

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM)
KULLANILARAK TRANSFORMATÖRLERİN
SOĞUTULMASI

Erdal BÜYÜKBIÇAKCI
(Teknik Öğretmen)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Yrd.Doç.Dr. İsmail TEMİZ
Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL

İSTANBUL 2006

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM)
KULLANILARAK TRANSFORMATÖRLERİN
SOĞUTULMASI

Erdal BÜYÜKBIÇAKCI
(Teknik Öğretmen)
(141101220020089)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Yrd.Doç.Dr. İsmail TEMİZ
Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL

İSTANBUL 2006

ÖNSÖZ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında sorumluluğunu aldığım bu önemli Yüksek Lisans bitirme tezini olanaklarımın el verdiği çerçevede en iyi şekilde hazırlamaya çalıştım. Amacım, öğrenimim süresince değerli bölüm öğretim üyelerinden ve elemanlarından edindiğim bilgileri branşım ile ilgili bu konu üzerinde yoğunlaştırıp, bilime ve insanlığa faydalı olabilmektir.

Tezimin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen ve çalışmamın her aşamasında bana destek olan Yüksek Lisans Tez Danışmanlarım Yrd.Doç.Dr.İsmail TEMİZ ve Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL'a öncelikle şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

Ayrıca tezimizin içerik kısmında, her konuda yardımcı olan ve bu konunun fikir babası değerli hocam Prof.Dr.Ahmet Korhan BİNARK'a teşekkür ederim.

Tezimin deneylerinin yapılması aşamasında bana Karasu Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi Elektrik Bölümünün kapılarını açan, her türlü ekipman ve teçhizatını kullanma yardımını veren Bölüm Şefi Tek.Öğr.Ali KAYA'ya, M.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü çalışanlarına, Enstitü Sekreteri Nebahat ARSLAN AVCI'ya ve sevgili eşim Zeynep BÜYÜKBIÇAKCI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

MAYIS 2006

Erdal BÜYÜKBIÇAKCI

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKLER	II
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
SEMBOL LİSTESİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	X
TABLO LİSTESİ	XIII
BÖLÜM I. GİRİŞ VE AMAÇ	1
I.1. GİRİŞ	1
BÖLÜM II. TRANSFORMATÖRLER VE SOĞUTMA	
ÇEŞİTLERİ	3
II.1. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA TEORİK BİLGİ	3
II.2. TRANSFORMATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI	7
II.3. TRANSFORMATÖRLERİN YAPILARI	8

II.3.1 Transformatörlerin Özellikleri	9
II.3.2 Transformatörlerin Çeşitleri	10
II.3.2.1. Güç Transformatörü	11
II.3.2.2. Trafo Merkezi Transformatörü	11
II.3.2.3. Dağıtım Transformatörü	11
II.3.3 Elektrik Enerjisinin İletim ve Dağıtımında	
Transformatörün Önemi	13
II.3.4 Transformatörün Kayıpları	14
II.3.4.1. Yüksüz Kayıplar	14
II.3.4.1.1 Yüksüz Kayıplardaki Histerezis Kayıpları	14
II.3.4.1.1 Yüksüz Kayıplardaki Girdap Akım Kayıpları	16
II.3.4.2. Yüklü Kayıplar	18
II.4. TRANSFORMATÖRLERİN SOĞUTULMASI	18
II.4.1 Transformatörlerin Soğutma Türleri	21
II.4.1.1. Transformatörlerin Soğutma Türüne Göre	
Sınıflandırılması	21
II.4.1.2. Transformatörlerin Soğutma Türünün Belirlenmesi	22
II.4.2 Transformatörlerde Soğutan Ortama Göre	
Soğutma Türleri	23
II.4.2.1. Hava İle Soğutma (Kuru Tip Transformatör)	23
II.4.2.2. Yağ İle Soğutma (Yağlı Tip Transformatör)	23
II.4.3 Temas Sıklığına Göre Soğutma Türleri.....	24
II.4.3.1. Tabii Soğutma	24
II.4.3.2. Zorlanmış Soğutma	24
II.4.4 Transformatör Tipine Göre Soğutma Türleri.....	24
II.4.4.1. Kuru Tip Transformatörlerde Soğutma	24
II.4.4.2. Yağlı Tip Transformatörlerde Soğutma	26
II.4.5 Transformatörlerin Yalıtım Sistemleri	27
II.4.5.1. Isıl Etmenler	27
II.4.5.1.1 Kararlı Durum Analizi	28
II.4.5.1.2 Isı Artışı Hesaplamaları	35

BÖLÜM III. FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM)

VE UYGULAMALARI 37

III.1. ISI DEPOLAMADA KULLANILAN FAZ DEĞİŞTİREN

MALZEMELER 39

III.2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (PCM) 39

III.2.1 Faz Değıştiren Malzemelerin Sınıflandırılması 40

III.2.1.1. Tuz Hidratlar 41

III.2.1.2. Parafinler 42

III.2.1.3. Parafin Olmayan Organik Maddeler 43

III.3. ISIL DEPOLAMA 44

III.3.1 Gizli Isı Depolama 45

III.3.1.1. Gizli Isı Depolama Maddesinin Seçimi 46

III.3.1.1.1 Faz Dönüşüm Sıcaklığı 47

III.3.1.1.2 Füzyon Isısı 47

III.3.1.1.3 Faz Ayırımı 47

III.3.1.1.4 PCM'in Doldurulduğu Kap 48

III.3.1.1.5 Yoğunluk... 48

III.3.1.1.6 Aşırı Soğuma ve Kristal Büyümesi 48

III.3.1.1.7 Kimyasal Kararlılık ve Uygunluk 49

III.3.1.1.8 Güvenlik 49

III.4. PCM İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 49

III.4.1 Elektrik Motorunun PCM İle Soğutulması Çalışması 55

III.4.1.1. Motor Dizaynı 55

III.4.1.2. Alan Tanımı 56

III.4.1.3. Blok Şema 56

III.4.1.4. İletkenlik, Termal Durgunluk ve Güç Kayıpları 58

III.4.1.5. Temel Modelin Deneysel Doğrulanması 59

III.4.1.6. Faz Değişim Malzemesinin Erimesiyle Soğuma :

Modelleme ve Simülasyon 60

III.4.1.7. Erime Modellemesinin Tanımı 61

III.4.1.8. Çalışmadan Çıkarılan Sonuçlar 62

BÖLÜM IV. FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM)

KULLANILARAK TRANSFORMATÖR SOĞUTMASI

DENEYSEL ÇALIŞMALARI	66
IV.1. MATERYAL VE METOD	68
IV.1.1 Materyal	68
IV.1.2 Deneyde Yapılması Planlanan Aşamalar	68
IV.1.2.1. Model Transformatörden Alınan Sıcaklık Değerleri	69
IV.1.2.2. Model Transformatöre Boş Alüminyum Folyo	
Sarılarak Alınan Değerler	76
IV.1.2.3. Model Transformatöre PCM Eklenmesi	81
IV.2. ALINAN SICAKLIK DEĞERLERİNİN	
KARŞILAŞTIRILMASI	87
IV.2.1 Model Transformatörden Alınan Sıcaklık Eğrileri	87
 BÖLÜM V. SONUÇLAR	92
 KAYNAKLAR	94
 EKLER	97
 ÖZGEÇMİŞ	102

ÖZET

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM) KULLANILARAK TRANSFORMATÖRLERİN SOĞUTULMASI

Gelişen teknolojiye paralel olarak transformatör soğutmalarında kullanılan yöntemler, transformatörlerin büyüklüklerine ve kullanım yerlerine göre değişiklikler göstermiştir. Transformatör nüvesinde ve sargılarında meydana gelen ısınn transformatörden uzaklaştırılması için uygulanan yöntemler yapılan bu çalışmada incelenmiştir.

