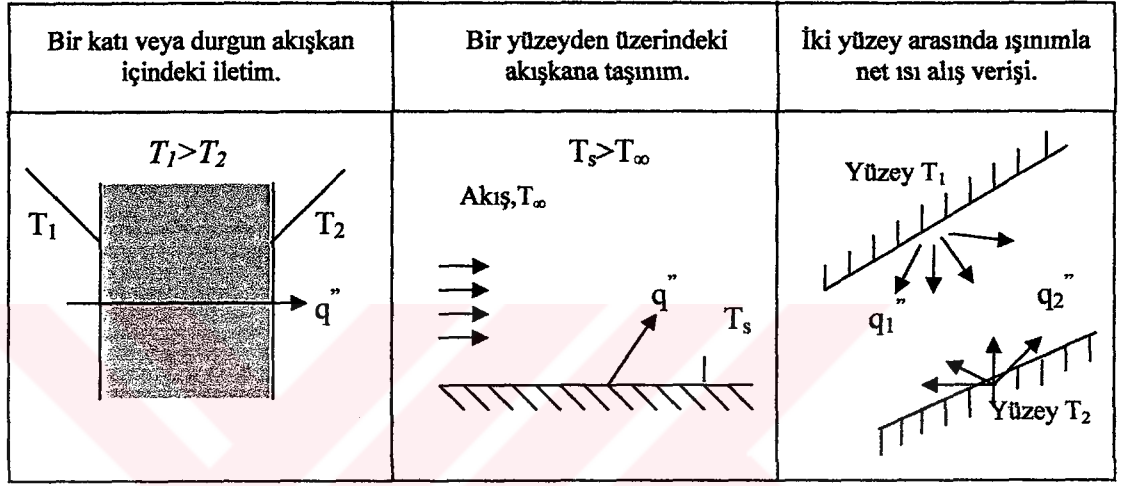
karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi için çalışma yapılarak bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1.7. Bazı organik ve inorganik ötektik karışımlar (Lane, 1983).

Madde	Erime nok. °C	Fizyon ısısı (kJ/Kg)
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (%47 + %33)	30,0	136
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (%58,7 + %41,3)	59,0	132,2
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (%53 + %47)	61,0	148
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3$ (%61,5 + %38,4)	52,0	125,5
$\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	25,0	95,0
Miristik asit + kaprik asit (%34 + %66)	24,0	147,7
Naftalin + benzoik asit (%67,1 + %32,9)	67,0	123,4
$\text{CH}_3\text{CONH}_2 + \text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$	65,0	120,0
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	46,0	95,0
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{Br}$ (%66,6 + %33,4)	76,0	123,4
Laurik asit + kaprik asit	18	120
Laurik asit + palmitik asit	33	145
Laurik asit + stearik asit	34	150
Palmitik asit + stearik asit	51	160

### 1.2.5. Isı Transferine Genel Bir Bakış

Isı geçişi veya ısı, sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımıdır. Ortam içinde veya ortamlar arasında bir sıcaklık farkı mevcut olan her durumda, ısı geçişi mutlaka gerçekleşir. Isı geçişi genellikle 3 temel yolla gerçekleşir. Şekil 1.3' de bu durumlar ifade edilmiştir.



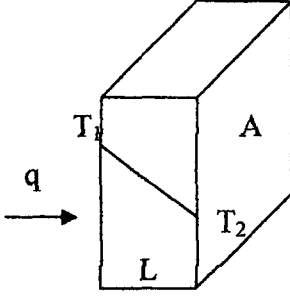
Şekil 1.3. İletim, taşınım ve ışınlımla net ısı alış verışı.

Katı ve akışkan bir durgun ortam içinde bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı geçişi için iletim terimi kullanılır. Buna karşın bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklara sahip ise aralarındaki ısı geçişi taşınım ile anılır. Isı geçişinin son türünde ise sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyle elektromagnetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıklara sahip iki yüzey arasında birbirlerini görmeye engel bir ortam yoksa, ışınlımla net ısı alış verışı gerçekleşir.

#### 1.2.5.1. İletim (Kondüksiyon)

##### 1.2.5.1.1. Düz bir yüzeydeki ısı transferi

Isı geçişinin bu türü atomik veya moleküler geçişlerle ilgilidir. Bir katının içerisinde kondüksiyonla ısı transferini göz önüne alalım.



Şekil 1.4. Düz bir yüzeydeki ısı transferi

Yukarıdaki şekilde transfer olunan ısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dL} \quad (1.4)$$

Bu ifadede kalınlığı  $L$ , olan alanı  $A$ , olan bir cismin iki yüzeyi arasındaki sıcaklıklar farklı olduğu durumda  $A$  yüzeyine dik bir yönde ısı transfer olacaktır. Bu ifadeye *Fourier kanunu* adı verilmektedir.

Burada ;

$Q$  : ısı ( kcal)

$A$ : yüzey alanı ( $m^2$ )

$t$  : zaman (saat)

$T$ : sıcaklık( $^{\circ}C$ )

$L$ : duvar kalınlığı (m)

$k$ : ( kcal ) ( m ) \ ( saat ) (  $m^2$  ) (  $^{\circ}C$  )

Eğer sıcaklık gradieni ( $\frac{dT}{dL}$ ) zamanla değişmemekte ise yani kararlı halde ise ısı transferi zamana göre sabittir.

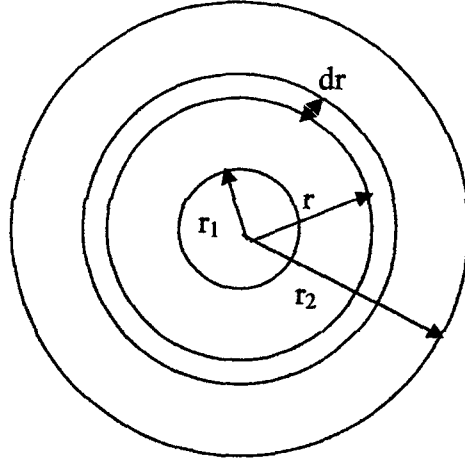
$$\frac{dQ}{dt} = \text{sabit} = q = -kA \frac{dT}{dL} \quad (1.5)$$

Eğer duvar yalıtkanla kaplanırsa ısı geçişi eşitlik 1.6 ve eşitlik 1.7 ile verilmektedir.

$$q = U.A.\Delta T \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \quad (1.7)$$

### 1.2.5.1.2. Silindirik Tabakalarda Isı Transferi



Şekil 1.5. Bir silindirdeki ısı transferi

Silindirin iç yarıçapı  $r_1$ , dış yarıçapı  $r_2$  ve uzunluğu  $N$  olsun. Silindirin yapıldığı malzemenin ortalama ısı iletkenlik katsayısı  $k_m$  olsun. Silindirin iç yüzeyinin  $T_1$  ve dış yüzeyinin  $T_2$  olduğunu düşünelim. Bu durumda *Fourier kanunu* aşağıdaki şekli alır.

$$q = -k \frac{dT}{dr} (2\pi rN) \quad (1.8)$$

$$q = \frac{k_m (2\pi N)(T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1.9)$$

1.9 ifadesi kalın çeperli silindirik borulardaki ısı transferini hesaplamak için kullanılır.

### 1.2.5. 2. Taşınım (Konveksion)

Taşınım ile ısı geçişi iki mekanizmadan oluşur. Rasgele moleküler hareket sonucundaki enerji aktarımının yanı sıra, akışkanın kitle ve makroskobik hareketleri ile enerji aktarımı olur. Bu akışkan hareketi her hangi bir anda çok sayıda molekülün

toplucu veya kümelenmiş olarak hareket etmesiyle ilgilidir. Bir sıcaklık gradyanı olması durumunda böylesi bir hareket ısı transferine katkıda bulunur. Konvektif ısı transfer katsayısı olan  $h_c$ , orantı sabiti olup ısı transfer hızını aşağıdaki şekildeki gibi etkilemektedir.

$$q_s = h_c \Delta T \quad (1.10)$$

Burada  $\Delta T = T_s - T_e$  dir.  $T_s$ , yüzey sıcaklığı,  $T_e$ , akışkan sıcaklığıdır.  $q_s$ , yüzeyden sıvıya ısı akışıdır ( $W/m^2$ ) ve ısı transfer katsayısı  $h_c$ 'dir. ( $W/m^2K$ ) Bu denklem Newton'un soğutma kanunu olarak adlandırılır.

Boru içindeki taşınımında  $\Delta T = T_s - T_b$  şeklinde alınır. Burada  $T_b$ , boru içindeki ortalama akışkan sıcaklığıdır. Eğer boru kendi boyunca uniform bir sıcaklık dağılımına sahipse ( $T_s$ ) ve akışta laminar ise ( $Re \leq 2300$ ) boru girişinden yeterince uzaktaki ısı transfer katsayısı aşağıdaki şekilde verilir;

$$h_c = 3,66 \cdot \frac{k}{D} \quad (1.11)$$

Burada  $k$  akışkanın ısı iletkenliği ve  $D$ , borunun çapıdır. Öte yandan tam türbülans akım için; ( $Re \geq 10000$ )  $h_c$ , eşitlik 1.12 ile hesaplanır.

$$h_c = 0,023 \frac{V^{0,8} k^{0,6} (\rho C_p)^{0,4}}{D^{0,2} \mu^{0,4}} \quad (1.12)$$

Laminar akışta  $h_c$ , borunun çapına bağlıyken, burada  $h_c$ , daha çok akışkan hızına bağlıdır. Burada  $V$ , viskozite,  $\rho$ , yoğunluk ve  $C_p$ , özgül ısıdır.

Taşınımın ısı geçişi, akışın türüne göre sınıflandırılabilir. Akış bir fan, bir pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi dış etkenlerle oluyorsa zorlanmış taşınım söz konusudur. Doğal taşınım ise akış akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından neden olan kaldırma kuvvetleriyle ilgilidir.

### 1. 2.5.3. Işınım ( Radyasyon )

Işıl ısıtım sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir. Işınım yayma cismin yapısından bağımsız olarak, cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişmelere yorumlanabilir. Mutlak sıfır noktasının üzerindeki sıcaklığa sahip her cisim enerji neşreder. Radyasyon elektromagnetik bir olaydır. Yüzeyin yaydığı bir ışınım yüzeyin sardığı ısı enerjisinden kaynaklanır. Birim zamanda birim yüzeyden serbest bırakılan enerji ( $W/m^2$ ) yüzeyin yayma gücü  $E$  dir. Yayma gücünün *Stefan-Boltzmann Yasası* ile tanımlanan bir üst sınırı vardır.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (1.13)$$

Burada  $T_s$ , yüzeyin mutlak sıcaklığıdır,(K)  $\sigma$ , *Stefan-Boltzmann sabitidir* ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ ). Böyle bir yüzey ideal ışınım yayan bir yüzeydir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Faz Değiştiren Maddeler

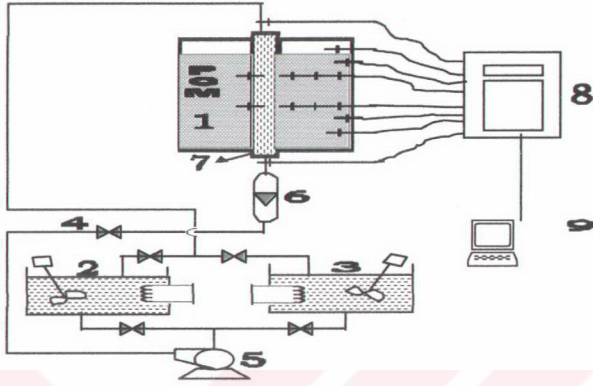
Sigma firmasından temin edilen laurik asit ve miristik asidin bir ötektik karışımı hazırlanarak deneyler gerçekleştirildi. Deneylerde kullanılan bu maddelerin saflık dereceleri ve DSC analizleriyle belirlenen ısı özellikleri aşağıdaki tabloda kimyasal özellikleri ile birlikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Kullanılan laurik ve miristik asit birim ağırlık başına yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduklarından deneylerde tercih edilmişlerdir. Genellikle FDM'lerle yapılan enerji depolama uygulamalarında düşük sıcaklık tercih edildiğinden erime noktaları bu maddelerinden daha düşük olan ötektik bir karışımı hazırlanmıştır.

Tablo 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan faz değişim maddelerinin enerji depolama ve kimyasal özellikleri

Maddenin adı	Kapalı formül	Erime sıcaklığı, (°C)	Erime entalpisi (J/g)	Spesifik ısı (J/g.°C)		Saflık derecesi
				kati halde	sıvı halde	
Laurik asit	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	42,6	176,6	1,89	2,12	%98
Miristik asit	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	52,2	182,6	2,10	2,22	%98

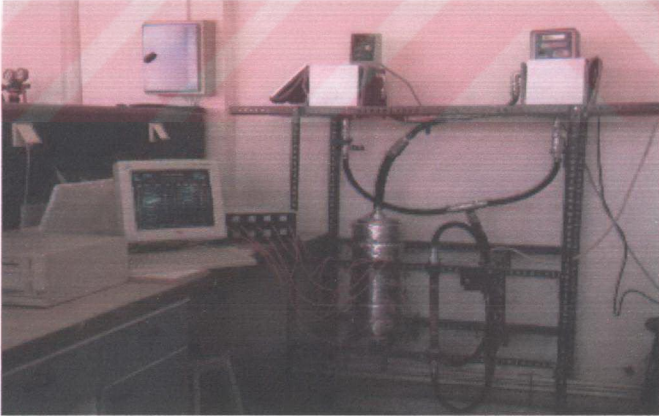
### 2.2. Deney Düzenegi

Deneylein yapıldığı düzenek Gaziosmanpaşa Üniversitesi Kimya Bölümü Fizikokimya Araştırma Laboratuvarında kuruldu. Kullanılan deney düzenegi esas olarak sekiz bölümden oluşmaktadır. Bunlar FDM nin konulduğu enerji depolama ünitesi, iki adet sabit sıcaklık banyosu, akışmetre, sirkülasyon pompası, Suyun debisini ayarlayan vanalar, bağlantı boruları, veri toplayıcı (data logger) ve verileri ekrana yansıtan ve depolayan bilgisayar sisteminden oluşmaktadır. Bu parçaları içeren deney düzeneginin şematik görünümü ve fotoğraf görüntüsü Şekil 2.1. ve Şekil 2.2. de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

- 1) Faz değişim maddesi, 2-3) Sabit sıcaklık banyoları, 4) Kontrol vanası, 5) Sirkülasyon pompası, 6) Akışmetre, 7) Isı taşınım tüpü, 8) Data kaydedici, 9) Bilgisayar, +) Sıcaklık ölçüm probu



Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğraf görüntüsü.



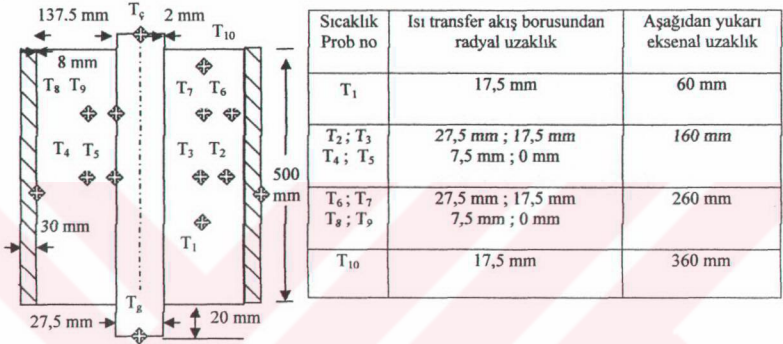
### 2.2.1. Enerji Depolama Ünitesi

Deney düzeneğinin bu kısmı enerji depolama özellikleri belirlenecek olan laurik asit ve miristik asidin ötektik karışımının konulduğu iç içe geçmiş iki adet metal borudan oluşan bir ünedir. Bunlardan dıştaki boru, demirden yapılmış 500 mm uzunluğunda 125 mm çapında ve 6 mm et kalınlığındadır (ısı iletkenliği 51,9 W/m.°C). İçteki boru ise 550 mm uzunluğunda, 27,5 mm çapında ve 2 mm et kalınlığında ve bakırdan yapılmıştır (ısı iletkenliği 387 W/m.°C). Bakır borunun içerisinde ısı transfer akışkanı olarak su geçirildi. İki boru arasına ise ısı özelliği incelenecek olan ikili (ötektik) karışım (FDM) dolduruldu, fakat erime esnasında oluşabilecek muhtemel hacim genişlemesi nedeniyle deponun 1/5 lik kısmı boş bırakıldı. Depolama ünitesinden erimiş FDM nin sızmasını önlemek için sızdırmazlık elamanı ile deponun alt ve üst kısımları izole edildi. Sistemden çevreye yayılacak olan ısı kayıplarını ortadan kaldırmak için enerji depolama ünitesi 30 mm kalınlığındaki cam pamuğu ile yalıtıldı. Enerji depolama ünitesinin belirli radyal ve eksenel noktalarına erime ve katlaşma karakteristiklerini inceleyebilmek için 14 adet termo elaman sisteme yerleştirildi. Alınan radyal mesafeler ısı transfer akışkanının geçtiği bakır boruya olan uzaklığa ve eksenel mesafeler ise ünitenin alt kısmından olan uzaklığa göre belirlenmiştir.

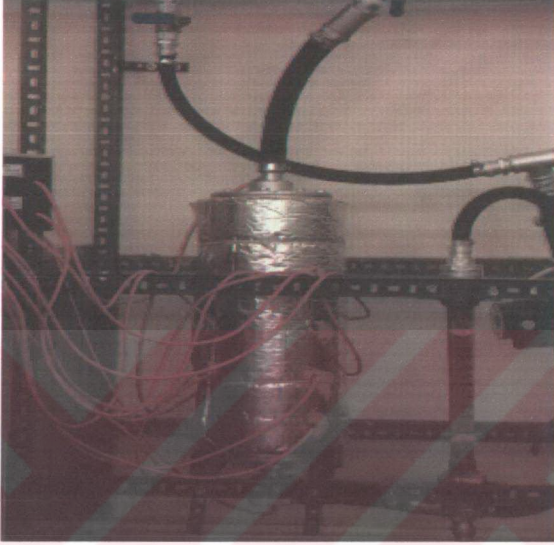
### 2.2.2. Sıcaklık Problemleri (Termoelemanlar)

Enerji depolama ünitesinin farklı eksenel ve radyal bölgelerine sıcaklık problemleri yerleştirilerek FDM 'nin bu noktadaki erime ve katlaşma periyotlarına bağlı sıcaklık değişimleri incelendi. Kullanılan bu termoelemanlar LM 335 H isimli sıcaklık sensörlerinin 10 mm, 20 mm, 30 mm, 37,5 mm, ..., gibi farklı boylardaki pirinç malzeme içerisine yerleştirilerek oluşturuldular. Bu sıcaklık problemleri 0,01 °C hassasiyetle 0-100 °C aralığında kullanılabilir. Enerji depolama ünitesine Şekil 2.3'de görüldüğü gibi 14 adet termo eleman monte edilmiştir. Bunlardan T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> ve T<sub>8</sub> FDM'nin içerisinde farklı radyal ve eksenel mesafelere, T<sub>5</sub> ve T<sub>9</sub> ısı transfer akışkan borusunun sıcaklıklarının belirlenmesinde, T<sub>10</sub> FDM içerisindeki hava sıcaklığının belirlenmesinde, T<sub>8</sub> ve T<sub>ç</sub> sırasıyla ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığını ve çıkış sıcaklığını belirlemek

için ve kalan iki prob ise enerji depolama ünitesinin izolasyonlu ve izolasyonsuz yüzeylerinin sıcaklıklarını belirlemek için yerleştirildi. Kullanılan bu problemlerin tamamı Şekil 2.4 deki gibi kablolar yardımıyla veri toplayıcıya (data logger) bağlanmışlardır.



Şekil 2.3. Enerji depolama ünitesinin ve sıcaklık problemlerinin yerleşim düzeninin şematik görünümü



Şekil 2.4. Enerji depolama ünitesinin ve sıcaklık probleminin yerleşim düzeninin fotoğraf görüntüsü.

### 2.2.3. Veri Toplayıcı Sistem (Data logger)

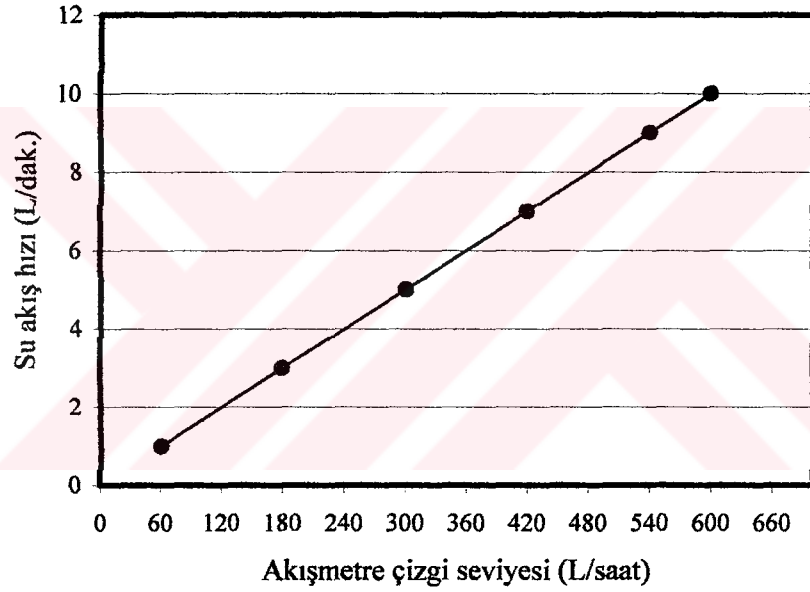
Bu sistem yardımıyla 14 adet probtan alınan sıcaklık sinyalleri 12 bitlik ADC karta aktarılarak bu kart yardımıyla gelen sinyaller mili volttan Celcius derecesine çevrilmektedir. Kullanılan data logger'a 16 adet termo eleman bağlanabilmektedir.

### 2.2.4. Akışmetre (Debi ölçer)

FDM yi eritmek ve katılaştırmak amacı ile gönderilen ısı transfer akışkanının debisini ölçebilen 640  $\frac{1}{4}$  l/saat kapasiteli bir akış metre kullanıldı. Akışmetre kullanılmadan önce kalibre edildi;

Debimetre kalibre edilirken debimetre üzerindeki ölçülerden 1, 3, 5, 7, 9, ve 10 L/saat debiye ayarlanarak saatte kaç litre su akıttığı bulundu ve sonra akışmetre çizgi seviyesine karşılık su akış hızı grafiğe geçirilerek debimetre kalibre edildi.

L/saat	Akış hızı
60	1
180	3
300	5
420	7
540	9
600	10



Şekil 2.5. Debimetre kalibrasyon grafiği

### 2.2.5. Sirkülasyon Pompası

Alarko (PV0-25) markalı, ısı transfer akışkanının istenilen debide ayarlanabilmesi için gerekli olan suyun sirkülasyonunu sağlayan sistemin parçasıdır.

### 2.2.6. Sabit Sıcaklık Banyoları ve Diğer Elemanlar

Faz Değişiren Maddenin erimesini sağlayan sıcak su deposu ve katılaşmasını sağlamak için soğuk su depolarından oluşan iki adet depo kullanılmıştır. Bu depolar 600 mm×250 mm×200 mm ebatlarında çelik malzemelerden yapılmışlardır. Deneyler sırasında ısı transfer akışkanı olarak kullanılan suyun sıcaklığı kontrollü ısıtıcılarla istenilen değere ayarlandı. Sistemde ayrıca su akışını kontrol edebilmek için vanalar kullanıldı ve sistemdeki elemanların tamamı çelik raf üzerine monte edilerek sistem tamamlandı.

### 2.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analiz Tekniği

Enerji depolama karakteristikleri incelenecek olan laurik asit (LA) ve miristik asit (MA) karışımının hangi kütlelesel bileşim oranında ötektik bir bileşik oluşturduğu belirlendi. Bu işlem için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ısıl analiz tekniği kullanıldı. Farklı bileşimlerde hazırlanan LA-MA karışımlarının erime sıcaklık aralıkları, erime gizli ısıları DSC yöntemi ile belirlendi. Analizde kullanılan DSC cihazının teknik özellikleri ve analiz şartları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. DSC analiz cihazının teknik özellikleri ve ısıl analiz şartları.

<i>DSC analiz cihazının teknik özellikleri</i>	
Marka	General V4 1C DuPont 2000
Sıcaklık aralığı	(-180) – 600 °C
Numune kapları	Alüminyum
Diferansiyel termoçift	Cr-Al / Al
Kalorimetrik algılama	0,05 – 50 m cal/s
Kalorimetrik hassasiyet	± % 0,1 (metal numunelerde)
<i>Isıl Analiz Şartları</i>	
Numune miktarı	4-6 mg.
Ölçüm ortamı	Azot Atmosferi
Isıtma hızı ve aralığı	5 °C /dak. – 20-80 °C

Diferansiyel taramalı kalorimetre analiz tekniği numune ve referansa ısı akışı arasındaki farkı, kontrollü bir sıcaklık programını uygulayarak sıcaklığının fonksiyonu olarak inceleyen ısı bir yöntemdir. Diferansiyel taramalı kalorimetre, ölçüm metoduna göre “güç dengeli” ve “ısı akışlı” olmak üzere iki tiptir. Bu çalışmada General V4. 1C. DuPont 2000 markalı ve “ısı akışlı” bir DSC cihazı kullanıldı. Bu tip cihazda analiz işlemi esnasında, numune ve referans maddelerine ait ısı akış hızları, elektriksel olarak ısıtılan termoelektrik disk üzerinden sağlanır. Alüminyumdan yapılmış küçük tepsilere numune ve referans yerleştirilip, disk üzerindeki yükseltilebilen platformların üzerine konur. Isı, diskler üzerinden tepsilere, oradan da numune ve referansa aktarılır. Numune ve referansa diferansiyel ısı akışı krom termoçiftleri ile izlenir. İki tepside diferansiyel ısı akışı her iki termoçiftin çıkışlarındaki fark ile doğru orantılıdır. Numune sıcaklığı numune diskinin altındaki krom/alumel bağlantısı yardımıyla tayin edilebilir. Yapılan analiz işlemi sonucunda elde edilen termogramda, yatay eksen numune sıcaklığını, düşey eksen ise ısı akış hızını gösterir. Termogram değerlendirilirken öncelikle, bir temel çizgi çizilir ve daha sonra elde edilen pikin maksimum eğilimli kısmından temel çizgiye teğet çizilir ve teğetin temel çizgiyi kestiği noktaya eşlenik gelen sıcaklık noktası numunenin faz değişim sıcaklığı olarak alınır. Ayrıca, pik altında kalan alanın integrali hesaplanarak numunenin faz değişim gizli ısısı bulunur.

## 2.4. Deneysel Çalışmalar

### 2.4.1. Laurik-Miristik Asit Ötektik Karışımının Hazırlanması

İlk olarak Faz değişim maddesi olarak ısınma ve soğuma periyotları incelenecek olan laurik asit ve miristik asidin bir seri belli bileşim oranlarındaki karışımları hazırlandı. Farklı bileşim oranlarındaki bu karışımlar bir seri erime ve katılaşma işlemlerine maruz bırakılarak homojen bir şekilde karışımları sağlandı. Daha sonra bu karışımlardan 4-5 mg civarında alınarak DSC analiz tekniğiyle karışımların erime noktaları ve erime entalpi değerleri hassas bir şekilde belirlendi, bu analiz yardımıyla minimum erime noktası gösteren ötektik bileşimin bileşim oranı, erime noktası ve erime entalpi belirlendi. Deneyler yapılmadan önce DSC cihazı saf laurik asitle kalibre edildi. Yapılan analiz işlemleri 5 °C /dk ısıtma hızıyla ve 20-80 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Belirli oranlarda hazırlanan bu karışımların alınan DSC eğrilerine bakılarak belirgin ve tek keskin

bir pik veren bileşim oranını, saf bir maddeymiş gibi tek bir erime noktası veren bileşimini yani ötektik karışım oranını vermektedir.

Ötektik karışımın katı ve sıvı fazlarının spesifik ısıları eşitlik 2.1 kullanılarak hesaplanabilir;

$$C_{\text{ötektik}} = \sum X_i C_i \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte  $C_{\text{ötektik}}$ , ötektik karışımın katı ve sıvı fazları için spesifik ısıyı,  $X_i$ ,  $i$  bileşenin mol kesrini ve  $C_i$ ,  $i$  bileşenin spesifik ısını temsil etmektedir.

#### 2.4.2. Deneyler

Deneylerde kullanılan düzenek Şekil 2.4 de görülmektedir. Bu düzenekteki enerji depolama ünitesine FDM olarak %66 laurik asit ve %36 miristik asit karışımından 2125 gr ilave edildi. Erime işlemi sırasında olası hacim artışını dikkate alarak enerji depolama ünitesinin 1/5 lik kısmı boş bırakıldı. Depolara çevrimi gerçekleştirecek kadar ısı transfer akışkanı olarak su ilave edildi. Deneye başlamadan önce enerji depolama ünitesine konulan FDM birkaç kez erime katılaşma işlemine maruz bırakılarak homojenliği sağlandı.

Erime periyodu için kontrollü ısıtıcılarla ısı transfer akışkanının sıcaklığı istenilen sabit bir değere ulaşınca kadar beklendi. Bu değere ulaşınca vanalar açılarak enerji depolama ünitesi içinden suyun dolaşımı sağlandı. Isı transfer akışkanının sistemdeki dolaşım hızı istenilen sabit bir debiye ayarlandı. Bu işlemlerden sonra enerji depolama ünitesi içerisindeki FDM'nin sıcaklığının erime sıcaklığının üzerine çıkıncaya kadar ısıtma işlemine devam edildi, bu ısıtma işlemi sırasında üniteye bağlı problar vasıtasıyla 2 dakikada bir 14 tane probdan sıcaklık değerleri kaydedildi. FDM'nin sıcaklığı erime sıcaklığının 7-8 °C kadar üzerine çıkıncaya kadar erime işlemine devam edildi. Aynı şekilde katılaşma periyodu için sıcaklığı FDM'nin erime sıcaklığının altında bulunan ısı transfer akışkanının sistemden sirkülasyonu ile katılaşma periyoduna geçildi. Bu işlemde FDM katılaşınca kadar ikişer dakika ara ile üniteye bağlı 14 adet prob yardımıyla ünitenin ve FDM'nin değişik bölgelerindeki katılaşma özellikler incelendi, problar vasıtasıyla okunan değerler data logger ve bilgisayar yardımıyla °C olarak kaydedildi.

Yapılan erime ve katılaşma deneyleri için seçilen su giriş sıcaklıkları ve kütleli akış hızları Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. Deneylerin yapıldığı su giriş sıcaklıkları ve kütleli akış hızları.

Erime periyodu için	Su giriş sıcaklığı	Kütleli akış hızı
"	50 °C	0,050 kg/s
"	50 °C	0,075 kg/s
"	50 °C	0,025 kg/s
"	48 °C	0,050 kg/s
"	52 °C	0,050 kg/s
Katılaşma periyodu için	Su giriş sıcaklığı	Kütleli akış hızı
"	30 °C	0,033 kg/s
"	30 °C	0,050 kg/s
"	30 °C	0,017 kg/s
"	31 °C	0,033 kg/s
"	28 °C	0,033 kg/s



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. DSC Isıl Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

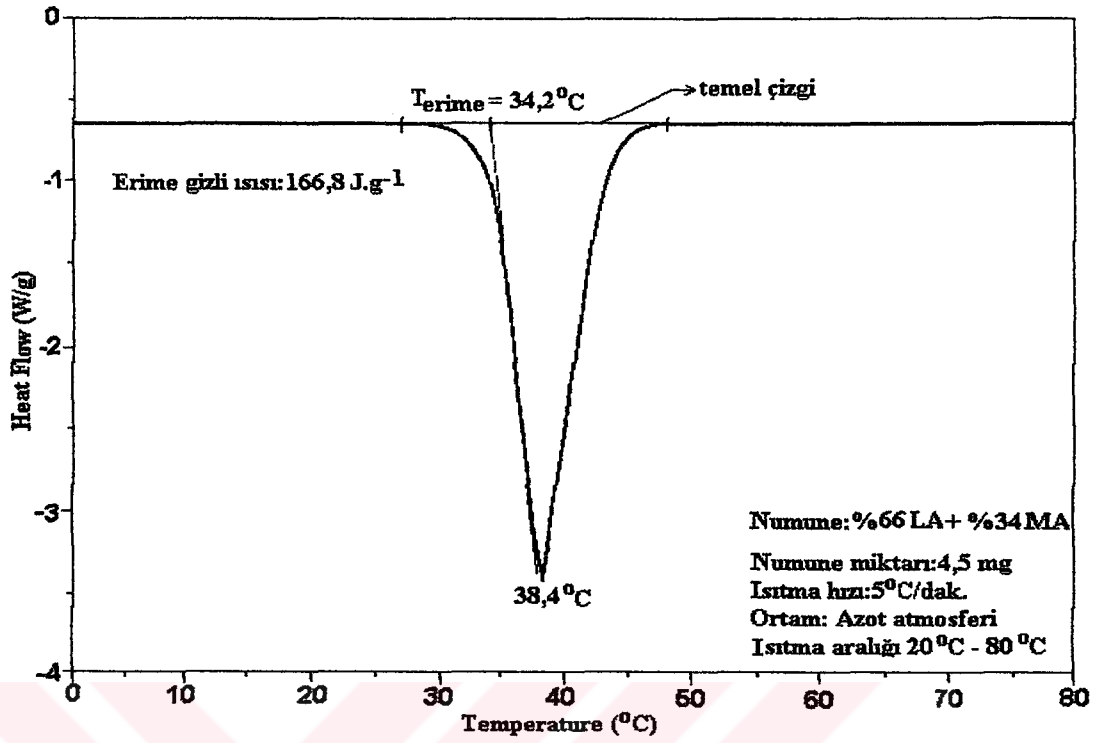
Laurik asit (LA)-miristik asit (MA) ikili karışımından değişik kütleli bileşim oranlarında hazırlandı ve DSC analiz yöntemiyle bu karışımların ısınma/soğuma eğrileri alınarak ötektik karışım oranı, erime gizli ısı ve erime sıcaklığı belirlendi. Farklı bileşim oranlarında hazırlanan LA-PA karışımlarının DSC ile ölçülen erime sıcaklık aralıkları ve erime gizli ısıları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. LA-MA karışımlarının DSC ile ölçülen erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları

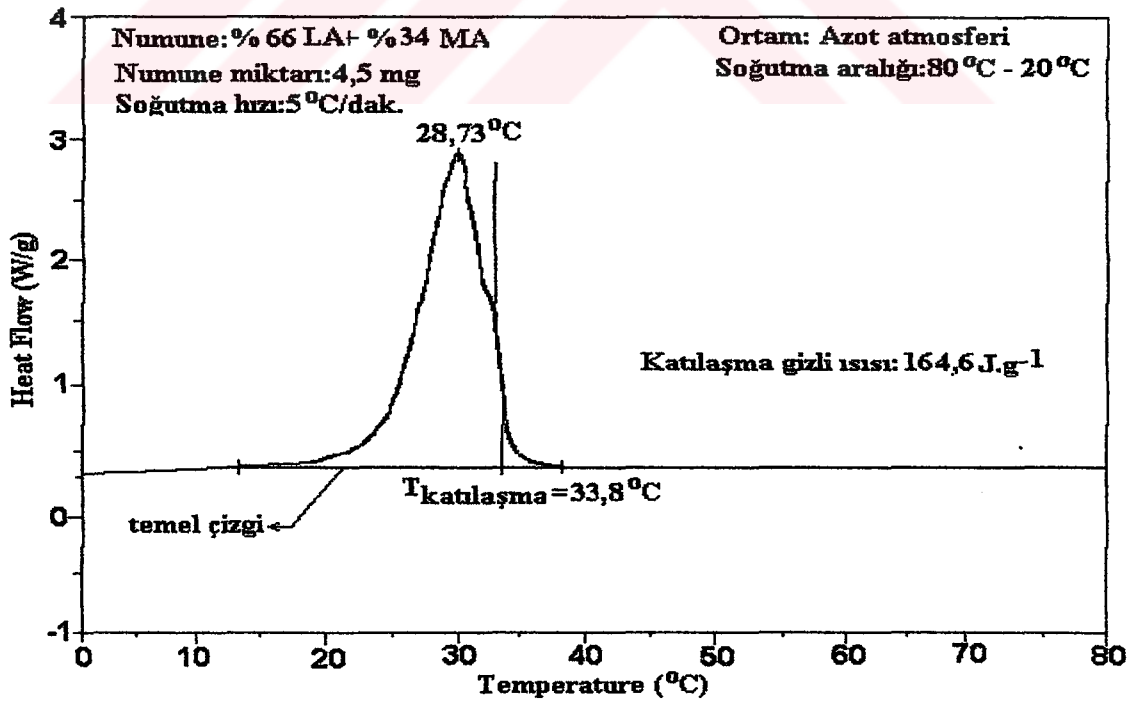
<i>LA (% wt)</i>	<i>MA (% wt)</i>	<i>T<sub>e</sub> (°C)</i>	<i>ΔH (J/g)</i>
0,0	100,0	52,2	182,6
40	60	19,6 – 47,6	176,8
50	50	23,1 – 44,6	174,4
60	40	28,8 – 40,8	172,0
61	39	29,4 – 39,2	171,4
62	38	30,4 – 38,0	170,6
63	37	31,3 – 37,1	169,5
64	36	32,2 – 36,2	168,8
65	35	33,1 – 35,1	168,1
<b>66</b>	<b>34</b>	<b>34,2</b>	<b>166,8</b>
67	33	35,3 – 33,5	165,5
68	32	36,3 – 32,7	164,3
69	31	37,2 – 32,0	165,9
70	30	37,8 – 31,2	166,6
78	22	39,3 – 29,4	169,3
85	15	40,1 – 24,1	172,8
100,0	0,0	42,6	176,6

Laurik asitin miristik aside katılmasıyla, her iki asitin erime noktası saf haldeki erime noktalarının altına düşmektedir. Ötektik orandan sonra karışımın erime sıcaklığı LA'nın erime noktasına yaklaşmaktadır. Benzer şekilde, karışımdaki LA oranının artmasıyla MA'nın erime gizli ısısı azalmaktadır. Karışımdaki LA oranı % 100'e yaklaşırken karışımın erime gizli ısısı saf LA'nın erime gizli ısı değerine yaklaşmaktadır. Karışımdaki LA bileşimi %66 olduğunda ötektik karışım oranına ulaşılmıştır ve bu orandaki karışımın ötektik erime sıcaklığı; 34,2 °C ve ötektik erime gizli ısısı; 166,8Jg<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.1 ve 3.2'de ötektik bileşime sahip LA-MA karışımının ısınma ve soğuma DSC termogramları verilmiştir. Bu termogramların değerlendirilmesiyle belirlenen erime ve katılma sıcaklıkları ve gizli ısıları Tablo 3.2'de verilmiştir. Tabloda ayrıca, eşitlik 2.1 kullanılarak ötektik karışımın katı ve sıvı fazları için hesaplanan özgül ısı değerleri de verilmiştir.