Bu çalışmada transformatörlerin soğutma yöntemlerine alternatif bir yaklaşım olarak ısı depolayan kimyasal malzeme (PCM - FDM) kullanılması araştırılmış ve uygulanmıştır.

Yapılan bu çalışmada deneysel incelemeye ağırlık verilmiştir. Bu çalışmada transformatör soğutmasında kullanılmak üzere seçilen PCM malzeme, deney transformatörüne uygulanmıştır. Seçilen malzemenin transformatörü soğutması ile ilgili sonuçlar elde edilerek yorumlanmıştır.

Bu çalışmada; Bölüm I'de çalışmanın amacı anlatılmıştır. Bölüm II'de transformatör çeşitleri, transformatörlerin sınıflandırılması, transformatörlerin yapıları, soğutma türleri, yalıtım sistemleri, kuru tip ve güç transformatörlerinde uygulanan soğutma türleri incelenmiştir.

Bölüm III'de faz değıştiren malzeme (PCM) tanımı, çeşitleri ve özellikleri, sınıflandırılması, PCM ile ilgili yapılmış olan önceki çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca PCM'in döner alternatif akım makinesine uygulanması ile ilgili yapılmış olan bir çalışmada incelenmiştir.

Bölüm IV'de ise faz değıştiren malzemenin transformatöre uygulanması deneysel çalışmasında model olarak alınan transformatörün sıcaklık değeri PCM eklenmeden ve PCM malzeme kullanılarak alınmış ve sonuçları incelenmiştir.

ABSTRACT

COOLING TRANSFORMATORS BY USING PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)

In parallel with the developing technology, the methods used in cooling transformers have varied according to the size of the transformers and where they are used. Methods used for removing the heat in the transformer core and coils from the transformer are examined in this study.

In this study, the usage of chemical material for thermal storage (PCM - FDM) as an alternative approach to the cooling methods for transformers is searched and applied.

In this study, a strong emphasis is placed on experimental examination. PCM material, which is chosen to be used in the cooling of transformers, is applied to the experiment transformer. The results about how the chosen material cools the transformer are gathered and interpreted.

In this study; the aim of the study is explained in Part-I. In Part-II, types of transformers, classification of transformers, structure of transformers, types of cooling, insulation systems, cooling types used in dry and power transformers are explained.

In Part-III, the definition of phase change material (PCM), its types and their features, classification of PCMs, previous studies on PCM are examined. Moreover, a study on the application of PCM on the turning alternate current machine is examined.

In Part-IV, the temperature rates of the transformer that is taken as a model in the experimental study of the application of phase change material on the transformer are gathered both with and without PCM material and these rates are examined.

SEMBOL LİSTESİ

A	: Isının iletim yoluyla iletildiği kesit alan (m^2)
A_{ort}	: Ortalama alan (m^2)
a	: Transformator dönüştürme oranı
B^x	: Manyetik alan yoğunluğu (Wb/m^2)
$d\tau/dx$	: Kesit alanına normal gradyan
E_1	: Primerde indüklenen gerilim (Volt)
E_2	: Sekonderde indüklenen gerilim (Volt)
G	: Cismin yayıcılığı
G	: Demir ağırlığı (kg)
h_o	: Isıl iletkenlik katsayısı
h_1	: Yalıtkanın ısı iletkenlik katsayısı ($w/m.^0C$)
h_c	: Işınım katsayısı
h_R	: Işınımın eşdeğer ısı taşınım katsayısı
k_0	: Malzemenin ısı iletkenliği (W/mK)
L	: Uzunluk (m)
N_1	: Primer sarım sayısı
N_2	: Sekonder sarım sayısı
P_h	: Histerisiz kaybı (W)
P_{cu}	: Bakır kaybı (W)
q	: Isının zaman değişim oranı
q_v	: Birim hacimde üretilen ısı ($m^3/^0C$)
R	: Gaz sabiti (8,315 kJ/kmol K)
$T_{0,i}$	: Saf bileşenin (i) erime noktası (K)
T_i	: (i) Bileşenini içeren karışımın erime noktası (K)
T_1	: Işınım yapan yüzeyin mutlak sıcaklığı (K)
T_2	: Ortamın mutlak sıcaklığı (K)
T	: Mutlak Sıcaklık (K)

U_1	: Primer gerilimi (Volt)
U_2	: Sekonder gerilimi (Volt)
u, v	: x, y yönünde hız bileşenleri (m/s)
W_A	: Isı iletim ortamı ($W.m^2$)
W_T	: Nüve ve sargının toplam ısı kaybıdır(W)
x_i	: Karışımın ana bileşenlerinin mol kesri
x	: İki yüzey arasındaki ortalama uzaklık (m)
X_1	: Toplam yalıtkan yığını
X_T	: Toplam sargı yığını
Z	: Transformatör empdansı
θ_1	: Ilık ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkıdır (^0C)
θ_m	: Maksimum sıcaklık artışı (K)
θ	: Nüve ve sargı yüzeyi ve muhafaza yüzeyi arasındaki sıcaklık düşümü (^0C)
Φ	: Manyetik akı (Wb)
σ_h	: Malzemenin histerisiz kayıp katsayısı (Wb/kg)
$\Delta H_{0,1}$	: Saf bileşenin (i) ergime gizli ısısı (J/mol)
τ_1	: Ortalama nüve sıcaklığı (^0C)
τ_2	: Ortalama sargı sıcaklığı (^0C)
τ_3	: Ortalama nüve yüzey sıcaklığı (^0C)
τ_4	: Ortalama açık sargı yüzey sıcaklığı (^0C)
τ_5	: Muhafazanın ortalama yüzey sıcaklığı (^0C)
τ_6	: Çevre sıcaklığı (^0C)
τ	: Sıcaklık (^0C)
ε	: Işınım yapan yüzey yayıcılığı (kJ/kg)
σ	: Stefan - Boltzmann sabiti