Şekil 3.1. LA-MA ötektik karışımının ısınma DSC eğrisi



Şekil 3.2. LA-MA ötektik karışımının soğuma DSC eğrisi

Tablo 3.2. LA-MA ötektik karışımının ısıl özellikleri

Ötektik Oran (kütlece)	% 66 LA - % 34 MA
Erime sıcaklığı (°C)	34,2
Katılma sıcaklığı (°C)	33,8
Erime gizli ısısı (J/g)	166,8
Katılma gizli ısısı (J/g)	164,6
Özgül ısı (katı faz için) (J/g °C)	2,02
Özgül ısı (sıvı faz için) (J/g °C)	2,16

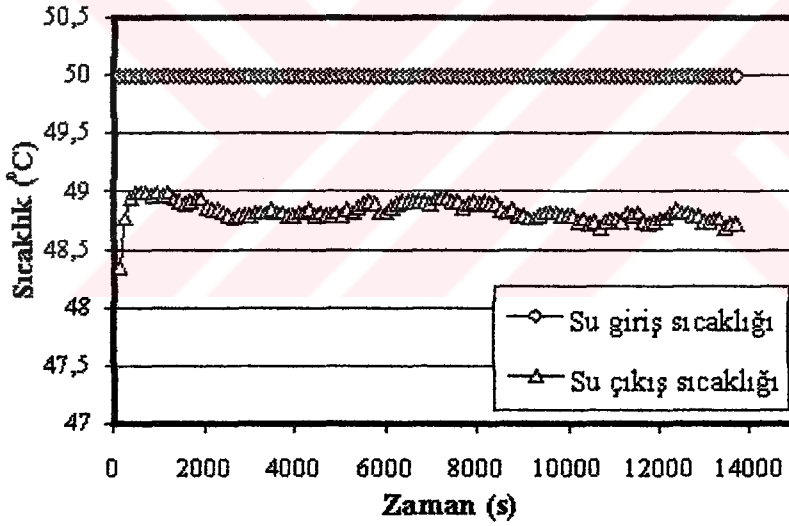
Tablo 3.2’de verilen erime sıcaklığı ve erime gizli ısısı değerleri aynı ötektik karışım için literatürde verilen değerlerle kıyaslandığında sonuçlar arasında küçük farklılıklar olduğu söylenebilir. Örneğin; Kauranen vd., (1991), bu karışım için ötektik oranı; % 62,6 LA : %37,4 MA, erime sıcaklığını; 32,6°C ve erime gizli ısısını ise, 156 J.g<sup>-1</sup> olarak belirlemiştir. Tablo 3.2’de verilen değerler ile literatür sonuçları arasında gözlenen farklılık iki temel gerçekten kaynaklanmaktadır: Birincisi, karışımda kullanılan yağ asitlerinin saflık derecelerinin farklı olmasıdır. İkincisi ise, DSC ölçümü yapılırken numuneye farklı ısıtma hızının uygulanmasıdır. Bununla birlikte, cihazın kalibrasyonundan ve kullanıcıdan kaynaklanacak hatalardan dolayı DSC ölçüm sonuçlarının mutlak değerler olmayacağı gerçeği de ayrıca dikkate alınmalıdır.

Sonuçta; DSC ısıl analiz bulgularına bakılarak LA-MA ötektik karışımının erime gizli ısı kapasitesinin tuz hidratlar ve polialkoller gibi diğer bazı FDM’lerle kıyaslanabilecek kadar yüksek olduğunu görmekteyiz. Ayrıca, LA-MA ötektik karışımının erime sıcaklığı (34,2°C) ve erime gizli ısısı (166,8 J.g<sup>-1</sup>) dikkate alınarak, iklim şartlarına göre, bina ve seraların ısıtılması ve konutlarda sıcak su temini gibi güneş enerjili bazı ısıl uygulamalarda bu ötektik FDM’nin potansiyel bir enerji depolama maddesi olarak kullanılabileceği söylenebilir.

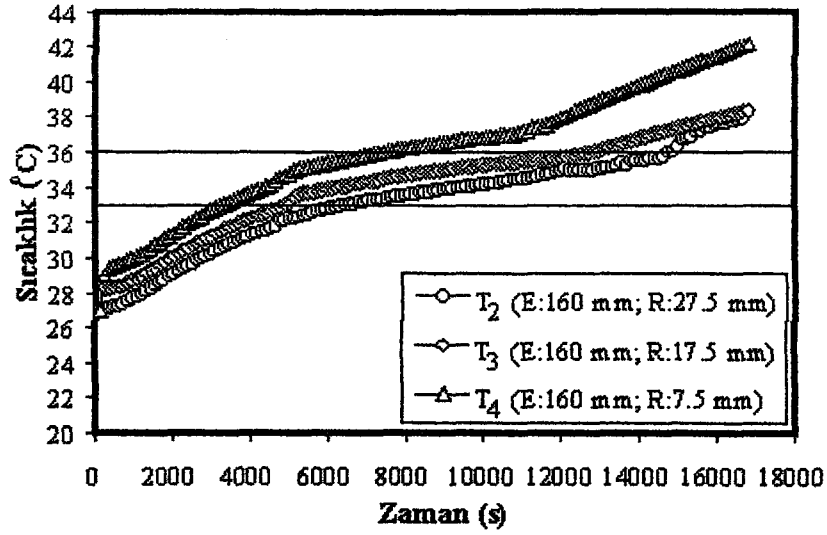
### 3.2. LA-MA Ötektik Karışımının Faz Değişim Özellikleri

#### 3.2.1. Isınma Sıcaklık Dağılımları

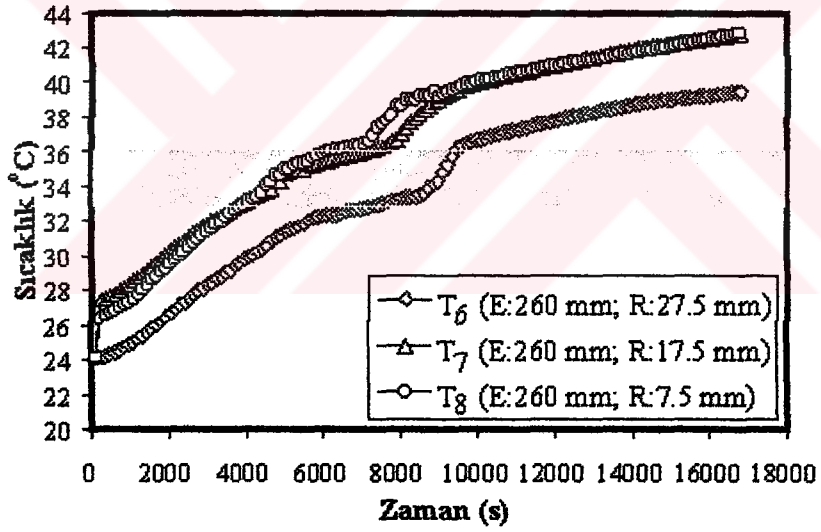
Laurik asit-miristik asit ötektik karışımının eş merkezli silindirik bir enerji depolama ünitesindeki ısınma sıcaklık dağılımları çalışmamızın bu aşamasında incelendi. Ötektik karışımdan 2,225 kg depolama ünitesine konularak sistemde ısınma periyoduna başlandı. Isınma periyodu için ısı transfer akışkanı giriş sıcaklıkları  $50^{\circ}\text{C}$  ,  $48^{\circ}\text{C}$  ve  $52^{\circ}\text{C}$  olarak, kütleli akış hızları ise  $0,05\text{ kg/s}$ ,  $0,075\text{ kg/s}$  ve  $0,025\text{ kg/s}$  olarak alındı. Bu farklı  $T_g$  ve kütleli akış hızları kullanılarak ötektik karışımın ısınma karakterleri farklı aksenal ve radyal konumlarda incelendi. Isınma periyodu süresince su giriş sıcaklığının, su çıkış sıcaklıklarının ve bazı aksenal ve radyal mesafelerdeki sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimleri Şekil 3.3 - 3.14'de verilmiştir.



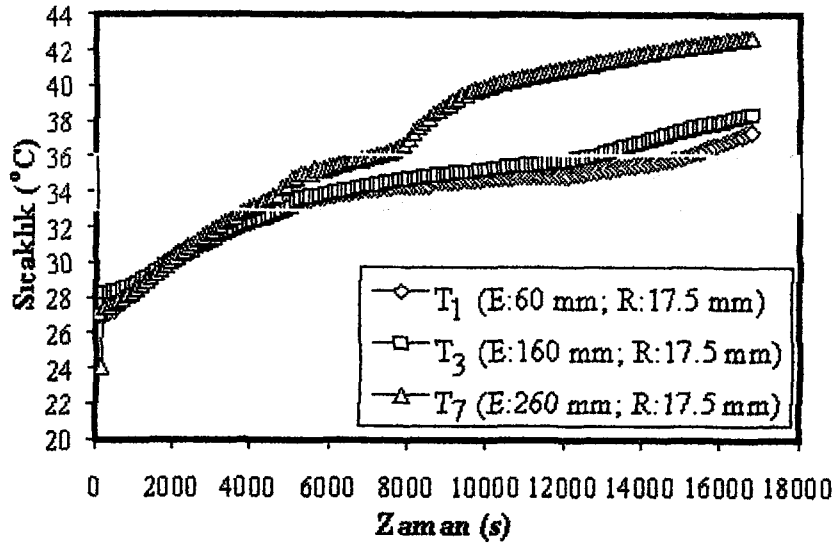
Şekil 3.3. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^{\circ}\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,050\text{ kg.s}^{-1}$ )



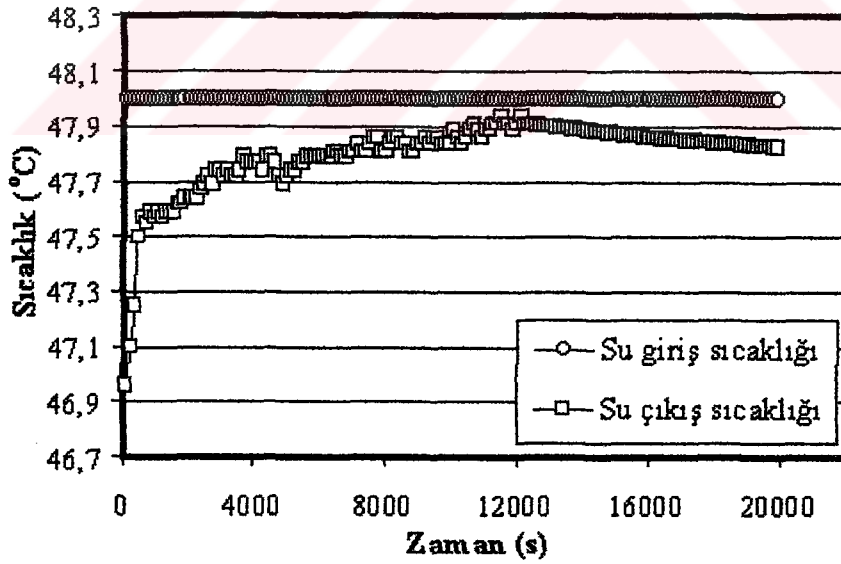
Şekil 3.4. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



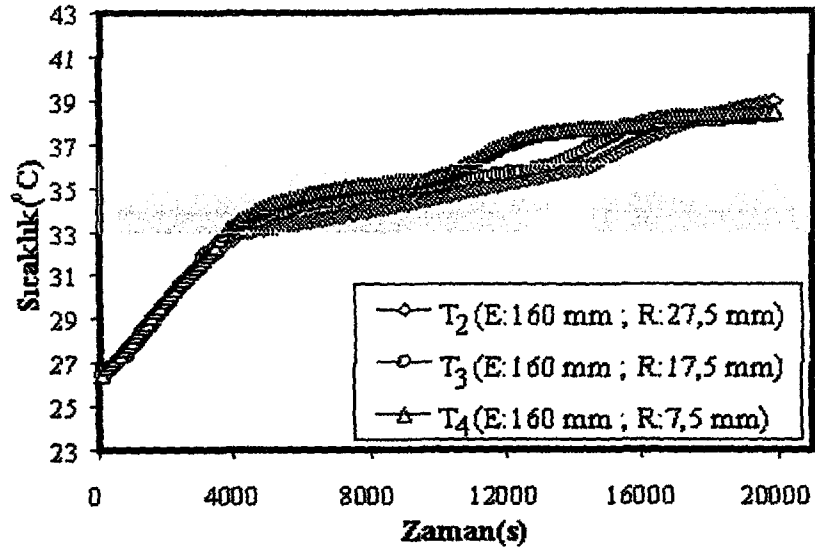
Şekil 3.5. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



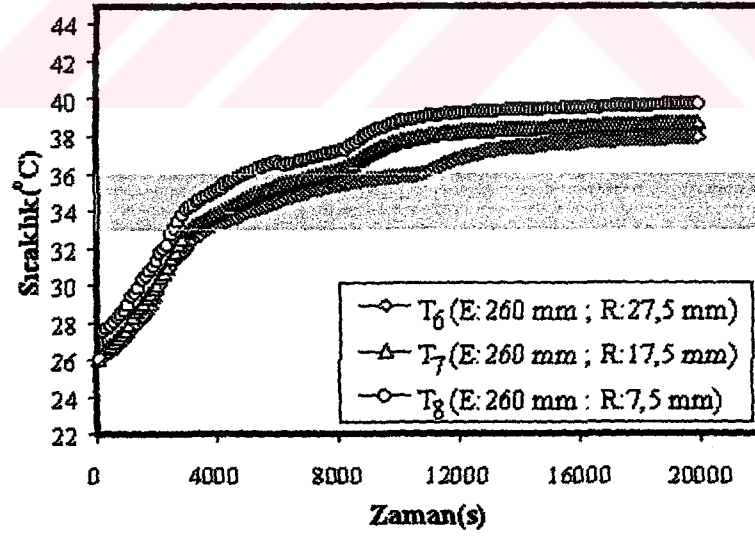
Şekil 3.6. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.7. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 48^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

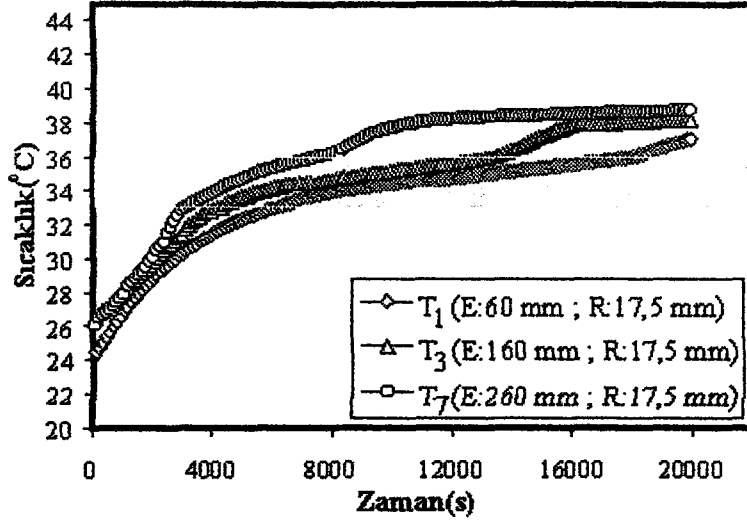


Şekil 3.8. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

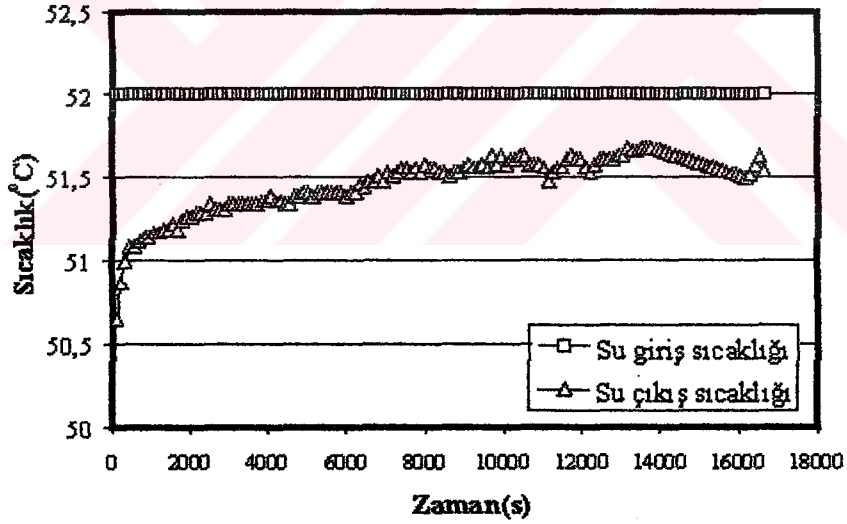


Şekil 3.9. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

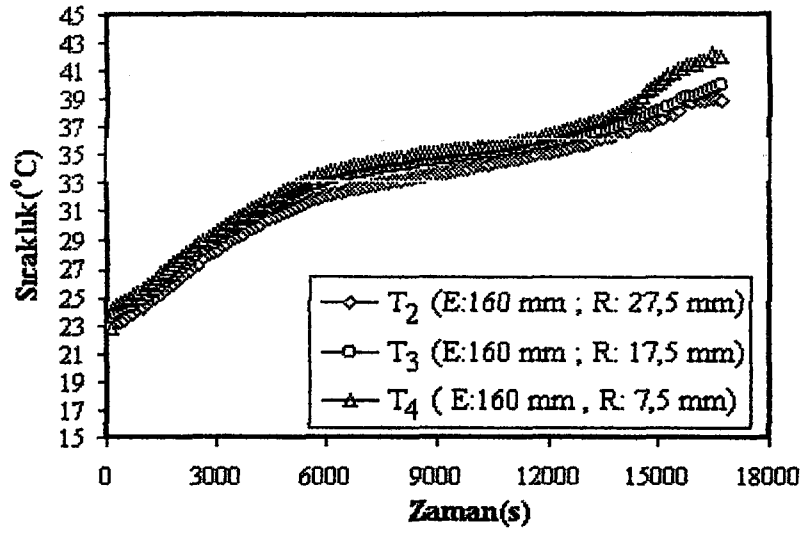




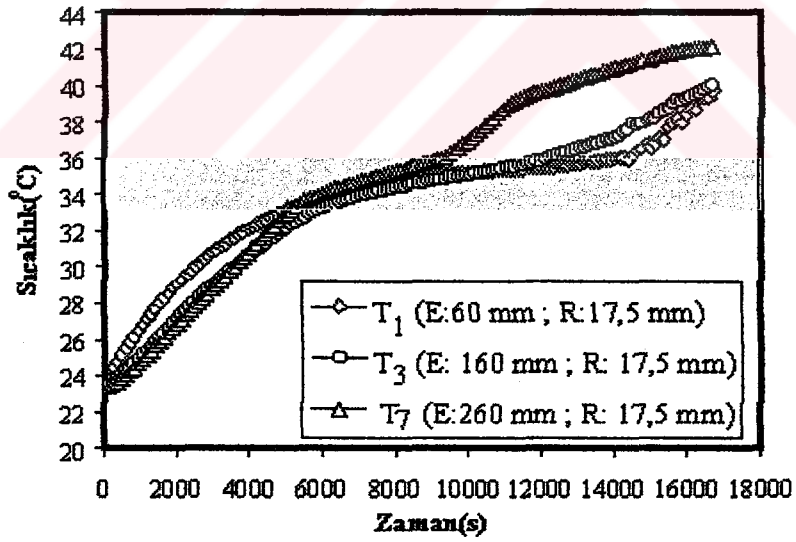
Şekil 3.10. LA-MA ötektik karışımının aksenal yöndeki (R:17,5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 48^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı =  $0,050 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