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>SAYFA NO</u>
Şekil II.1 Transformatör Sargıları ve Basit Gösterimi	4
Şekil II.2 Demir Çekirdek Etrafına Sarılmış İki Farklı Bobinin Meydana Getirdiği Transformatör.....	5
Şekil II.3 Transformatörlerin Kullanım Yerleri	10
Şekil II.4 Üreticiye Ait Sistemdeki Kayıplar	12
Şekil II.5 Üretici Olmayan Dağıtım Sistemine Ait Kayıplar	12
Şekil II.6 Histerisiz Çevrimi	15
Şekil II.7 Kalıcı Mıknatıslıkta Moleküllerin Durumu.....	16
Şekil II.8 Sac Plakanın Üzerine Dik Açılışla Gelen Manyetik Alan Vektörü.....	17
Şekil II.9 Demir Gövdede Meydana Gelen Manyetik Akımın ve Fuko Akımının Yönleri ve Sacların Transformatörün Demir Gövdesinde z Yönünde Dizilişi.....	17
Şekil II.10 Bir ve Üç Fazlı Kuru Tip Transformatörler	19
Şekil II.11 Üç Fazlı Yağlı Tip Transformatör	20
Şekil II.12 Tabii Soğutmanın İlkesini Gösteren Blok Diyagram	25
Şekil II.13 Hava İle Zorlanmış Soğutmanın Yapılışı.....	25
Şekil II.14 Tabii Soğutmalı Yağlı Transformatör	26
Şekil II.15 Bir Transformatördeki Isı İletiminin Elektriksel Eşdeğeri	30
Şekil II.16 Arasında Isının Düzgün Olarak Üretildiği Paralel Yüzeyleri İle Isıl Olarak İletken Cismin Kesiti	31
Şekil II.17 Bir Transformatördeki Isı İletiminin Basitleştirilmiş Elektriksel Eşdeğeri	36

SAYFA NO

Şekil III.1 Maddenin Hal Değişirme Evreleri	37
Şekil III.2 Faz değiştiren Isı Depolama Maddelerinin Sınıflandırılması ..	40
Şekil III.3 Motor Dizaynı ve Nod Yerleri	57
Şekil III.4 Blok Şema	58
Şekil III.5 Bütün Oluklardaki PCM	62
Şekil III.6 Sıcaklığın Zamanla Değişimi	63
Şekil III.7 Zamanla Değişen Eriyen Kütle	63
Şekil IV.1 PCM Malzemenin Kullanımdan Önceki Görünümü	67
Şekil IV.2 Model Transformatörün Ölçüleri	67
Şekil IV.3 Model Transformatörün 1 – 4 Arası Numaralandırılmış Alanları	69
Şekil IV.4 Model Transformatörün 5 – 8 Arası Numaralandırılmış Alanları	70
Şekil IV.5 Model Transformatörün Çıkışına Bağlanan Reostalar ve Ölçü Aleti	71
Şekil IV.6 Model Transformatörün Numaralandırılmış Kısımlarından Boş Alüminyum Folyo Sarılmış Sıcaklık Değerlerinin Alınması.....	80
Şekil IV.7 Deney Transformatörüne Eklenen PCM Malzeme Paketleri	81
Şekil IV.8 Deney Transformatörüne PCM Malzeme Yerleştirilmesi	82
Şekil IV.9 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	87
Şekil IV.10 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	87

SAYFA NO

Şekil IV.11 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	88
Şekil IV.12 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	88
Şekil IV.13 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	89
Şekil IV.14 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	89
Şekil IV.15 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	90
Şekil IV.16 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından	
Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	90
Şekil IV.16 Model Transformatörün Dış Gövde Sıcaklık Noktasından Alınan	
Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi	91

TABLO LİSTESİ

	<u>SAYFA NO</u>
Tablo II.1 Sistemdeki Transformatör Kayıplar	13
Tablo II.2 Soğutucu Madde ve Dolaşım Çeşitleri Simgeleri	22
Tablo II.3 Transformatörlerde Kullanılan Soğutucu Madde ve Soğutma Türüne Göre Harflerin Sıralanışı ve Anlamları	23
Tablo II.4 Yaygın Yüzeylerin Isıl İletkenlik Katsayıları	34
Tablo II.5 Yaygın Yüzeylerin Kızılötesi Işınım Yayıcılık Özellikleri	34
Tablo III.1. Enerji Depolamada En Çok Kullanılan Tuz Hidratlar	41
Tablo III.2 Teknik Saflıktaki Bazı Parafin Waksların Termofiziksel Özellikleri	43
Tablo III.3 Bazı Yağ Asitleri Ve Termofiziksel Özellikleri	44
Tablo III.4 Önceki Çalışmalara Genel Bir Bakış	54
Tablo III.5 Materyal Özellikleri	59
Tablo IV.1 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	71
Tablo IV.2 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	72
Tablo IV.3 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	72
Tablo IV.4 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	73
Tablo IV.5 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	73
Tablo IV.6 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	74

Tablo IV.7 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	74
Tablo IV.8 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	75
Tablo IV.9 Model Transformatörün Dış Gövdesinden Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	75
Tablo IV.10 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	76
Tablo IV.11 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	76
Tablo IV.12 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	77
Tablo IV.13 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	77
Tablo IV.14 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	78
Tablo IV.15 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	78
Tablo IV.16 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık	
Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan	
Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	79

Tablo IV.17 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	79
Tablo IV.18 Model Transformatörün Dış Gövdeden Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	80
Tablo IV.19 Transformatörün PCM' li Durumda 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	82
Tablo IV.20 Transformatörün PCM' li Durumda 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	83
Tablo IV.21 Transformatörün PCM' li Durumda 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	83
Tablo IV.22 Transformatörün PCM' li Durumda 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	84
Tablo IV.23 Transformatörün PCM' li Durumda 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	84
Tablo IV.24 Transformatörün PCM' li Durumda 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	85
Tablo IV.25 Transformatörün PCM' li Durumda 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	85
Tablo IV.26 Transformatörün PCM' li Durumda 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük).....	86
Tablo IV.27 Model Transformatörün Dış Gövdesinden Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)	86

BÖLÜM I.

GİRİŞ VE AMAÇ

I.1. GİRİŞ VE AMAÇ

Transformatörlerde meydana gelen bakır ve demir kayıpları transformatör sargılarının ve magnetik nüvenin ısınmasına neden olmaktadır. Bu ısının dış devreye aktararak transformatör sargı sıcaklığının düşürülmesi gerekir. Elektrik makinelerinin boyutlarını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de ısınmadır. Transformatör sargılarının yalıtımında kullanılan izolasyon maddelerinin belirli bir sıcaklık sınırı vardır. Transformatörün bu sıcaklık değerinin üzerinde çalışması sargı izolasyonlarının bozulması, delinmesi ve kısa devre olması gibi önemli sakıncalar ortaya çıkarmaktadır. Transformatörlerde oluşan ısıyı dış devreye iletebilmek için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Transformatörler imal edilirken Kuru transformatörler ve Yağlı transformatörler olarak imal edilirler. Kuru transformatörlerin soğutulmaları doğal ve zorlanmış olarak iki şekilde yapılır. Yağlı transformatörlerde ise transformatörler bir yağ tankı içersine yerleştirilerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Bu nedenle büyük güçlü transformatörlerde bakım maliyeti oldukça yüksektir. [1 – 4]

PCM sözcüğünün İngilizce anlamı "Phase Change Material" teriminin kısaltılmışıdır. Bu kavram “Durum Değişimindeki Madde' olarak Türkçe’ ye çevrilebilir. Maddenin durumunu değiştirmesi, örneğin katı durumdan sıvı duruma, yada sıvıdan gaz haline geçer. Madde belirli miktarda bir ısıyı alarak faz değiştirir. Maddenin faz değiştirmesine neden olan ısıya gizli ısı denir.

Bu süreç tersine çevrilirse, yani gaz durumundan sıvıya, ya da sıvı durumdan katı durumuna geçildiğinde, daha önce emilmiş olan enerji gene sıcaklıkta kayda değer bir değişiklik olmadan serbest kalıp açığa çıkmaktadır. Maddenin durumunda değişikli yapacak sıcaklık derecesinin dışındaki sıcaklıklarda madde ısıyı alışlagelmiş biçimde depolamakta yada vermektedir.