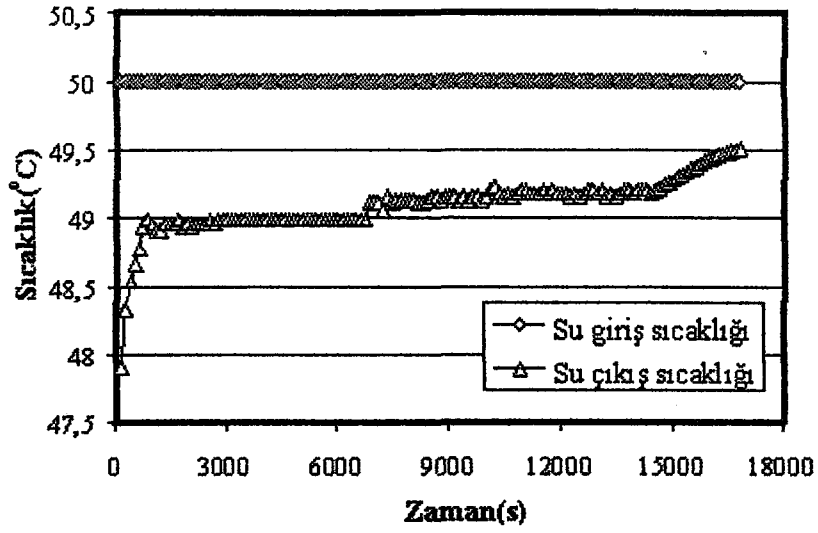
Şekil 3.11. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 52^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı :  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



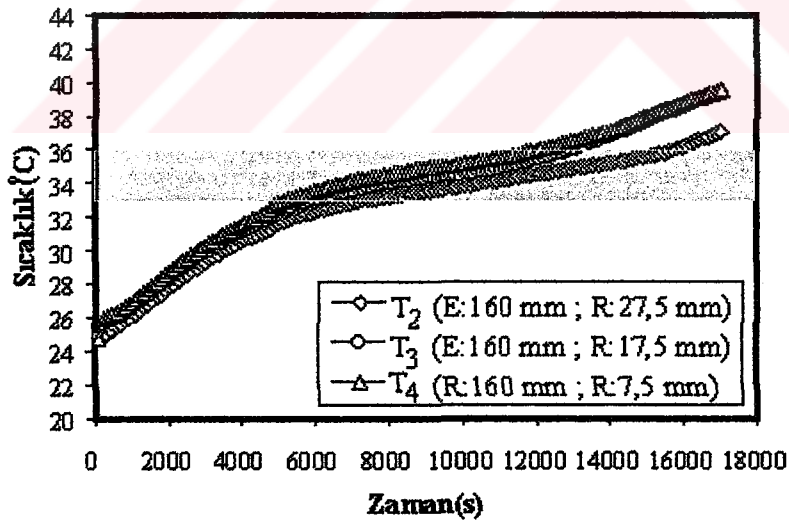
Şekil 3.12. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 52^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



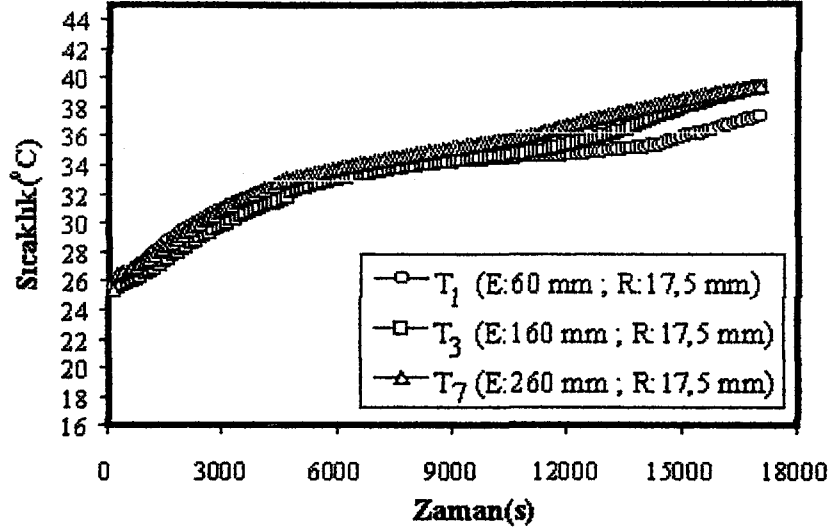
Şekil 3.13. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17,5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 52^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



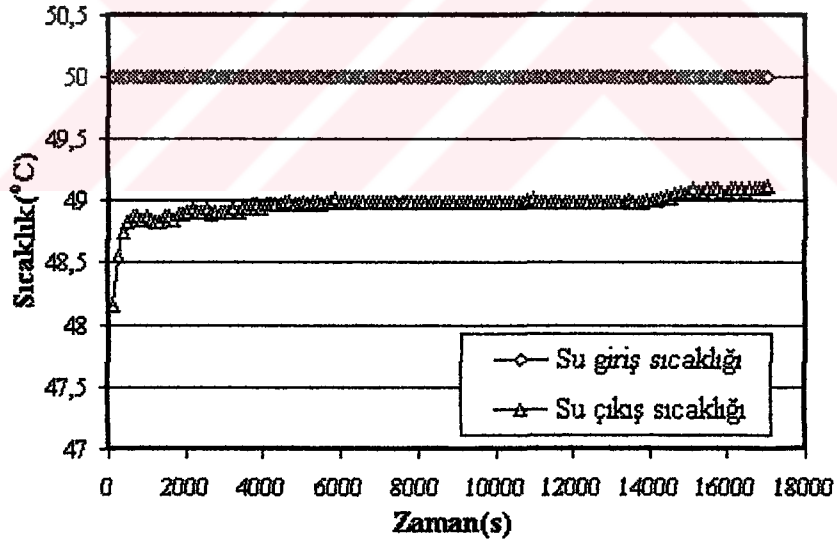
Şekil 3.14. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı :  $0,025\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



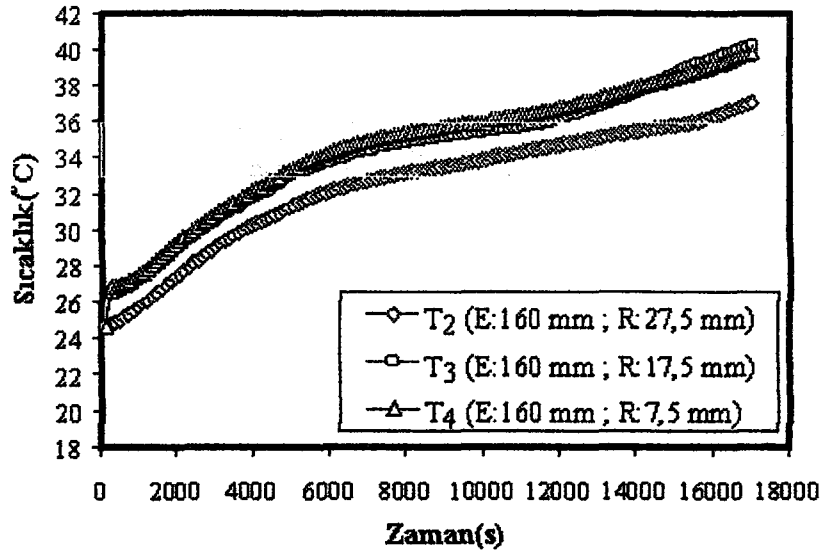
Şekil 3.15. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı :  $0,025\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



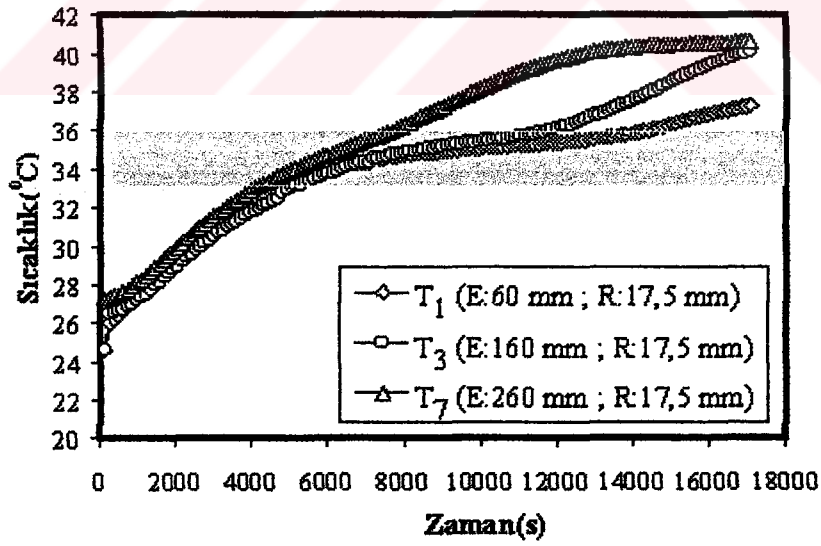
Şekil 3.16. LA-MA ötektik karışımının aksenal yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,025 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.17. Isınma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı :  $0,075 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.18. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,075 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.19. LA-MA ötektik karışımının aksenal yöndeki (R:17,5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 50^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,075 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 3.2.1.1. Isınma Sıcaklık Dağılımlarının Değerlendirilmesi

Yukarıda verilen ısınma sıcaklık dağılımlarında şekil 3.3, 3.7, 3.11, 3.14 ve 3.17’de ısı transfer akışkanının sisteme giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi verilmektedir. Isınma periyotları süresince sabit su girişi sağlandığı için su giriş sıcaklıkları (T<sub>g</sub>) grafiklerden de gözlenebildiği gibi beklenen sabit değeri vermektedir. Su çıkış sıcaklıkları (T<sub>ç</sub>) ise ısınma periyotları süresince faz değiştiren maddeyle ısı transfer akışkanı arasındaki kondüksiyon ve konveksiyon nedeni ile belli bir miktar düştüğü gözlemlenmektedir.

Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9, 3.10, 3.12, 3.13, 3.15, 3.16, 3.18, 3.19’da ise farklı su giriş sıcaklıkları (T<sub>g</sub>) ve farklı kütleli akış hızlarındaki farklı radyal ve aksel mesafelerdeki ısınma sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Bu sıcaklık dağılımlarına bakılarak aşağıdaki genellemeleri yapmak mümkündür.

Isınma periyodunun başlangıcında su giriş sıcaklığı ile FDM arasındaki sıcaklık farkı fazla olduğu için ısınma sıcaklık dağılımlarından da gözlemlenebildiği gibi daha hızlı bir ısınma gözlemlenmektedir. Fakat faz değiştiren maddenin sıcaklığı erime sıcaklığına ulaştığı andan itibaren erime işlemi tamamlanıncaya kadar FDM’nin sıcaklığında belirgin bir artış göze çarpmamaktadır. Erime işlemi tamamlandıktan sonra ise FDM’nin sıcaklığı yine artmaya devam etmektedir. Bu grafiklerden FDM’nin erime sıcaklık aralığı sıcaklık profillerindeki eğimin sıfır olduğu bölgedir, başka bir deyişle bantlı bölgenin içine düşen kısımlar erime sıcaklık aralığı olarak belirlenmektedir. Bu değerler grafiklerden 33-36 °C olduğu gözlenmektedir. DSC analiz tekniğiyle bu ötektik karışımın ölçülen erime değeri 34,2 °C olarak belirlenmiştir. Bu fark deneyimizde 2 kg’ın üzerinde maddeyle çalıştığımız halde DSC analiz tekniğiyle miligram seviyesinde çalışıldığı için ve diğer parametrelerin farklı seçilmesinden kaynaklanmaktadır.

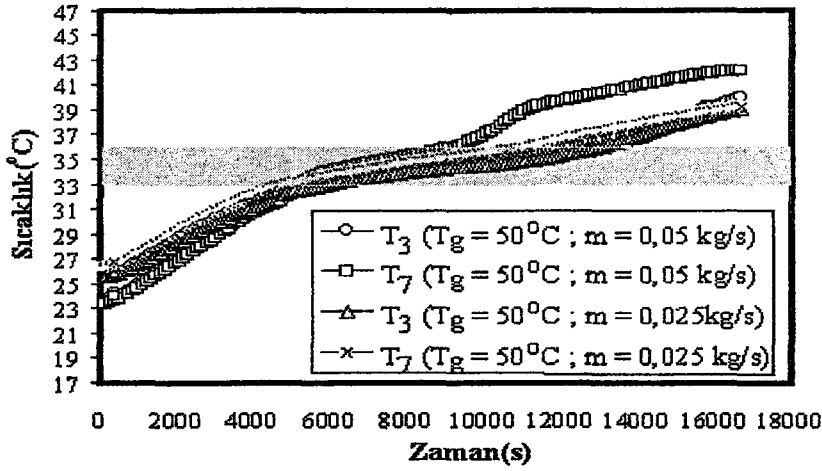
Laurik-miristik asit ötektik karışımının radyal yöndeki sıcaklık dağılımları incelendiği zaman erime işleminin ısı transfer akışkan borusundan dış yüzey duvarına doğru gerçekleştiği sonucuna varılmaktadır. (Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9, 3.10, 3.12, 3.13, 3.15, 3.16, 3.18, 3.19 ) Öte yandan aksel yöndeki sıcaklık dağılımlarında ise erimenin önce alt kısımdan başladığı fakat daha sonra ise yoğunluk farkından dolayı üst kısımdan aşağıya doğru gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

Laurik-miristik asit ötektik karışımının yukarıda bahsedilen radyal ve aksel yönlerdeki erime davranışlarını açıklamak gerekmektedir. Isınma periyodunun

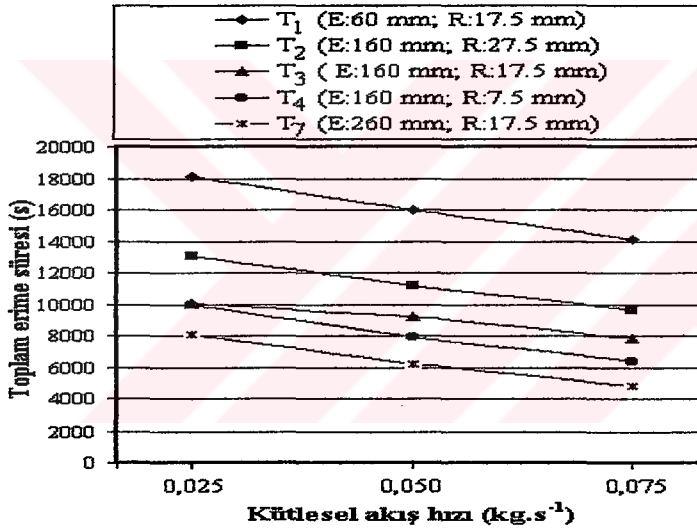
başlangıcında sabit sıcaklığa sahip olan ısı transfer akışkanı enerji depolama ünitesinden geçerken sahip olduğu ısının belli bir miktarını duyulur ısı şeklinde FDM'ye aktarmaktadır. Bu şekilde ısı aktarımı kondüksiyonla meydana gelmektedir. Kondüksiyonla iletilen ısının büyüklüğü ısı transfer akışkanı ile FDM arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Sıcaklık farkı azaldıkça kondüksiyonla ısı iletimide azalmaktadır. Bu şekilde meydana gelen ısı transferi nedeniyle ısı transfer akışkan borusunun dış duvarı ile yumuşamış katı FDM arasında ince bir sıvı tabakası meydana getirmektedir. Isınma işlemi devam ettikçe bu ince sıvı tabakası radyal ve aksel yönlerde genişlemektedir, bir süre sonra FDM erimeye devam ettikçe moleküler hareketlilik arttığı için ısı transferine konveksiyon hakim olmaktadır. FDM içerisindeki bu doğal konveksiyonun büyüklüğü katı-sıvı ara yüzeyi ile akışkan borusunun dış duvarı arasındaki mesafeye ve sıcaklık farkına bağlıdır. Erime işlemi devam ettikçe katı-sıvı ara yüzeyi büyüyecek ve doğal konveksiyon artacaktır, erime devam ettikçe erimiş FDM yoğunluk farkından dolayı moleküler hareketlilik arttığı için katı FDM'nin üzerine çıkacak ve bu nedenle FDM'nin aksel yöndeki erimesi üstten aşağıya doğru devam edecektir.