Bu çalışmada transformatörlerin soğutma yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemlere alternatif bir yaklaşım olan transformatörlerin faz değiştiren malzeme (PCM – FDM) kullanılarak soğutulması için deneysel bir çalışma yapılmıştır.

Transformatörlerin soğutma şartlarına bir alternatif olarak kullanılması önerilen PCM malzeme ile yapılmış olan uygulama çalışması neticesinde alınmış olan deney sonuçları bu çalışmada yer almaktadır. Model olarak alınan transformatörün yüklenerek en çok ısınan noktaları belirlenmiş ve daha sonra bu ısınan noktalara PCM malzeme yerleştirilerek soğutma yapması sağlanmıştır. Alınan deney sonuçları göstermiştir ki PCM malzeme transformatörün ısınan noktalarını aynı süre içinde soğutmuş ve belirli bir sıcaklık değerinde tutmayı gerçekleştirmiştir.

BÖLÜM II.

TRANSFORMATÖRLER VE SOĞUTMA ÇEŞİTLERİ

II.1. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA TEORİK BİLGİ

Elektrik enerjisinin en önemli özelliği üretildiği yerden uzak mesafelere taşınabilmesidir. Bu taşımanın verimli bir şekilde yapılabilmesi için gerilimin yeteri kadar yüksek olması gerekir. Alternatif akımla elektrik enerjisinin gerilimi transformatörler yardımı ile yükseltip düşürülebildiğinden, enerjinin alternatif akımla taşınması önemini korumaktadır.

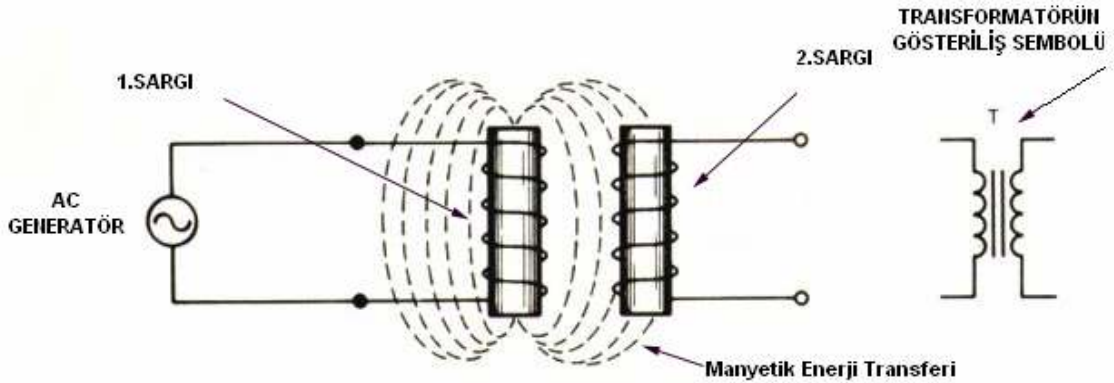
Transformatörler hareket etmeyen elektrik makinelerinden olup, belirli bir gerilimindeki elektrik enerjisini diğer bir gerilim değerine çevirmeye yararlar. Özellikle enerji iletimindeki rolleri çok önemlidir. Endüstride bir ve üç fazlı olarak üretilmektedirler. Kullanıldıkları yerler neresi olursa olsun, prensip bakımından daima aynıdır ve genel olarak toprağa karşı izole edilmiş iki sargı ile üzerinde sargıları taşıyan demir çekirdekten oluşurlar.

Transformatörün temel çalışma ilkesini 1831’de Michael Faraday bir deney sonucunda keşfetmiştir. Faraday demir bir halkanın çevresine iki yalıtkan tel sarmış sargılardan birinin uçlarını güçlü bir batarya ya, ötekini uçlarını da elektrik akımının algılanmasında kullanılan galvanometreye bağlamıştır. Faraday ne zaman bataryayı devreye alsa ya da devreden çıkarsa galvanometrenin göstergesinin hafifçe oynadığını, yani ikinci sargıdan anlık bir akım geçtiğini saptamıştır; buradan kalkarak ilk sargının ikincisinde anlık bir akım indüklediğini düşünmüştür.

Ayrıca, ikinci sargıdaki akım ancak birinci sargıdaki akımın değişmesi durumunda indüklendiğini bu akımın değişim göstermeden kesintisiz biçimde akması durumunda, ikinci sargıda herhangi bir değişim olmadığını görmüştür. Faraday'ın belirlediği bu olgu bütün transformatörlerin dayandığı ana ilkedir.

Elektromanyetik indükleme olarak adlandırılan bu olgu şöyle açıklanabilir: Batarya devreye alındığı zaman, birinci sargının çevresinde bir manyetik alan ikinci sargıyı da etkiler. Eğer değişim halindeki bu manyetik alanın yakınında bir tel varsa, bu değişim telden bir elektrik akımının akmasına neden olur. İşte bu nedenle, birinci sargıda bir elektrik akımı oluşur. Tıpkı bunun gibi, transformatörün bir bobini bir alternatif akım kaynağına bağlandığı zaman, akımdaki hızlı yön değişimleri sürekli olarak değişen bir manyetik alan ve böylece, ikinci bobinin uçları arasında değişken bir gerilim yaratır.

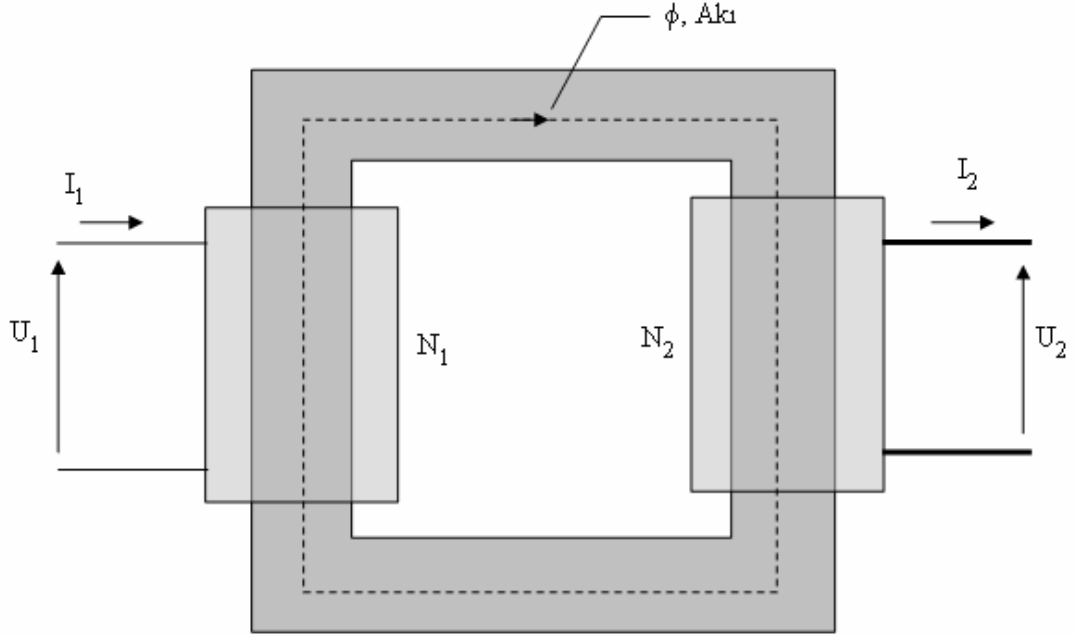
Transformatörler elektrik makineleri arasında hareket etmeyen makine grubundadır. Girişlerine uygulanan enerjinin büyük kısmı, niteliğini değiştirmeden, yine elektrik enerjisi olarak çıkış tarafına iletilir. Yani transformatörlerde enerji dönüşümü olmaz. Sadece yapılarında kullanılan değişik malzemelerde, küçük miktarda enerji şekil değiştirir ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Transformatörlerde enerji dönüşümü olmadığı için, ortamda hareketi sağlayan mekanik enerjide yoktur. [1]



Şekil II.1 Transformatör Sargıları ve Basit Gösterimi

Şekil II.1 de görülen 1. sargıya yani primer sargılarına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargı değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu alan, üstünde 2. sargı yani sekonder sargının bulunduğu manyetik demir nüve üzerinden devresini tamamlar. Primere uygulanan alternatif gerilimin zamana bağlı olarak her an yön ve şiddeti değiştiğinden, oluşturduğu manyetik alanında her an yön ve şiddeti değişir.

Bu alanın sekonder sargılarını kesmesi ile bu sargılarda alternatif bir gerilim indüklenir. Görüldüğü gibi primer ve sekonder sargılarının birbiri ile elektriksel hiçbir bağlantıları olmadığı halde sekonder tarafında manyetik indüksiyon yolu ile bir gerim oluşabilmektedir. [2]



Şekil II.2 Demir Çekirdek Etrafına Sarılmış İki Farklı Bobinin Meydana Getirdiği Transformatör

Şekil II.2 de verilen transformatör incelenecek olursa Faraday kanuna uygun olarak her bir sargıda indüklenen gerilimlerin ani değeri, E , ki bu aynı zamanda kayıplar ihmal edildiği için terminal uçlarındaki gerilimdir, U ,

$$U_1 = E_1 = N_1 d\Phi/dt \quad (II.1)$$

$$U_2 = E_2 = N_2 d\Phi/dt \quad (II.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N_1 ve N_2 her bir sargının sarım sayısı ve Φ de her iki sargıyı halkalayan akının ani değeridir. Yukarda verilen iki denklemi birbirine oranlarsak ve akının değişimi sinüs biçimli olduğundan fazör gösterimi kullanırsak

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

transformatör dönüştürme oranı a , bulunur. [3] (II.3)

Bir transformatörden akan akımlar arasındaki bağıntı ise Amper kanunu kullanılarak kapalı bir hat üzerindeki akının meydana getireceği toplam amper-sarım (mmk) kullanılarak yazılabilir.

$$\oint H ds = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (II.4)$$

Buradan akı yoğunluğunun bu kapalı hat boyunca integrali sıfır olduğundan, yukarıdaki ifade fazör olarak yeniden düzenlenirse,

$$a = I_2/I_1 = N_1/N_2 \quad (II.5)$$

yazabiliriz.

Şayet transformatörün ikincil tarafı herhangi bir empedans ile yüklenecek olursa transformatör bu empedansı diğer taraf ile uyumlulaştırma işlevini görecektir. İkincil tarafa bağlanan empedans,

$$Z_2 = U_2/I_2 \quad (II.6)$$

şeklinde hesaplanabilir. Gerilim ve akım birinci tarafa göre yazılacak olursa,

$$Z_2 = (N_2/N_1) U_1 / (N_1/N_2) I_1 \quad (II.7)$$

olur.

Bir ideal transformatörde kayıplar ve gerilim düşümleri ihmal edildiği için birinci tarafın volt-amper değeri ile ikinci tarafın volt-amper değerleri birbirlerine eşittir. Bu durumda kompleks güç,

$$S_1 = S_2 = U_1 I_1^* = U_2 I_2^* \quad (II.8)$$

şeklinde verilir. [3]

Bütün elektrik makinelerinde olduğu gibi transformatörlerde de kayıplar oluşmaktadır. Transformatörlerde meydana gelen bakır ve demir kayıpları transformatör sargılarının ısınmasına neden olmaktadır. Elektrik makinelerinin boyutlandırılmasında en önemli faktör ısınmadır. Bu ısınma özellikle transformatörün sargılarında ve demir nüvesinde oluşan kayıpların bir sonucudur. Isı kayıpları sargıdan geçen elektrik akımı sonucu oluşan bakır kayıpları ve manyetik endüksiyondan dolayı meydana gelen demir kayıplarıdır. Bu ısının dış devreye aktarılması transformatör sargı sıcaklığına düşürülmesi gerekir. Transformatör sargılarının yalıtımında kullanılan izolasyon maddelerinin belirli bir sıcaklık sınırı vardır. [4]

Transformatörün bu sıcaklık değerinin üzerinde çalışması önemli sargı izolasyonlarının bozulması, delinmesi ve kısa devre olması gibi önemli sakıncalar ortaya çıkarmaktadır.

Döner alan makinelerinde soğutmayı sağlayan hava akımları oluşmasına karşın, duran bir makine olan transformatörde soğutma değişik tip ve şekillerde yapılmaktadır. Transformatörlerde soğutma aracı olarak hava, yağ, su olmak üzere değişik şekil ve tipte soğutma türleri kullanılmaktadır. [4]

II.2. TRANSFORMATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI

Transformatörler çeşitli özellikleri göz önüne alınarak sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmalar aşağıda görüldüğü şekilde özetlenebilir:

1. Manyetik nüvenin yapılış şekline göre;
 - a) Çekirdek tipi
 - b) Mantel tipi
 - c) Dağıtılmış tip nüveli
2. Faz sayısına göre;
 - a) Primer ve sekonder sargılar aynı faza sahip olanlar
 - b) Primer ve sekonder sargılar farklı faza sahip olanlar
3. Soğutma şekline göre;
 - a) Kuru transformatörler
 - b) Yağlı transformatörler
4. Kuruluş yerlerine göre
 - a) İç tipi
 - b) Açık hava tipi
5. Sargı tiplerine göre
 - a) Silindirik sargı
 - b) Dilimli sargı
6. Çalışma prensibine göre
 - a) Sabit akımlı
 - b) Sabit gerilimli

7. Sargı durumlarına göre
 - a) Yalıtılmış sargılı
 - b) Oto transformatörler
8. Soğutucu cinsine göre
 - a) Hava ile soğutma
 - b) Yağ ile soğutma
 - c) Su ile soğutma
9. Kullanış amaçlarına göre
 - a) Güç transformatörleri
 - b) Ölçü transformatörleri
 - c) Çeşitli aygıt ve makinelerinde kullanılan transformatörler [2]

II.3. TRANSFORMATÖRLERİN YAPILARI

Transformatörlerin yapısında iki ana kısım vardır.

1. Manyetik Devre (Demir Gövde)
2. Sargılar

Manyetik devre, silisyum alaşımli, 0,35 mm kalınlığındaki saclardan oluşur ve bu sacların bir tarafı çok ince yalıtkanla kaplanarak fuko kayıplarının azaltılmasına çalışılır. Manyetik devre üç değişik şekilde imal edilebilir. Her imalat şeklinin şüphesiz ki diğerlerine göre avantajları ve sakıncaları vardır. Manyetik devre şekilleri, çekirdek tipi, mantel tipi ve spiral tip olarak sınıflanılır.