#### **3.2.1.2. Isı Transfer Akışkanının Kütleli Akış Hızı ve Giriş Sıcaklığının Toplam Erime Süresi Üzerindeki Etkisi**

Bu çalışmada, "toplam erime süresi"; oda sıcaklığındaki FDM'nin erime işlemi tamamlanıncaya kadar ısıtılması esnasında geçen süre olarak tanımlandı. Suyun akış hızındaki değişimin LA-MA ikili (ötektik) karışımının erime süresi üzerindeki nitel ve nicel etkisi sırasıyla, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.20. Suyun kütleli akış hızının erime süresi üzerindeki nitel etkisi

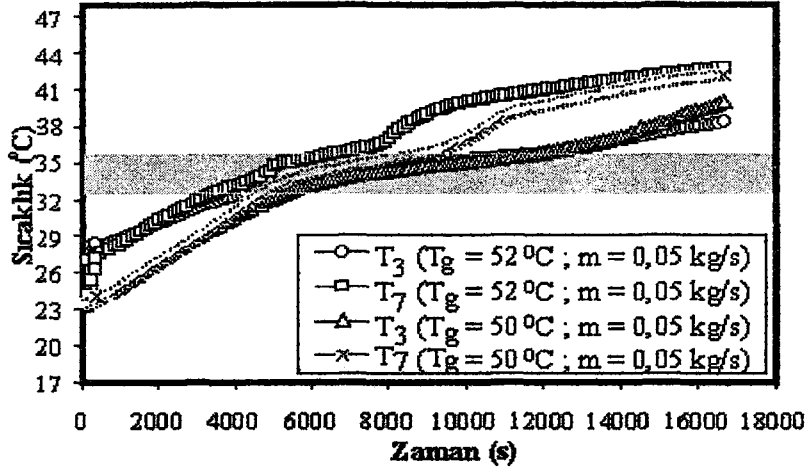


Şekil 3.21. Suyun kütleli akış hızının toplam erime süresi üzerindeki nitel etkisi

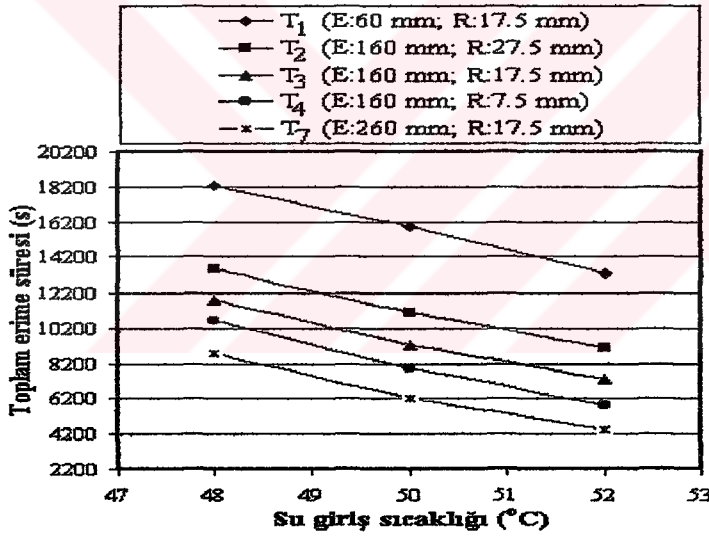
Şekil 3.21'de görüldüğü gibi suyun akış hızı 0.025 kg.s<sup>-1</sup>'den 0.05 kg.s<sup>-1</sup>'e çıkarıldığında FDM'nin toplam erime süresi yaklaşık olarak T<sub>1</sub> noktasında %12,5 , T<sub>2</sub> noktasında %14,3 , T<sub>3</sub> noktasında %15,5 , T<sub>4</sub> noktasında yaklaşık %20,5 ve T<sub>7</sub> noktasında da %22,8 oranında kısalmaktadır. Kütleli akış hızındaki değişimin iç radyal noktalarda (ısı transfer akışkan boru yüzeyine yakın olan noktalara da) ve üst aksenal kısımlardaki erime hızı üzerinde daha etkili olduğu sonucunu verebilmektedir.

Su giriş sıcaklığındaki değişimin (T<sub>g</sub>) FDM'nin toplam erime süresi üzerindeki nitel ve nicel etkisi sırasıyla, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de görülmektedir.





Şekil 3.22. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının erime süresi üzerindeki nitel etkisi

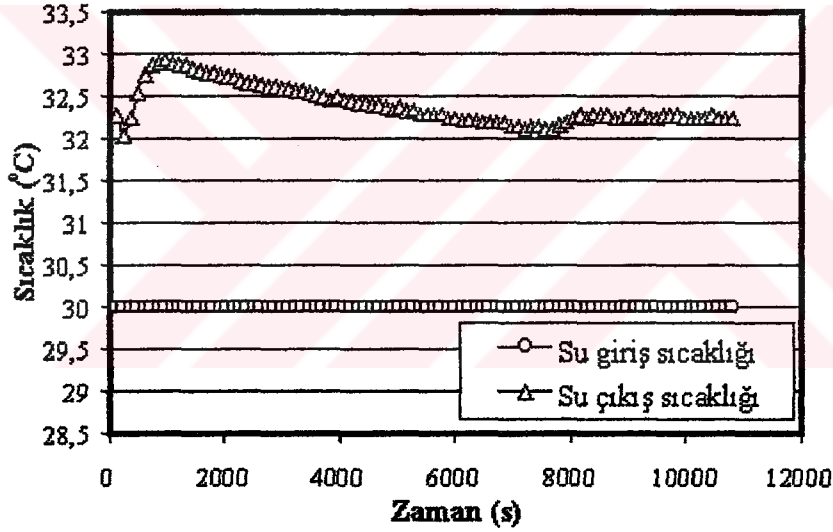


Şekil 3.23. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam erime süresi üzerindeki nicel etkisi

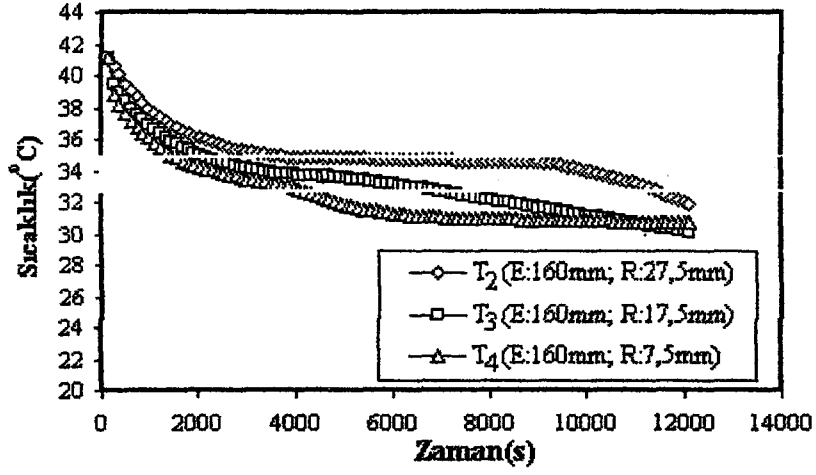
Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığı 2°C kadar arttırıldığında toplam erime süresi yaklaşık ortalama olarak T<sub>1</sub> noktasında %16 , T<sub>2</sub> noktasında %18 , T<sub>3</sub> noktasında %21 , T<sub>4</sub> noktasında yaklaşık %26 ve T<sub>7</sub> noktasında da %29 oranında kısalmaktadır (Şekil 3.23). Görüldüğü gibi, (T<sub>g</sub>-T<sub>e</sub>) sıcaklık farkındaki 2°C'lik bir artışla FDM'nin erime süresi önemli derecede kısalmaktadır. Bu sonuç aynı zamanda, suyun giriş sıcaklığındaki artışla birlikte erimesi esnasındaki moleküler hareketliliğin (göçü) üst aksenal bölgelerde daha fazla arttığını göstermektedir.

### 3.2.2. Soğuma Sıcaklık Dağılımları

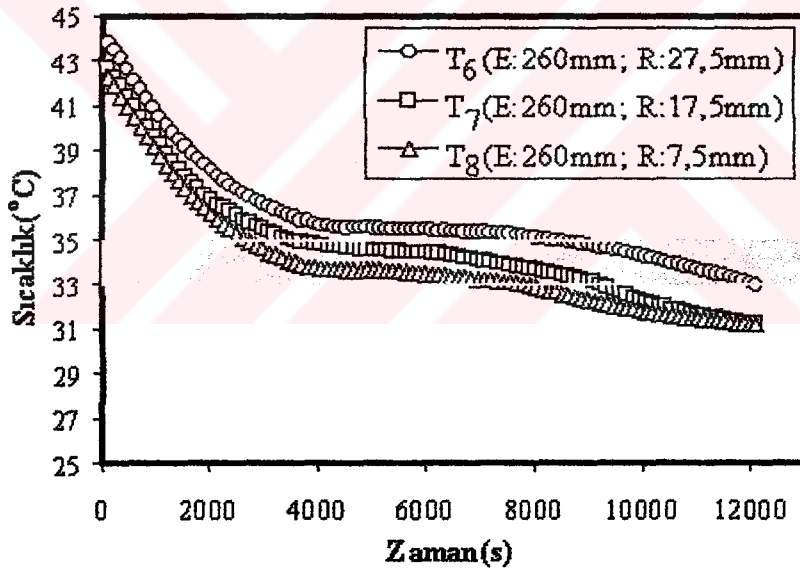
Laurik-miristik asit ötektik karışımının deneysel olarak soğuma faz değişim karakteristiklikleri bu bölümde ayrıntılı bir şekilde incelendi. FDM'nin değişik radyal ve aksenal mesafelerdeki soğuma sıcaklık dağılımları enerji depolama ünitesine yerleştirilen probalar yardımıyla incelendi. Soğuma sıcaklık dağılımları 28 °C, 30 °C ve 31 °C ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve 0,033kg/s, 0,05 kg/s ve 0,017 kg/s kütleli akış hızlarında incelendi. Bu parametreler kullanılarak elde edilen değişik radyal ve aksenal mesafelerdeki sıcaklık değerlerini ve su giriş sıcaklıklarının zamanla değişimleri Şekil 3.24- 3.40'da verilmiştir.



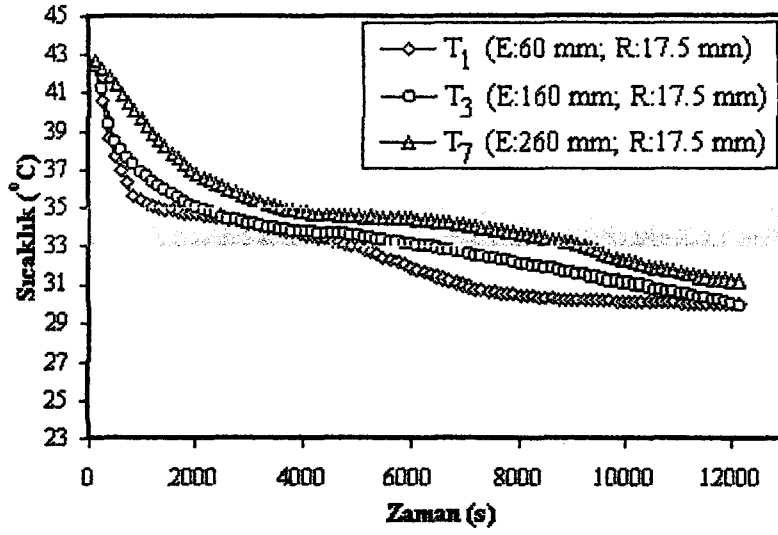
Şekil 3.24. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



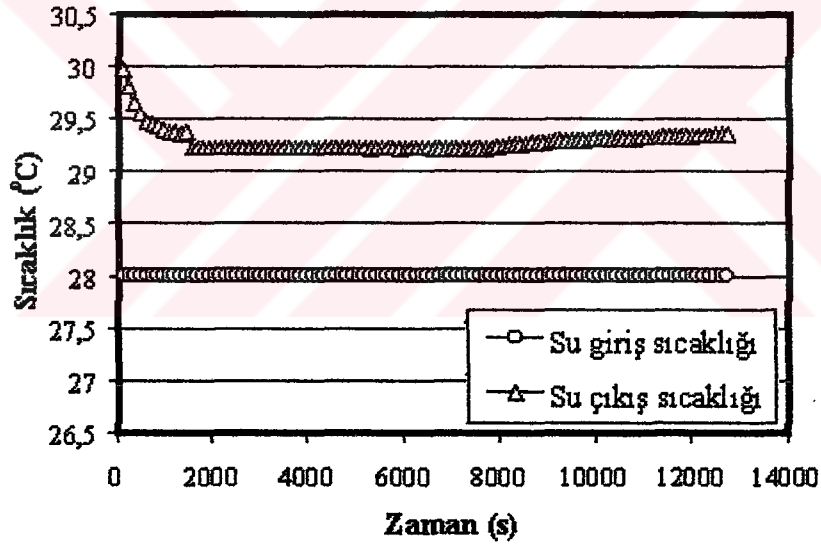
Şekil 3.25. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



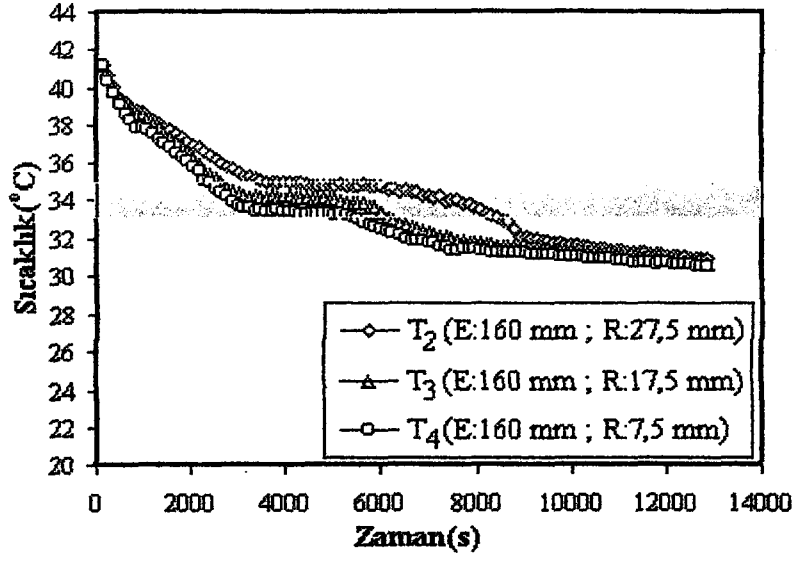
Şekil 3.26. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



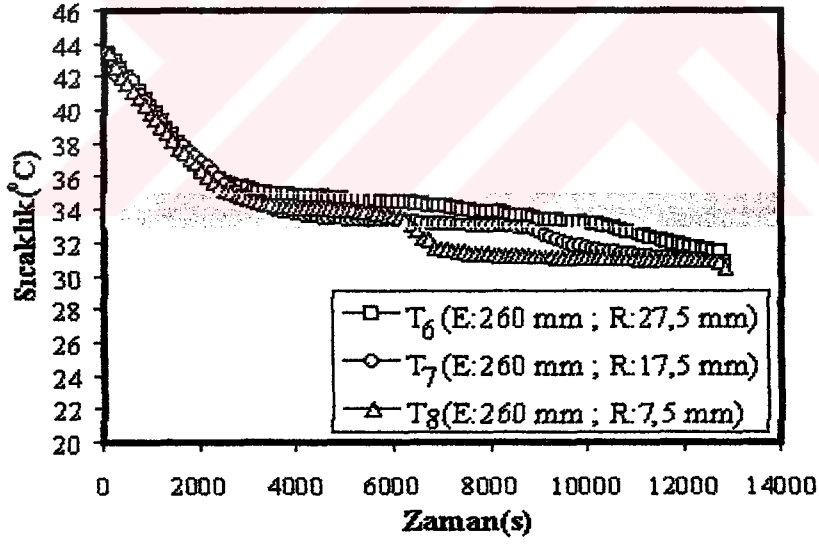
Şekil 3.27. LA-MA ötektik karışımının aksenal yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ )



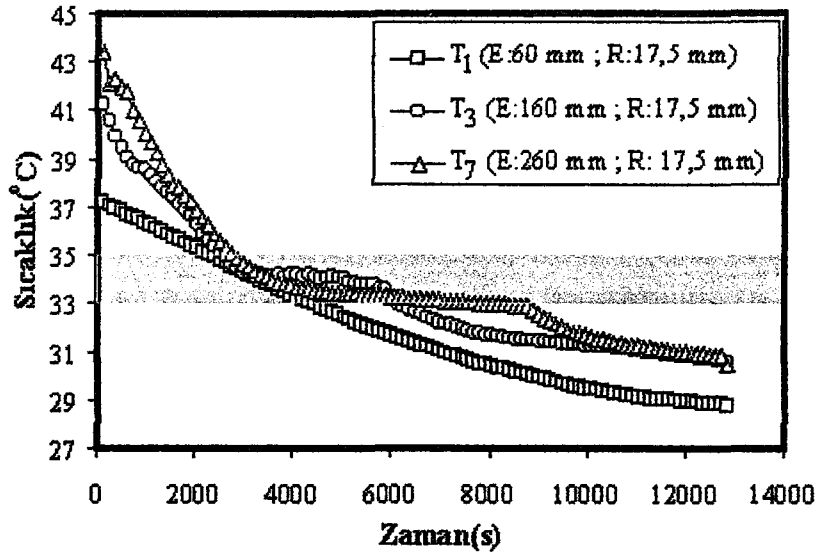
Şekil 3.28. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 28^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ )



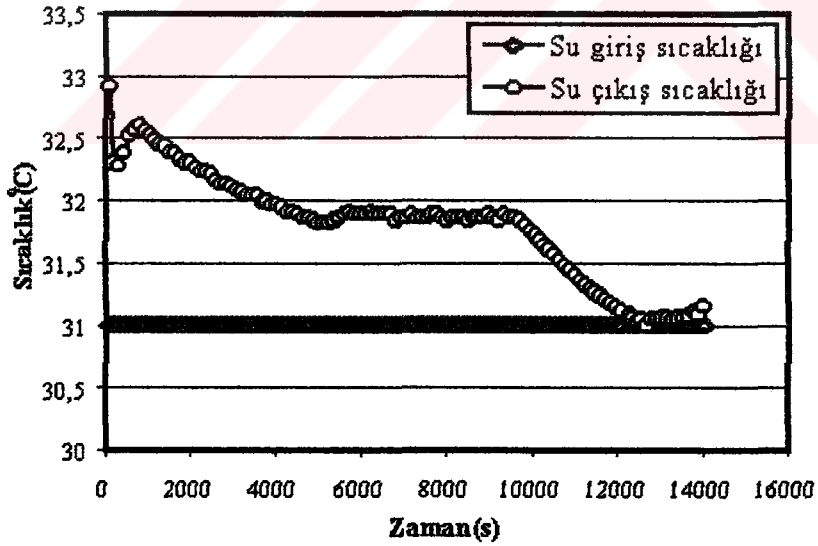
Şekil 3.29. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