Transformatör sargıları genellikle bakır iletkenlerden yapılır, fakat alüminyum iletkenlerden imal edilen sargı tipleri de vardır. Sargılar transformatörün gücünün büyüklüğüne ve transformatörün soğutma şekline göre yuvarlak veya dikdörtgen kesiti olabilir. Bobinler yerlerine konmadan önce bobin ile demir gövde arasına çalışma gerilimine uygun özellikte, silindirik şeklinde izolasyon malzemesi yerleştirilir. Bunun amacı sadece bobinin demir gövdeye karşı yüksek gerimden korumak değil, aynı zamanda bobin yerleştirme işlemi sırasında bobinin dışarıda yapılmış izolasyonu darbelerden ve izolasyonu bozucu etkilerden korumaktır.

Transformatör işletmede olduğu zaman, sargılardan akan akımların yarattığı aksiyal ve radyal kuvvellerin etkileri altında kalır. Bunlar bobinleri aksiyal ve radyal eksenler boyunca hareket ettirmeye gayret ederler. [1]

Ancak bobinlerin bu iki yönde kesinlikle hareket etmemeleri gerekmektedir. Kuvvetlerin büyük olmasından dolayı kütlelerde küçük yer değiştirmeler meydana gelebilir. Çalışma esnasında vurutuya veya frekansı yüksek olan hareketlenmeler, titreşim ve gürültüye yol açarlar. Bu tip istenmeyen olayların önüne geçmek amacıyla aksiyal yöndeki kuvvetlerin etkilerini önlemek için alt ve üst boyunduruklar ile bobinler arasına takozlar yerleştirilir.

Transformatörlerde kullanılan iki değişik tip sargı çeşidi vardır.

1. Silindirik Tip Sargılar
2. Disk Tipi Sargılar

Transformatörlerde %95 oranında silindirik tip ve %5 oranında da disk tipi sargılar kullanılır. [1]

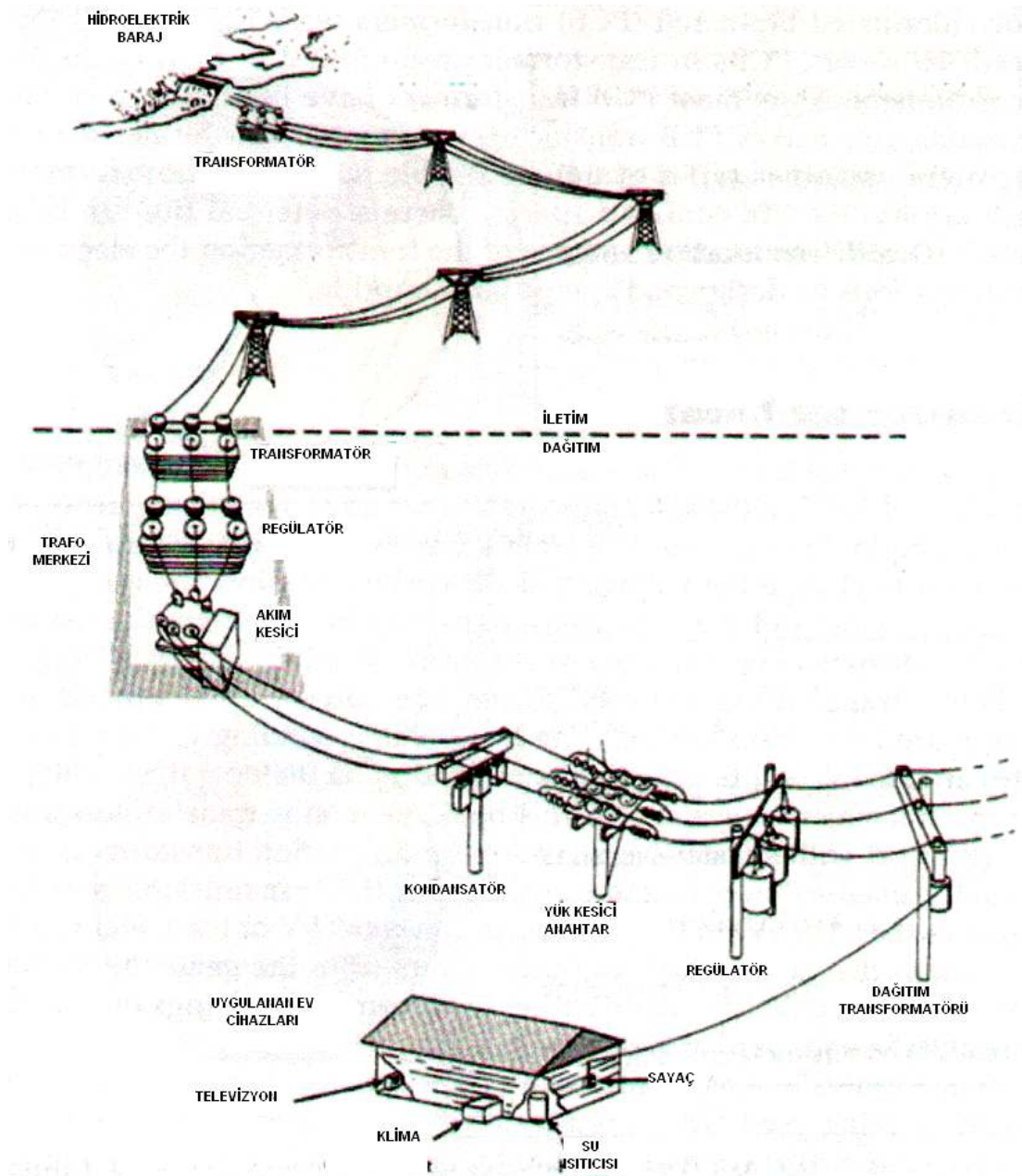
II.3.1. Transformatörlerin Özellikleri

Transformatörler hareket etmeyen elektrik makinelerinden olup, belirli bir gerilimdeki elektrik enerjisini diğer bir gerilimdekine çevirmeye yararlar. Özellikle enerji iletimindeki rolleri çok önemlidir. Bunlar endüstride bir ve üç fazlı olarak önemli sayıda kullanılmaktadırlar. Gerilim bakımından da tatbik alanları çok geniştir. İşletme gerilimleri birkaç volt alçak gerilim transformatörleri ve gerilimi milyon volt yüksekliğinde olan yüksek gerilim transformatörleri imal olunmaktadır. Transformatörlerin diğer elektrik makinelerinden üstünlükleri verimlerinin bütün diğer elektrik makinelerinden büyük oluşudur. Transformatörlerdeki verimin bu kadar büyük olmasının sebebi elektrik makinelerindeki gibi sürtünme kayıplarının bulunmamasıdır. Buna rağmen, sistemde çok sayıda transformatör kullanıldığından her birindeki az kaybın eklenmesiyle toplam kayıplar önemli miktara ulaşmaktadır. Bu nedenle transformatörlerin verimli çalıştırılmaları önem taşır.

Kullanıldıkları yerler neresi olursa olsun, prensip bakımından daima aynıdırlar ve genel olarak toprağa karşı izole iki sargı ile üzerinde sargıları taşıyan demir çekirdekten oluşurlar. Transformatörlerin yükseltici veya alçaltıcı olmasına göre primerin gerilimi sekonderden küçük veya büyük olabilir. [4]

II.3.2. Transformatör Çeşitleri

Genel olarak güç transformatörü, trafo merkezi transformatörü ve dağıtım transformatörü olmak üzere üç tipi vardır.. Şekil II.3'de trafo merkezin transformatörlerinden direk tipi dağıtım transformatörlerine kadar çeşitli transformatörlerin kullanım alanları gösterilmektedir. [5]



Şekil II.3 Transformatörlerin Kullanım Yerleri

II.3.2.1.Güç Transformatörü

Güç transformatörü genelde üretim merkezi transformatörü olarakta kullanılır. Üretim transformatörü, genellikle santral ve jeneratör gibi üretim birimlerinin hemen arkasına yerleştirilen büyük iki sargılı transformatördür. Genellikle 13.8 kV gibi jeneratör çıkış gerilimini 380 kV gibi yüksek iletim gerilimine yükseltmek amacıyla kullanılır. Bu tip transformatörler büyük boyutlu olup, kullanım alanına taşıma ve yerleştirme sorunları nedeniyle genellikle üç adet tek fazlı birim şeklinde imal edilir.

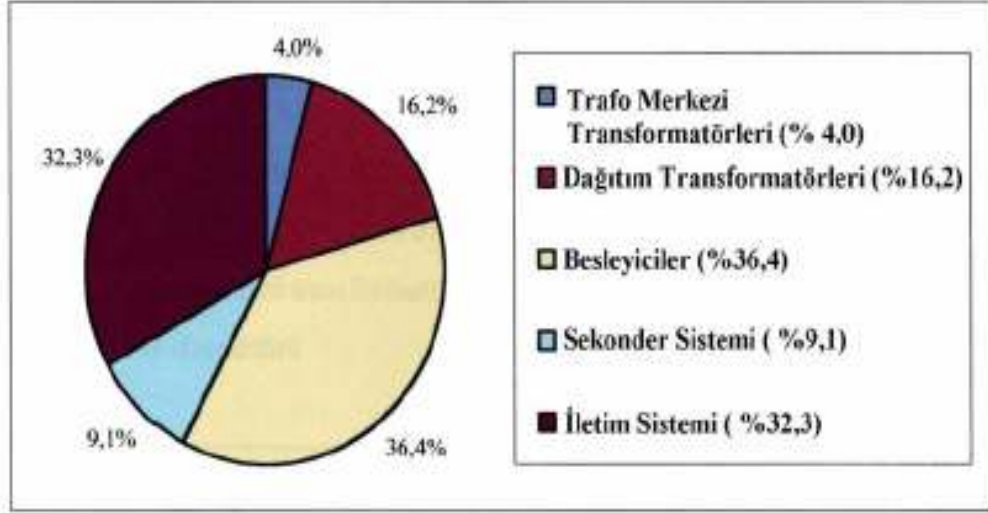
II.3.2.2.Trafo Merkezi Transformatörü

Güçleri 100 ile 500 kVA arasında olan trafo merkezi transformatörleri, jeneratörde üretilen düşük gerilimi yüksek iletim sistem gerilimine yükseltilmesi amacıyla kullanılır. Ayrıca trafo merkezlerinde genellikle 380 kV gibi çok yüksek gerilim seviyesinden 230 kV veya 115 kV gibi iletim seviyesine gerilimi düşürmek için üç fazlı, üç sargılı veya oto transformatör kullanılır.

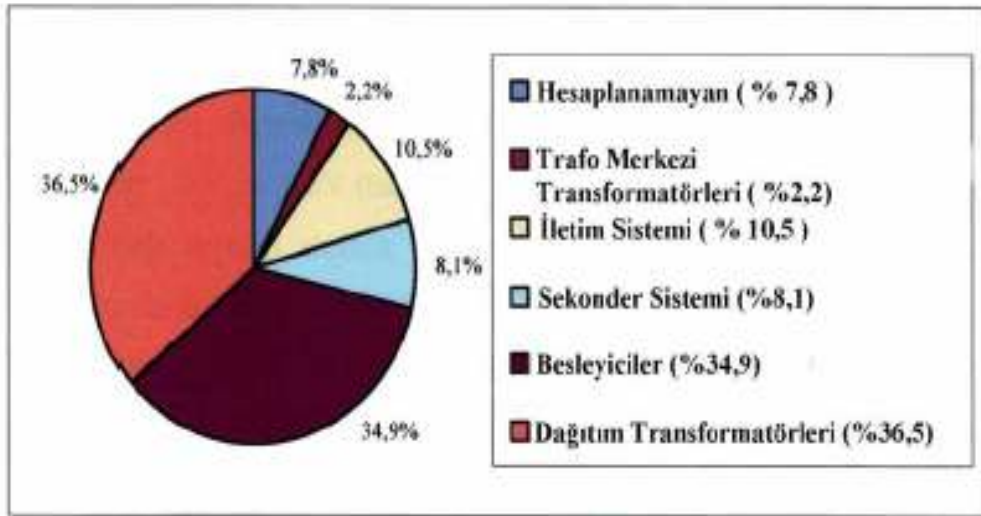
II.3.2.3.Dağıtım Transformatörü

Dağıtım bölgesindeki gerilimi düşürerek sanayi, ticari ve mesken bölgelerinin elektrik enerjisini sağlamak için tasarlanan dağıtım transformatörlerinin güçleri düşük olmasına rağmen sayı olarak diğer transformatörlerden daha çok kullanılmaktadır. Dağıtım transformatörü primer gerilimi 480V ile 69 kV arasında, sekonder gerilimi 120V ile 600V arasında, frekansı 45 ile 65 Hz arasında, gücü yağlı tip transformatörlerde 10 kVA ile 2500 kVA arasında veya kuru tip transformatörlerde 0.25 kVA ile 2500 kVA arasında olan transformatörlere denir. Ancak, güç dağıtım sistemlerinde kullanılmayan düzenleyici transformatörleri, makine gereç transformatörleri, kaynak transformatörleri, topraklama transformatörleri, test transformatörleri bunun dışındadır.

Dağıtım sisteminde, dağıtım transformatörleri trafo merkezi transformatörlerinden sayı olarak daha çok kullanılmasından dolayı daha fazla kaybın oluşmasına neden olmaktadır. BPA (Bonneville Power Administration)'ya ait 131 kullanıcısının kayıplarının araştırma sonuçları Şekil II.4 ve Şekil II.5 'de gösterilmiştir. [6]



Şekil II.4 Üreticiye Ait Sistemdeki Kayıplar



Şekil II.5 Üretici Olmayan Dağıtım Sistemine Ait Kayıplar

EPRI (Electric Power Research Institute)' nin çalışmasına göre 500 MW'lık sistemde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık % 1,4' ü transformatörün nüvelerine ve yaklaşık %1,3'ü transformatörün sargılarında enerji kaybına neden olmaktadır. Transformatör üreticileri verimi arttırmak için transformatörün nüve ve sargısına uygun miktarda malzeme eklemekte veya nüve ve sargıyı daha az kayıplı malzeme ile değiştirmektedir. Tablo II.1.'de 600 MW' lık sistemde kullanılan farklı transformatörlerin yıllık transformatör enerji kayıplarındaki payı gösterilmektedir. [5]

Tablo II.1 Sistemdeki Transformatör Kayıpları [5]

Transformatör Tipleri	Nüve (milyon kWh)	Sargı (milyon kWh)
Generatör Gerilim Yükseltici Transformatör	18	89
Güç Trafo Merkezi Transformatörü	67	138
Trafo Merkezi Transformatörü	97	114
Dağıtım Transformatörü	328	127
Toplam	510	468

II.3.3. Elektrik Enerjisinin İletim ve Dağıtımında Transformatörün Önemi

Elektrik enerjisinin üretildiği ve tüketildiği yerler arasında uzun mesafeler olabilmektedir. Santrallerde elektrik üretimi için kullanılan senkron generatörler 10 kV ile 30 kV (hat-hat) arasında bir gerilim üretebilmektedirler. Bu gerilimle üretilen elektrik enerjisinin, hatlardaki yüksek güç kaybı ve gerilim kaybı nedeniyle, doğrudan uzak mesafelere gönderilmesi olanaksızdır.