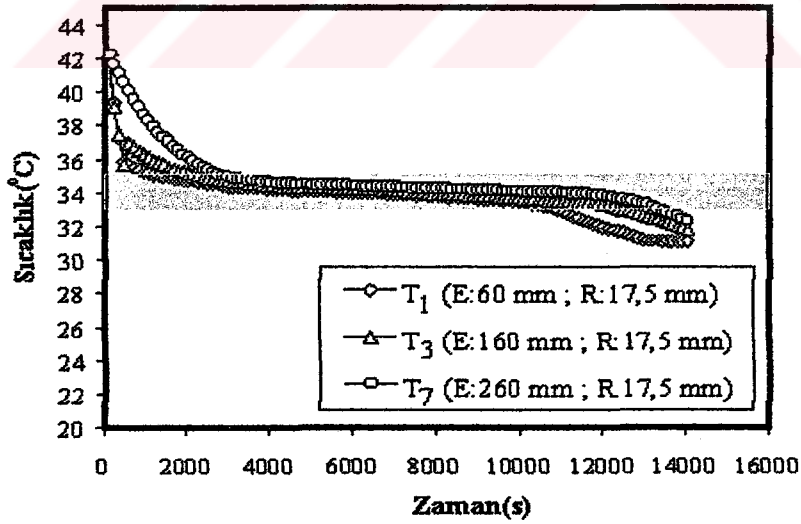
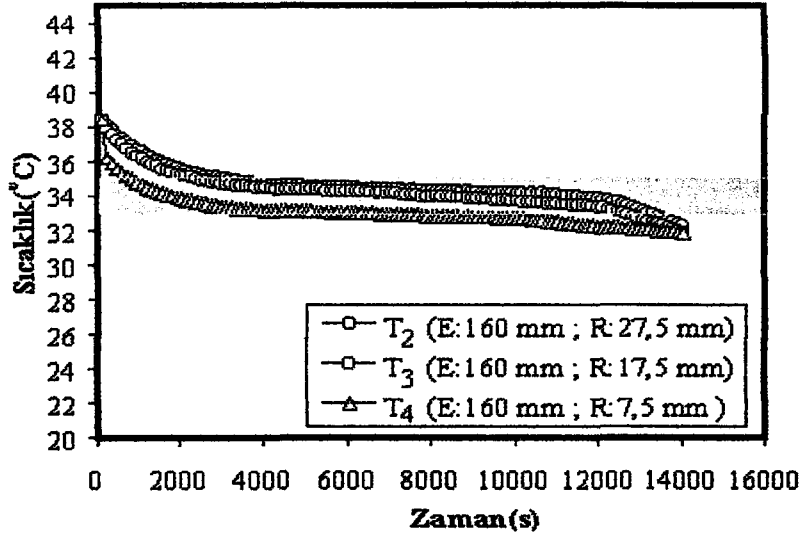
Şekil 3.30. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:260 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

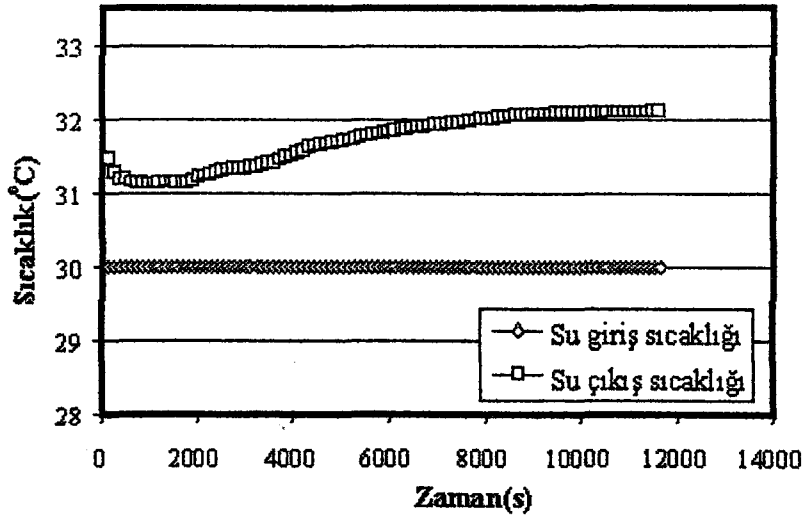


Şekil 3.31. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 28^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ )

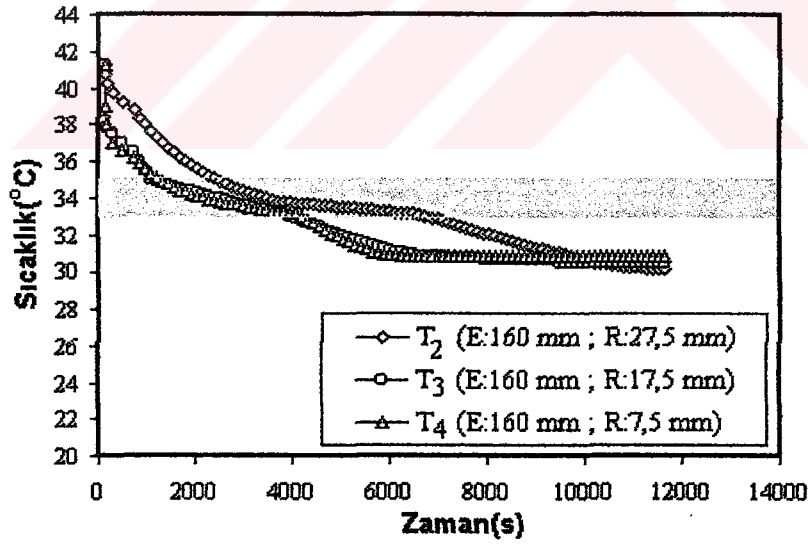


Şekil 3.32. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 31^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,033 \text{ kg.s}^{-1}$ )



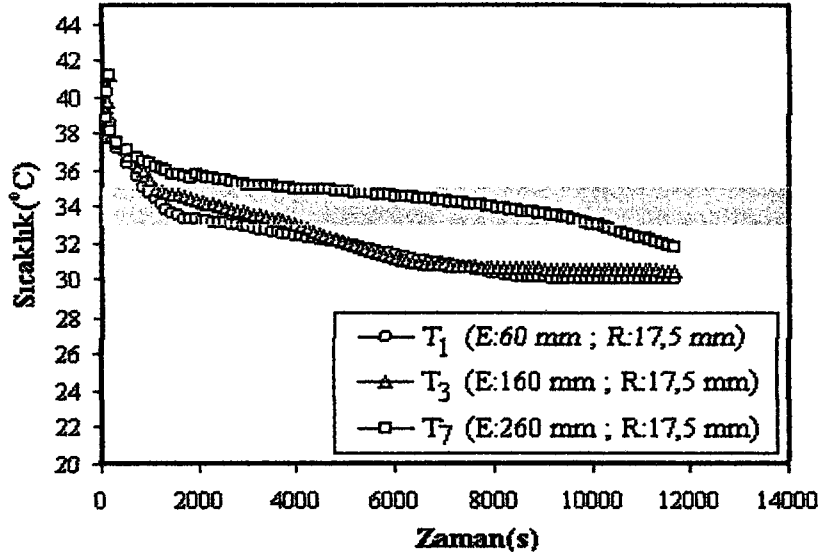


Şekil 3.35. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

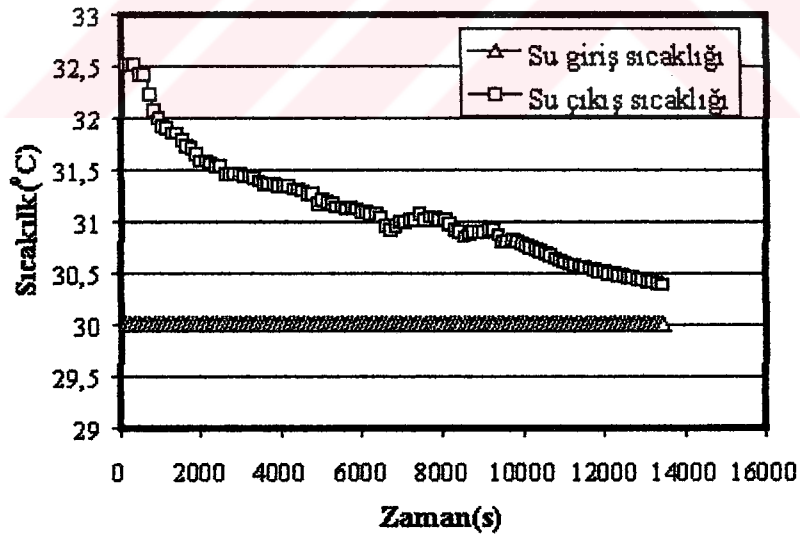


Şekil 3.36. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki ( $E:160 \text{ mm}$ ) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

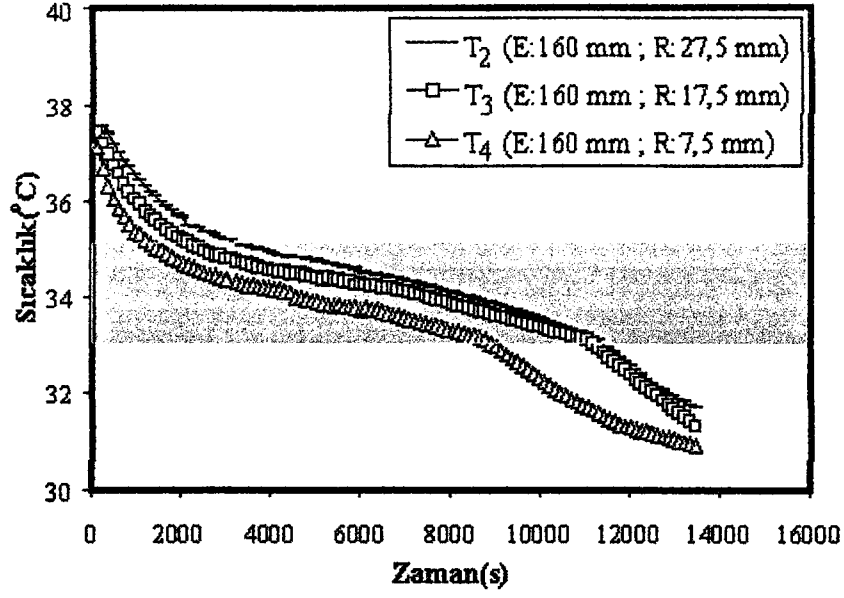




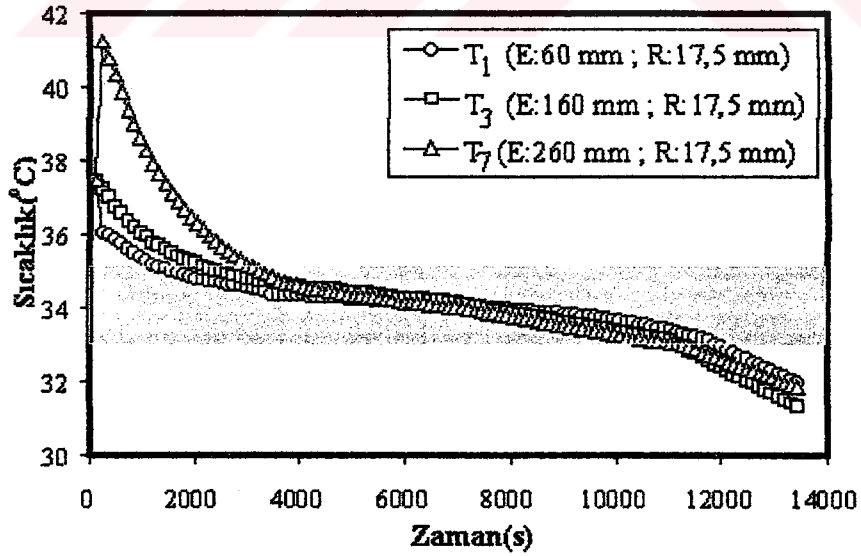
Şekil 3.37. LA-MA ötektik karışımının aksenal yöndeki (R:17,5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.38. Soğuma periyodu süresince su çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı =  $0,016 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.39. LA-MA ötektik karışımının radyal yöndeki (E:160 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,016 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )



Şekil 3.40. LA-MA ötektik karışımının aksel yöndeki (R:17.5 mm) sıcaklık dağılımı ( $T_g = 30^\circ\text{C}$  ; kütleli akış hızı:  $0,016 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 3.2.2.1. Soğuma Sıcaklık Dağılımlarının Değerlendirilmesi

Verilen soğuma sıcaklık dağılım profillerinden Şekil 3.24, 3.28, 3.32, 3.35 ve 3.38 ısı transfer akışkanının sisteme giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimini vermektedir. Isınma periyodunda olduğu gibi ısı transfer akışkan giriş sıcaklığı sabit olarak alınmıştır, bu durum grafiklerde açıkça görülmektedir. Su çıkış sıcaklığı ise FDM'nin sıcaklığının su giriş sıcaklığından yüksek olması nedeni ile konveksiyon ve kondüksiyon nedeni ile belli bir miktar yükselecektir. Başlangıçta su giriş sıcaklığı ile FDM arasındaki sıcaklık farkı fazla olduğu için su çıkış sıcaklığında hızlı bir artış gözlemlenmektedir.

Şekil 3.25, 3.26, 3.27, 3.29, 3.30, 3.31, 3.33, 3.34, 3.36, 3.37, 3.39 ve 3.40 ise farklı radyal ve aksel mesafelerdeki soğuma sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Şekillerde görülen bantlı bölgeler ötektik karışımın katılma sıcaklık aralığını göstermektedir, bunlardan görüldüğü gibi katılma sıcaklık aralığı  $33-35^{\circ}\text{C}$  'ye karşılık gelmektedir. Katılma sıcaklık aralığı hemen hemen erime sıcaklık aralığına eşit olduğu için aşırı soğuma gözlenmemektedir.

Radyal yöndeki soğuma sıcaklık dağılımlarına bakılarak faz değişiminin radyal yönde ısı transfer akışkan borusuna en yakın noktadan en dış noktaya doğru gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Bununla birlikte Şekil 3.25, 3.26, 3.27, 3.29, 3.30, 3.31, 3.33, 3.34, 3.36, 3.37, 3.39 ve 3.40'da görüldüğü gibi depolama ünitesinde aksel yönde FDM'nin katılma işlemi aşağıdan yukarıya doğru gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Bu durum iki şekilde izah edilebilmektedir; soğuk akışkanın aşağıdan yukarıya çıkması veya sıcaklığın erimiş FDM'nin üst kısımlarında daha yüksek olmasından dolayı akışkanın akış boyunca ısınmasıdır, bu nedenle üst bölgelerdeki FDM daha geç katılacaktır. Bu durum  $T_1$ ,  $T_3$  ve  $T_7$  eğrilerinden açıkça gözlemlenmektedir.  $T_1$  bölgesinde diğer bölgelere oranla daha hızlı bir soğuma gözlemlenmektedir, bu nedenle  $T_1$  bölgesinde FDM'den çekilen duyulur ısı ile gizli ısıyı birbirinden ayırmak oldukça zordur.

Ötektik karışımın radyal ve aksel yönlerdeki sıcaklık eğrileri göz önünde bulundurularak soğuma işleminin kondüksiyon ısı transfer mekanizması ile gerçekleştiği söylenebilir. Soğuma hızı üzerinde etki eden diğer bir aktör ise katılan FDM ile ısı transfer akışkan borusunun dış yüzeyi arasındaki ısı direnci ( $R_k$ ) Bu ifade 3.1 eşitliği vasıtası ile tanımlanabilmektedir (Sarı ve Kaygusuz, 2002a).

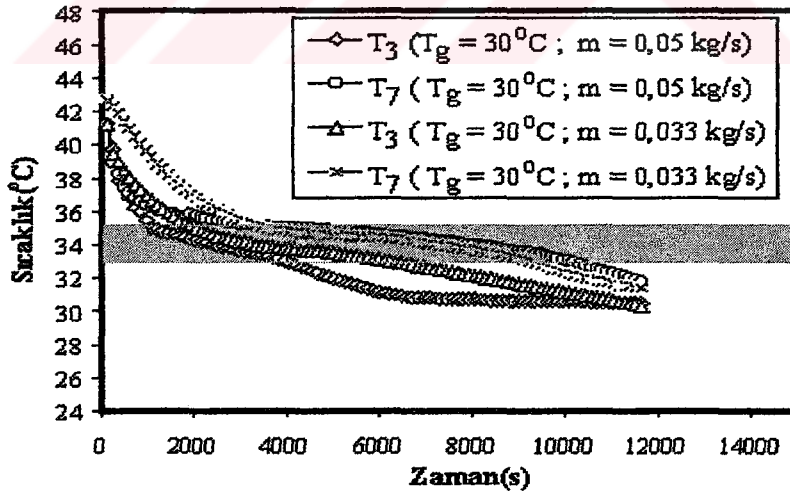
$$R_k = \frac{D_0 \ln(D_{k-s} / D_0)}{2k} \quad (3.1)$$

Burada  $D_0$ , ısı transfer akışkan borusunun dış çapını,  $D_{k-s}$ , soğuma esnasında oluşan katı-sıvı ara yüzeyin çapını,  $k$  ise FDM'nin ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Bu eşitliğe göre soğuma periyodunun başlangıcında katı-sıvı ara yüzey çapı küçük olduğundan başlangıçtaki soğuma hızı yüksektir. Isı transfer akışkan borusundan en uzak noktada

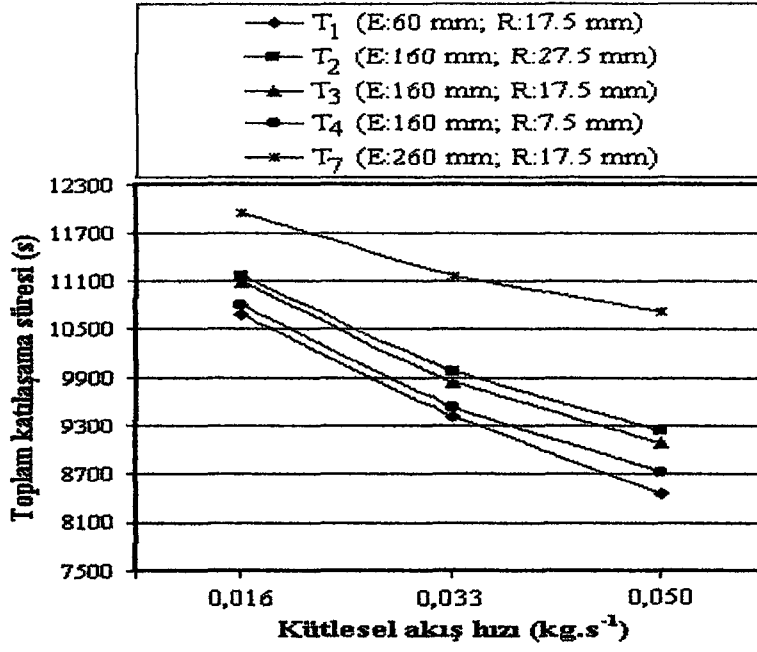
$D_{k-s} / D_0$  oranları birbirleriyle kıyaslandığında bu noktadaki katılma hızları ve soğuma süreleri arasındaki fark açıkça ortaya çıkmaktadır.

### 3.2.2.2. Isı Transfer Akışkanının Kütleli Akış Hızının ve Giriş Sıcaklığının Toplam Katılma Süresi Üzerindeki Etkisi

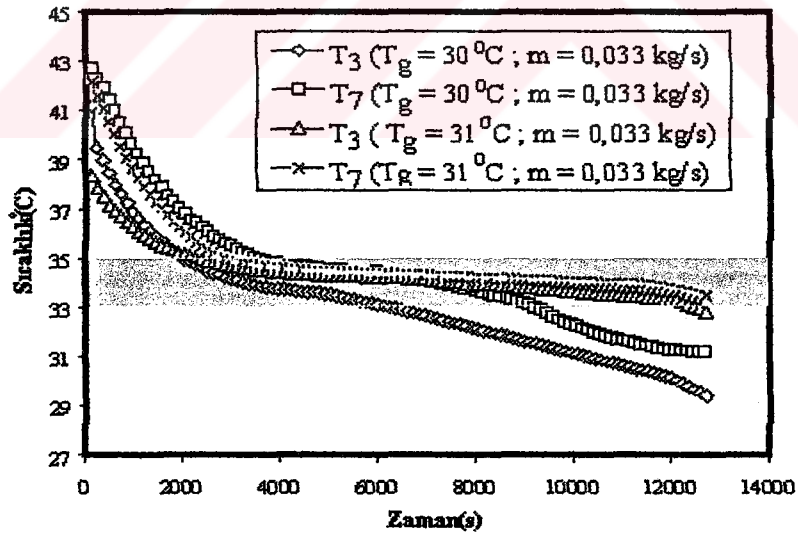
“Toplam katılma süresi” erimiş haldeki FDM sıcaklığının katılma sıcaklığının altına düşünceye kadar geçen zaman olarak tanımlandı. Isı transfer akışkanının kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığındaki değişimin LA-MA ötektik karışımının toplam katılma süresi üzerindeki etkisi nitel ve nicel olarak sırasıyla, Şekil 3.41- 3.44’de görülmektedir.



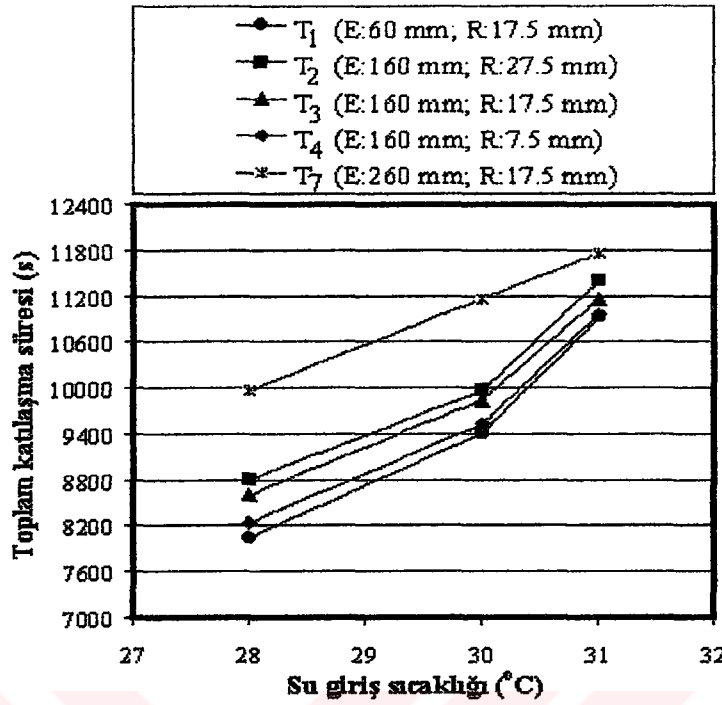
Şekil 3.41. Isı transfer akışkanının kütleli akış hızının toplam katılma süresi üzerindeki nitel etkisi



Şekil 3.42. Isı transfer akışkanının kütleli akış hızının toplam katılama süresi üzerindeki nicel etkisi



Şekil 3.43. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam katılama süresi üzerindeki nitel etkisi



Şekil 3.44. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının toplam katılaşma süresi üzerindeki nicel etkisi

Isı transfer akışkanının kütleli akış hızının toplam katılaşma süresi üzerindeki etkisini Şekil 3.41’de T<sub>3</sub> ve T<sub>7</sub> noktaları için verilen eğrilerden nitel olarak gözlemek mümkündür. Kütleli akış hızı 2 kat artırıldığında FDM’nin toplam katılaşma süresi yaklaşık ortalama olarak; T<sub>1</sub> noktasında %13 , T<sub>2</sub> noktasında %10,50, T<sub>3</sub> noktasında %11,20, T<sub>4</sub> noktasında %11,9 ve T<sub>7</sub> noktasında ise %6,70 oranında azalmaktadır. (Şekil 3.42)

Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığındaki değişimin toplam katılaşma süresi üzerindeki etkisi Şekil 3.43’de verilen eğrilerden (T<sub>3</sub> ve T<sub>7</sub>) nitel olarak gözlenebilir. Giriş sıcaklığında yada (T<sub>e</sub>-T<sub>g</sub>) sıcaklık farkında 2°C’lik bir artış yapıldığında, FDM’nin toplam katılaşma süresi; T<sub>1</sub> noktasında yaklaşık %14,20 , T<sub>2</sub> noktasında %11,60 , T<sub>3</sub> noktasında %12,60 , T<sub>4</sub> noktasında %13 ve T<sub>7</sub> noktasında ise yaklaşık %10,50 oranında azalmaktadır (Şekil 3.44). Sonuçlardan da görüldüğü gibi soğuma periyodu süresince katılaşma aşağıdan yukarıya doğru gerçekleştiği için üst eksenel bölgedeki katılaşma süresi her iki deneysel parametreden daha fazla etkilenmektedir. Bununla birlikte, her iki etki elde edilen sonuçlar şu şekilde de değerlendirilebilir: Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığında ve akış hızında yapılacak bir artışla, kondüsiyonel ısıl direncin soğuma hızı üzerindeki etkisi azaltılmış ve buna bağlı olarak da FDM’nin radyal ve eksenel yöndeki katılaşma süresi kısaltılmıştır.

### 3.3. Laurik-Miristik Asit Ötektik Karışımının Isı Transfer Karakteristikleri

#### 3.3.1. Isı Transfer Katsayısı

Çalışmanın bu safhasında, farklı ısı transfer akışkanını giriş sıcaklıkları ve kütleli akış hızlarındaki ısı transfer akışkanının dış duvarı ile Laurik-miristik ötektik karışımı arasındaki ısı transfer katsayısı ortalama olarak hesaplandı. Isınma ve soğuma periyotları için ısı transfer katsayısı 3.2 genel eşitliği kullanılarak hesaplandı (Choi ve Choi, 2000; Sarı ve Kaygusuz, 2002a)

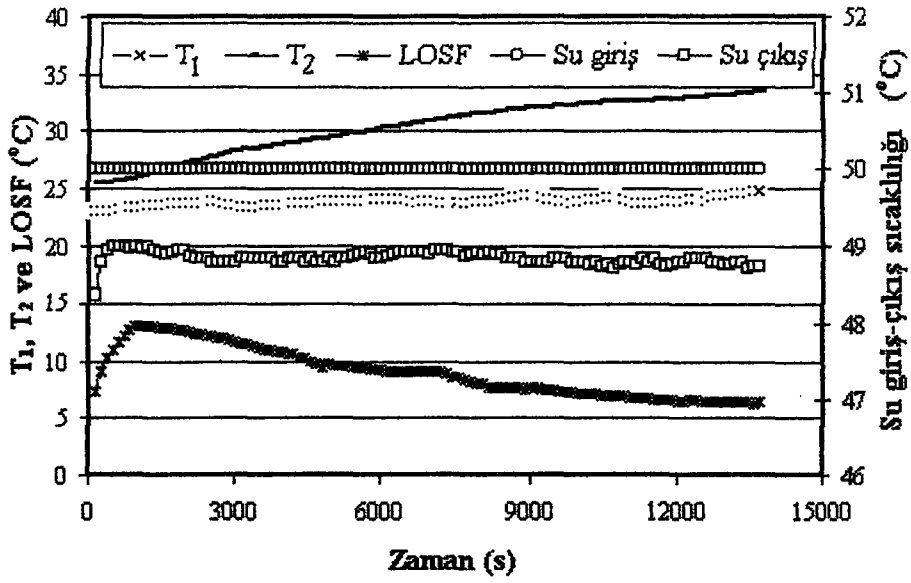
$$h = \frac{\dot{Q}_{\text{duy}}}{(A) \cdot (\Delta T_L)} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte; A, ısı transfer akışkan borusunun dış yüzey alanı,  $\dot{Q}_{\text{duy}}$ , ısı transfer akışkanının duyulur ısı transfer hızı.  $\Delta T_L$  ise ısı transfer akışkan borusunun dış duvarı ile FDM arasındaki logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır (LOSF).  $\dot{Q}_{\text{duy}}$  ve  $\Delta T_L$  3.3 ve 3.4 eşitlikleriyle hesaplandı.

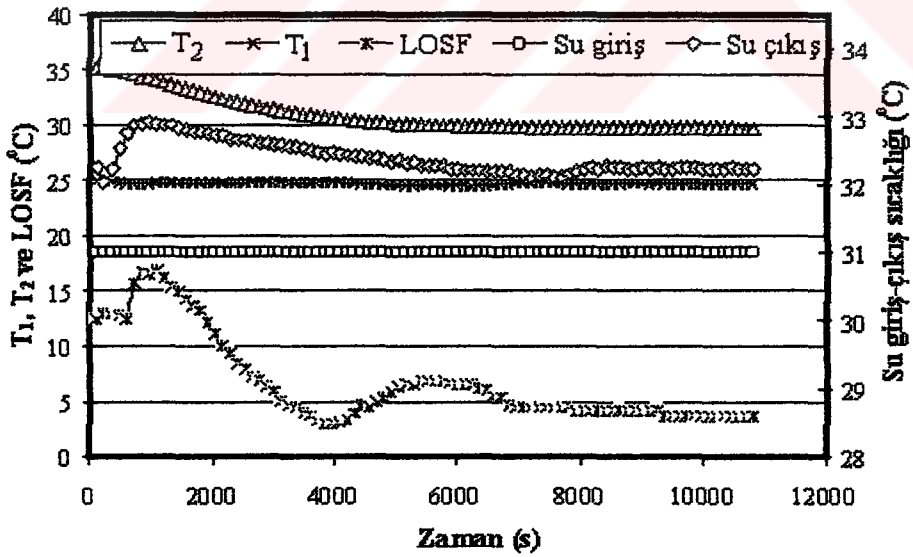
$$\dot{Q}_{\text{duy}} = \dot{m} c_s (T_g - T_\varphi) \quad (3.3)$$

$$\Delta T_L = \frac{(T9 - T8) - (T5 - T4)}{\ln[(T9 - T8)/(T5 - T4)]} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.3'de  $\dot{m}$  ve  $c_s$  sırasıyla, ısı transfer akışkanının (suyun) kütleli akış hızını ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ve spesifik ısısını ( $4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ) temsil eder.  $T_g$  ve  $T_\varphi$  ise sırasıyla, suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. Eşitlik 3.4'de T8 ve T4 ise, ısı transfer akışkan boru üzerindeki T5 ve T9 noktasına en yakın radyal noktadaki FDM sıcaklıklarıdır.



Şekil 3.45. FDM'nin ısınma periyodu süresince LOSF,  $T_1$ ,  $T_2$ , ve su giriş-çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi ( $T_g = 50^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg s}^{-1}$ )

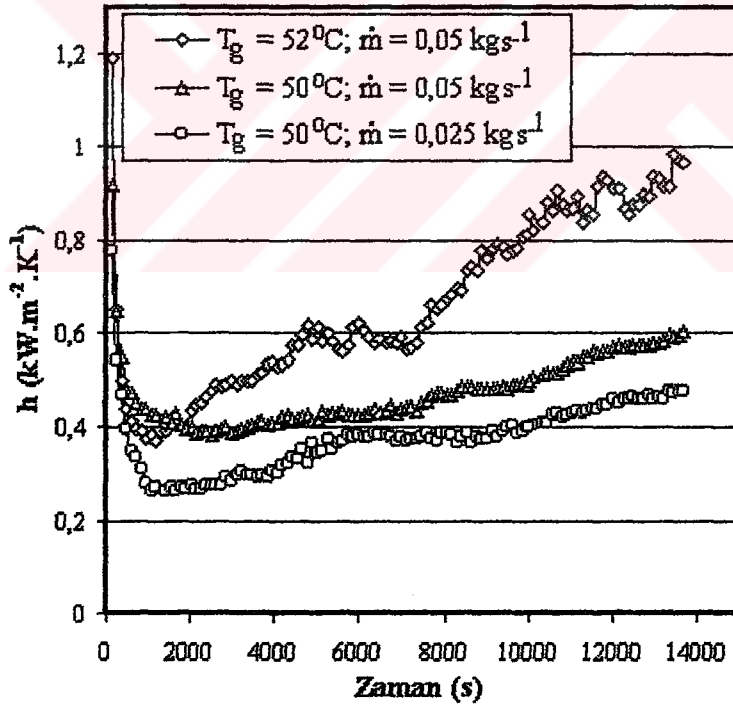


Şekil 3.46. FDM'nin soğuma periyodu süresince LOSF,  $T_1$ ,  $T_2$ , ve su giriş-çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi ( $T_g = 30^\circ\text{C}$ ; kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg s}^{-1}$ )



Şekil 3.45 ve 3.46'da sırasıyla FDM'nin ısınma ve soğuma periyotları süresince LOSF,  $T_1$ ,  $T_2$ , ve su giriş-çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Burada LOSF değerleri Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bulgular her iki periyot için ısı transfer katsayısı ve ısı fraksiyonunun hesaplanmasında kullanıldı. Şekillerden de görüldüğü gibi LOSF değerleri periyot başlangıcında yüksek iken daha sonra azalan değerler halindedir. Bu bulgu teorik beklenenle uyumludur. Diğer taraftan,  $T_2$  sıcaklığı ısınma periyodu süresince arttığı soğuma periyodu süresince azaldığı, fakat buna bağlı olarak  $T_1$  sıcaklığında her iki periyot süresince de oldukça küçük bir değişimin (yaklaşık  $25^{\circ}\text{C}$ 'de sabit kalmakta) olduğu açıkça görülmektedir. Bu gözlem FDM'nin ısı yükleme ve FDM'den ısının geri alınma süreçleri boyunca ısı kaybının oldukça düşük düzeyde olduğu anlamına gelmektedir.

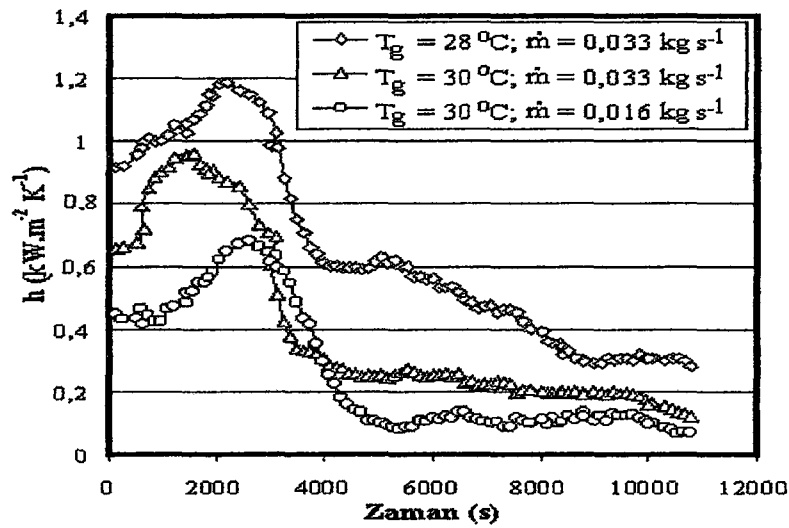
Şekil 3.47 ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızının sırasıyla ısınma periyodu süresince ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 3.47. Isınma periyodu süresince kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Eğrilerden de görüldüğü gibi periyot başlangıcında FDM ile ısı transfer akışkan boru arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı ısı transfer katsayısı yüksektir. Isınma periyodunun ileri safhasında bu sıcaklık farkının düşmesiyle azalan kondüksiyonel ısı transferinden dolayı ısı transfer katsayısı da zamanla azalmaktadır. Duyulur ısının absorblanmasıyla bir minimuma inen ısı transfer katsayısı FDM'nin faz değişimine uğramasıyla (erimeye başlamasıyla) birlikte artan doğal konveksiyondan dolayı tekrar yükselmektedir. Erimenin tamamlanmasından sonra ısı transferindeki bu artış durmaktadır (şekil 3.47). Yani FDM sıcaklığının faz değişim sıcaklığının üzerine çıkmasıyla sistem artık kararlı hale ulaşmaktadır. Farklı FDM'ler için ısınma periyodu süresince ısı transfer katsayısındaki bu şekildeki değişime benzer tarzdaki değişim bazı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Şekil 3.47'deki eğriler nicel olarak değerlendirilirse;  $T_g = 52^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg s}^{-1}$  deneysel şartı için ısı transfer katsayısı ortalama  $0,6660 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  olarak bulunur. Bu değer,  $T_g = 50^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,05 \text{ kg s}^{-1}$  için  $0,4775 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_g = 50^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,025 \text{ kg s}^{-1}$  için  $0,3770 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  olarak bulunur. Bu bulgulara dayanarak; FDM'nin ısınma periyodu süresince kütleli akış hızının iki kat ve giriş sıcaklığının  $2^\circ\text{C}$  artırılmasıyla ısı transfer katsayısının sırasıyla %27 ve %40 oranında artacağını ifade etmek mümkündür.

FDM'nin soğuma periyodu süresince ısı transfer katsayısının kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.48 görülmektedir.



Şekil 3.48. Isınma periyodu süresince kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Şekilde 3.48 de görüldüğü gibi, duyulur ısının salıverilmesiyle maksimuma çıkan ısı transfer katsayısı faz değişimi ve gizli ısının salıverilmesiyle birlikte azalmaya başlayacaktır. Katılaşma ile birlikte oluşan kütlenin ısı transfer akışkanı ile sıvı faz Şekil 3.48’de verilen ısı transfer bulgularını dikkate alarak,  $T_g = 28^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg s}^{-1}$  deneysel şartı için ısı transfer katsayısı ortalama  $0,5640 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  olarak bulunur. Bu değer,  $T_g = 30^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,033 \text{ kg s}^{-1}$  için  $0,4290 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_g = 30^\circ\text{C}$  ve kütleli akış hızı:  $0,016 \text{ kg s}^{-1}$  için  $0,3470 \text{ kWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  olarak bulunur.

Isı transfer akışkanının kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısınma ve soğuma periyotları için ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi mukayese edilirse; ısınma süresince bu parametrelerin konveksiyon üzerindeki etkisinin soğuma esnasındaki konduksiyon üzerindeki etkisine kıyasla yüksek olduğu söylenebilir. kütleli sayısındaki artışın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi soğuma periyodundakine kıyasla daha yüksektir.

### 3.3.2. Isı Fraksiyonu

Isınma periyodunun herhangi bir  $t$  anında FDM’ye yüklenen veya soğuma periyodunun herhangi bir  $t$  tanında FDM’den çekilen ısının yüklenen ya da boşaltılan toplam ısıya oranı,  $t$  anındaki ısı fraksiyonunu ( $Q^+$ ) verir. Bu ifadeye göre, LA-MA ötektik karışımının ısınma ve soğuma periyotları süresince ısı fraksiyonları 3.6’da verilen eşitlikle hesaplandı (Cho ve Choi, 2000; Sarı ve Kaygusuz 2001a; Sarı ve Kaygusuz, 2002a).

$$Q^+ = \frac{\int_0^t \dot{Q} dt}{Q_t} \quad (3.6)$$

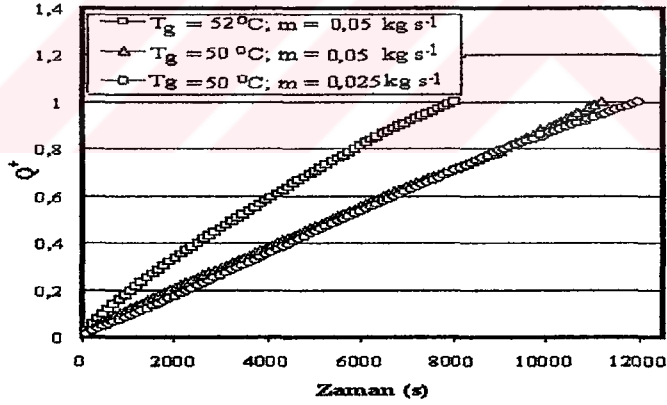
Eşitlik 3.6’da  $Q_t$ , FDM’nin ısınma ya da soğuma periyodu süresince sisteme yüklenen veya sistemden çekilen toplam ısıyı ifade eder.  $\dot{Q}$ , ise faz değişim işlemi süresince ısı akış hızını sembolize eder.  $\dot{Q}$  ve  $Q_t$  terimleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplandı.

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_{diy}) - \frac{2\pi Lk(T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3.7)$$

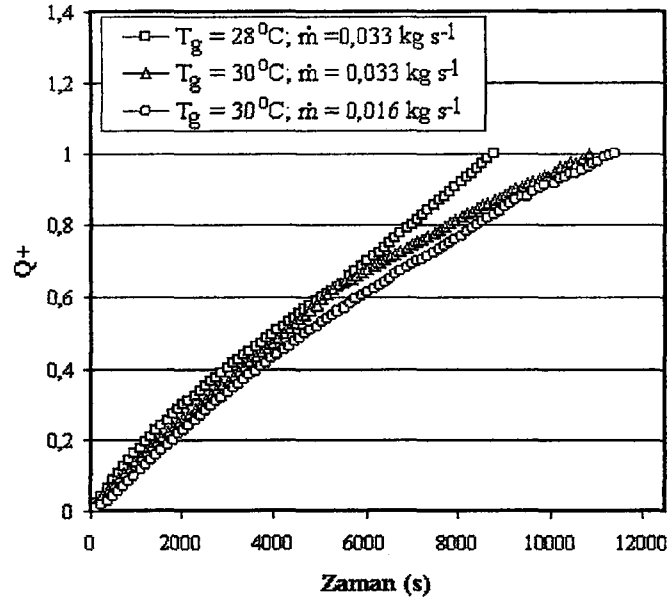
$$Q_t = \int_0^{t_1} \dot{Q} dt + \int_1^{t_2} \dot{Q} dt + \dots \int_{n-1}^{t_n} \dot{Q} dt \quad (3.8)$$

3.7 eşitliğinin sağ tarafındaki ikinci terim, ısınma ve soğuma periyotları süresince enerji depolama ünitesinden çevreye olan ısı kayıp hızını temsil etmektedir

Kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısınma ve soğuma işlemleri süresince ısı fraksiyonu üzerindeki etkisi sırasıyla, Şekil 3.49 ve 3.50'de görülmektedir. Isınma periyodu için kütleli akış hızının 2 kata çıkması için gerekli süre (faz değişim işleminin tamamlanması için gerekli süre) yaklaşık 960 s kadar azalmaktadır (Şekil 3.49). Diğer taraftan, ısınma periyodu için ( $T_g - T_e$ ) sıcaklık farkı  $2^\circ\text{C}$  arttırıldığında ısı fraksiyonunun 1'e ulaşması için gerekli süre yaklaşık 3160 s kadar azalmaktadır (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. Kütleli akış hızı ve giriş sıcaklığının ısınma periyoduna ait ısı fraksiyonları üzerindeki etkisi



Şekil 3.50. Kütlesel akış hızı ve giriş sıcaklığının soğuma periyoduna ait ısı fraksiyonları üzerindeki etkisi

Soğuma periyodu için kütlesel akış hızı 2 katına çıkarıldığında ısı fraksiyonunun 1'e ulaşması için gerekli süre yaklaşık 480 s kısalmaktadır. Giriş sıcaklığı  $2^\circ\text{C}$  arttırıldığında ısı fraksiyonunun 1 olması için gerekli süre yaklaşık 1090 s kısalmaktadır (Şekil 3.50).

Bu sonuçlardan şu yargıya varılabilir: LA-MA ötektik karışımının ısınma periyoduna ait ısı fraksiyonu soğuma periyoduna ait ısı fraksiyonuna kıyasla, kütlesel akış hızı ve giriş sıcaklığında yapılan artıştan daha fazla etkilenmektedir.

#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada güneş enerjisiyle direkt veya dolaylı (aktif veya pasif) bina ve sera ısıtılması, sıcak su eldesi, elektronik cihazların soğutulması, güneş destekli ısı pompası ile yüzey ısıtma gibi ısı uygulamalarında enerjiyi faz değişimi yoluyla gizli ısı şeklinde depolayan kimyasal bir maddenin laboratuvar şartlarındaki enerji depolama ve ısı transfer davranışları deneysel olarak incelendi. Yüksek erime noktasından dolayı laurik asit ve miristik asidin ülkemizin bazı iklim bölgelerinde yukarıda belirtilen ısı uygulamalar için FDM olarak kullanımları pek uygun değildir. Bu amaçla daha düşük sıcaklıkta eriyen bir FDM'nin geliştirilmesi ve literatüre kazandırılması düşünülerek, laurik asit (LA) ve miristik asitten (MA) oluşan ikili bir ötektik karışım hazırlandı.

Çalışmanın ilk safhasında, DSC analiz tekniği kullanılarak LA-MA ikili karışımının ötektik bileşim oranı, erime noktası ve erime gizli ısısı ölçüldü. Çalışmanın ikinci safhasında ise, bu karışım pratikte gerçek bir ısı depolama sisteminde kullanılmadan önce maddeyi daha iyi tanıyabilmemiz için faz değişim ve ısı transfer özellikleri deneysel olarak araştırıldı. Bu amaçla laboratuvarında oluşturulan deney düzeneğinde LA-MA ötektik karışımının farklı deneysel şartlardaki enerji depolama özellikleri belirlendi. Bulguların değerlendirilmesi ve yorumlanması için ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızları deneysel parametreler olarak seçildi. Yapılan tüm deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

- LA-MA ötektik karışımı için kütlece bileşim oranı %66 LA ve %34 MA olarak belirlenmiştir. Bu ötektik karışımın erime noktası  $34,2^{\circ}\text{C}$  ve erime gizli ısısı  $166,8 \text{ J.g}^{-1}$  olarak DSC analiziyle ölçülmüştür.

- DSC analizi sonucunda laurik-miristik asit ötektik karışımının elde edilen faz değişim gizli ısısının parafinler ve tuz hidratlar gibi diğer FDM'lerle mukayese edilebilecek kadar yüksek olduğu görülmüştür. Güneş enerjisiyle direkt veya dolaylı (aktif veya pasif) bina ve sera ısıtılması, sıcak su eldesi, elektronik cihazların soğutulması, güneş destekli ısı pompası ile yüzey ısıtma gibi ısı uygulamalarında bu karışımın potansiyel bir FDM olarak kullanılabileceği düşünülebilir.

- Laurik-miristik asit ötektik karışımının incelenen enerji depolama karakteristikliklerinden radyal yönde ısı transfer akışkan borusundan ısı depolama tankının

dış yüzeyine doğru gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Öte yandan ısınma işlemi aksel yönde önce alt kısımdan başlar ve daha sonra yukarıdan aşağıya doğru gerçekleşmektedir. Aksel yöndeki soğuma işlemi ise aşağıdan yukarı doğru gerçekleşmektedir.

- Isınma işlemi süresince FDM içindeki moleküler hareketlilik artacağından faz değişim işlemi kondüksiyon yerine daha çok konveksiyonla ısı transferi şeklinde olacaktır. Soğuma işlemi ise kondüksiyon ısı transfer mekanizmasıyla kontrol edilmekte ve ısı iletimi kondüksiyonlu ısı dirençle engellenmektedir.
- Isı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızındaki değişimlerin erime süresi üzerindeki etkisinin katılma süresine nazaran daha fazla olduğu görülmüştür.
- Isınma periyodu süresince ısı transfer akışkan borusu ile FDM arasındaki ısı transfer katsayısı soğuma işlemine oranla ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızındaki değişimlerden daha fazla etkilenmektedir.
- Soğuma işleminde zamanla büyüyen katı FDM'nin meydana getirdiği kondüksiyonel ısı direncin ısı boşaltma hızı üzerindeki etkisi ( $T_e - T_g$ ) sıcaklık farkının artırılmasıyla büyük oranda azaltılabilir.
- Isı fraksiyonu soğuma periyoduna oranla ısınma periyodunda ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve kütleli akış hızındaki değişimlerden daha fazla etkilenmektedir.

Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda faz değişim maddesi olarak kullanılan laurik-miristik asit ötektik karışımının pratik amaçlı enerji depolama uygulamalarında kullanılabilir kadar faz değişim ve ısı transfer özelliklerine sahip olduğu söylenebilir. Fakat bu durum sadece deneysel uygulamada ki performansı için söylenmektedir, pratik uygulamalar için beklenmedik farklı sonuçların gözlemlenebileceği göz ardı edilmemelidir. Bu deneysel uygulamalarla pratik uygulamalar arasındaki doğabilecek farklılıkların giderilebilmesi için bu FDM'nin güneş kolektörleriyle entegre haldeki gerçek bir enerji depolama sistemindeki enerji depolama özelliklerinin de belirlenmesi için bir çalışma yapılması gerekmektedir. Hazırlanan bu FDM'nin uzun süre kullanım sonucunda ısı depolama karakteristiğinin gözlemlenmesi ve ısı kararlılığının ayrıca belirlenmesi gerekmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abhat, A., 1983. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage; Heat Storage Materials, Solar Energy, 30, 313-331.
- Banaszek, J., Domarnski, R., Rebow, M. ve El-Sagier, F., 1999. Experimental Study of Solid - Liquid Phase Change in a Spiral Thermal Energy Storage Unit, Applied Thermal Engineering, 19, 1253-1277.
- Banu, D., Feldman, D. ve Hawes, D., 1998. Evaluation of Thermal Storage as Latent Heat in Phase Change Material Wallboard by Differential Scanning Calorimetry and Large Scale Thermal Testing, Thermochemica Acta, 317, 39-45.
- Besley, D. E. ve Ramanarayanan, C., 1989. Thermal Response of a Pocked Bed of Spheres Containing a Phase-Change Material, International Journal of Energy Research, 13, 253-265.
- Bo, H., Gustafsson, E. M. ve Setterwall, F., 1999. Tetradecane and Hexadecane Binary Mixtures as Phase Change Materials ( PCMs) for Cool Storage in District Cooling Systems, Energy, 24, 1015-1028.
- Boyle, G., Renewable Energy; Power for a sustainable Future, Oxford University Press, United Kingdom, 1996.
- Cardelli, C., Salvetti, G. ve Tombori, E., 2000. n - Dodecane Melting Studied by The Combined Use of Different Calorimetric Modes, Thermochemica Acta, 364, 1-10.
- Cho, K. ve Choi, S. H., 2000. Thermal Characteristics of Parafin in Spherical Capsule During Freezing and Melting Processes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 3183-3196.
- Das S. ve Dutta, T.K., 1993, Mathematical Modeling and Experimental Studies on Solar Energy Storage in a Phase Change Material, Solar Energy, 51,3, 305-312.
- Dimaano, MNR. ve Escouto, A.D., 1998. Preliminary Assesment of a Mixture of Capric and Lauric Acids for Low Temperature Thermal Energy Storage, Energy, 23, 5, 421-427.
- Dimaano, MNR. ve Watanabe, T., 2002. The Capric - Lauric Acid and Pentadecane Combination as Phase Change Material for Cooling Applications, Applied Thermal Engineering, 22, 365-377.
- Dinçer, İ ve Rosen, M.A., Thermal Energy Storage Systems and Applications, John Wiley and Sons Ltd., England, 2002.
- Duffie, J.A. ve Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, A Wiley- Interscience Publication, USA, 1991.



- Farid, M.N., Hamad, F.A. ve Abu - Arabi, M., 1998. Phase Change Cool Storage Using Dimethyl- Sulfoxide, Energy Conversion of Management, 39,8, 819-826.
- Farid, M.N. ve Chen, X. D., 1999. Domestic Electrical Space Heating with Heat Storage, Proc. Instn. Mach. Engrs., 213, 83-92.
- Garg, H.P., Mullick, S.C.ve Bhargava, A.K., 1985. Solar Thermal Energy Storage, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Hasan, A., 1994. Thermal Energy Storage System with Stearic Acid as Phase Change Material, Energy Conversion and Management, 35, 843-856.
- Himran, S., Suwono, A. ve Monsoori, G.A., 1994. Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium, Energy Sources, 16, 117-128.
- Ghoneim, A. A., Klein, S. A. ve Duffie, J. A., 1991. Analysis of Collector Storage Buildings Walls Using Phase Change Materials, Solar Energy, 47, 3, 237-242.
- Hoogendoorn, C. J. ve Bart, G.C.J., 1992. Performance and Modelling of Latent Heat Stores, Solar Energy, 48, 1, 53-58.
- Kakaç, S., Paykoç, E. ve Yener, Y. Storage of Solar Thermal Energy, Kluwer Academic publishers, USA, 1989.
- Kauranen, P., Peippo, K. ve Lund, P.D., 1991. An Organic PCM Storage System with Adjustable Melting Temperature, Solar Energy, 46, 275-278.
- Kaygusuz, K., 1999. The Viability of Thermal Energy Storage, Energy Sources, 21, 8, 745-756.
- Khartchenko, N.V. Advanced Energy Systems, Taylor and Francis, USA, 1998.
- Kuen Shan Jaw, Chung King Hsu ve Jim Shing Lee, 2001. Thermal Decomposition Behaviors of Stearic Acid, Paraffin Wax and Polyvinyl Butyral, Thermochemica Acta, 67-368, 165-168
- Koopmans, A., 1999. Expert Consultation on Wood Energy, Climate and Health, Phuket, Thailand.
- Lane, G. A., 1983. Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, CRC Pres Inc., USA.
- Lacroix, M., 1993. Numerical Simulation of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit, Solar Energy, 50, 4, 357-367.
- Liu, Z. ve Chung, D.D.L., 2001. Calorimetric Evaluation of Phase Change Materials for Use as Thermal Interface Materials, Thermochemica Acta, 366, 135-147.

- Royon, L., Guiffant, G. ve Flaud, P., 1997. Investigation of Heat Transfer in A Polimeric Phase Change Material for Low Level Heat Storage, Energy Conversion and Manegement, 38,6, 517-524.
- Sarı, A. ve Kaygusuz, K., 2001a. Thermal Energy Storage System Using Stearic Acid as a Phase Change Material, Solar Energy, 71, 365-376.
- Sarı, A. ve Kaygusuz, K., 2001b. Thermal Performance of Miristic Acid as a Phase Change Material for Energy Storage Application, Renewable energy, 24, 303-317.
- Sarı, A. ve Kaygusuz, K., 2002a. Thermal Performanca of Palmitic Acid as a Phase Change Energy Storage Material, Energy Conversion and Manegement, 43, 863-876.
- Sarı, A. ve Kaygusuz, K., 2002b. Thermal and Heat Transfer Characteristics in a Latent Heat Storage System Using Lauric Acid, Energy Conversion and Manegement, 43, 2493-2507.
- Sarı, A. ve Kaygusuz, K., 2002c. Thermal Performance of a Eutectic Mixture of Lauric and Stearic Acids as PCM Encapsulated in the Annulus of Two Concentric Pipes, Solar Energy, 72, 6, 493-504.
- Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C. ve Schwarzer, K., 1996. Experimental Analyses and Numerical Modelling of Inward Solidification on a Finned Vertical Tube for a Latent heat Storage Unit, Solar Energy, 60, 5, 281-290.
- Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C. ve Schwarzer, K., 1999. Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System, Solar Energy, 65, 3, 171-180.
- Watanabe, T., Kikuchi, H. ve Kanzava, A., 1993. Enhancement of Charging and Discharging Rates in a Latent Heat Storage System by Use of PCM with Different Melting Temperatures, Heat Recovery Systems and CHP, 13,1, 57-66.
- Xiao, M., Feng, Bo. ve Gong, K., 2002. Preparation and Performance of Shape Stabilized Phase Change Thermal Storage Materials with High Thermal Conductivity, Energy Conversion and Manegement, 43, 103-108.
- Zhong, J. J., Zhong, J. L., He, S. M., Wu, K. Z. ve Liu, X. D., 2001. Thermal Studies on the Solid-Liquid Phase Transition in Binary Systems of Fatty Acids, Thermochimica Acta, 369, 157-160.
- Yücel, F.B., Enerji Ekonomisi, 1. Basım, Febel Ltd. Şti., Ankara, 1994.

## ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokulu Toklu İlkokulu, orta okulu Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu ve lise tahsilini Trabzon Fatih Lisesinde tamamladı. 1994-1995 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya bölümüne girdi. 1998 yılı yaz döneminde bu bölümden Kimyager ünvanı ile mezun oldu. 1998 yılı eylül döneminde Karadeniz teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı.1999-2000 yılları arasında askerlik görevini tamamladıktan sonra 2000 yılından itibaren yüksek lisans eğitimine devam etmektedir, halen Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı olarak Kimya Bölümünde 50/d kadrosunda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