Bu nedenle, generatörde elde edilen elektrik enerjisinin gerilimini güç transformatörleri kullanılarak 380 kV ile 735 kV arasındaki bir gerilime düşürülerek tüketime sunulması gerekir. Örneğin, Karakaya Hidroelektrik Santrali İstanbul'dan 901 km (hat uzunluğu) uzaklıktadır. Karakaya Hidroelektrik Santrali' nda kullanılan jeneratörlerin gerilimi 14,4 kV'tur. Karakaya Hidroelektrik Santrali' ndan İstanbul'a elektrik enerjisini taşımak için, 14,4 kV'luk gerilim güç transformatörleriyle 380 kV'luk yüksek iletim gerilimine yükseltilir, tüketim merkezlerine yaklaşınca transformatörlerle yüksek iletim gerilimi 380 kV'tan 154 kV'a, sonra 154 kV'tan, 33 kV'a, daha sonra 33 kV'dan 15,8 kV ile 10,5 kV'a en sonunda 15,8 kV ile 10,5 kV'dan alçak tüketim gerilimine (üç fazlı 380 V, tek fazlı 220 V) düşürülür.

II.3.4. Transformatörün Kayıpları

Toplam transformatör kayıpları yüksüz ve yüklü kayıpları şeklinde iki bileşene ayrılabilir.

Yüksüz kayıplar her zaman yükten bağımsız olarak transformatörün nüvesinde meydana gelmektedir, yüklü kayıpları transformatör yüklendiğinde transformatör sargısında oluşmaktadır ve yük akımının karesiyle değişmektedir.

II.3.4.1. Yüksüz Kayıplar

Transformatöre gerilim uygulandığında transformatör yükünden bağımsız olarak ortaya çıkan yüksüz kayıplar transformatörün nüvesinde günde 24 saat yılda 365 gün meydana gelmektedir. Yüksüz kayıplar sabittir ve transformatörün sekonderi açık devre edilerek ölçülür. Yüksüz kayıplarını;

- a) Nüve tabakalarındaki histerezis kayıpları,
- b) Nüve tabakalarındaki girdap akım kayıpları,
- c) Yüksüz akımlardan dolayı meydana gelen $I^2 R$ kayıpları,
- d) Di elektrik kayıpları ve Nüve mengersi, cıvatası ile diğer nüve bileşenlerinden oluşan kaçak akıları meydana getirir.

a) ve b)'deki histerezis ve girdap akım kayıpları yüksüz kayıpların %99'dan fazlasına neden olmaktadır. Yüksüz kayıpların büyük kısmını histerezis kayıpları meydana getirir. c) ve d)'deki kayıplar $I^2 R$ kayıplarının küçük olmasından dolayı yüksüz kayıpların yaklaşık %1'i kadar olduğundan genellikle ihmal edilir.

II.3.4.1.1. Yüksüz Kayıplardaki Histerezis Kayıpları

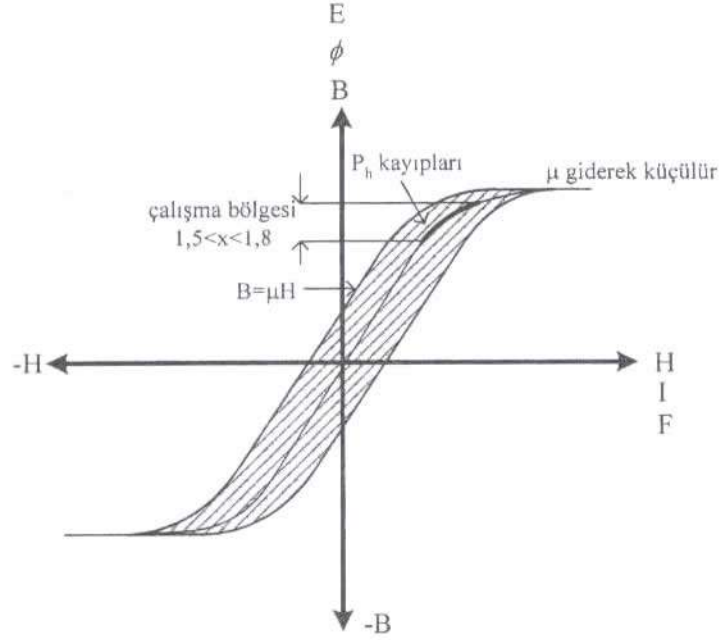
P_h , demir histerisiz kayıplarını temsil eder. Histerisiz kayıpları

$$P_h = \sigma_h \cdot B^x \cdot f \quad (II.9)$$

denklemleri ile bulunabilir.

Şekil II.6 da histerisiz çevrim eğrisi verilmiştir. Histerisiz eğrisinin elde edilmesinde dikkat edilecek husus, bobin akımının pozitif yönde, doymaya kadar sürekli artırılıp, negatif yönde sürekli azaltılarak eğrinin tamamlanmasını sağlamaktır. Bu işlem tamamlanırken, akım sanki alternatif akım gibi yön değiştirmiştir. Dolayısıyla kayıp gücün meydana gelmesi için alternatif akımın varlığı şarttır. [1]

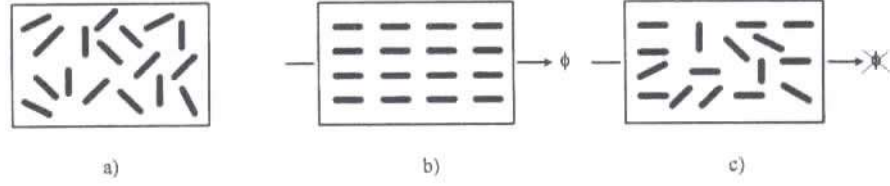
Histerisiz eğrisindeki bu iki eğrinin farklı yollardan apsis ve ordinat eksenlerini kesmesi ile ortaya çıkan fark alan, demire verilen ve demirden alınan enerji farkını, yani kayıp enerjiyi ortaya koyar.



Şekil II.6 Histerisiz Çevrimi

Alternatif akımda bir saniyedeki periyot sayısı (frekans) içi taralı alanı bu süre içinde sürekli taradığı için histerisiz kaybı frekansla doğru orantılı olarak artar. Histerisiz kayıplarının küçük olması için, histerisiz eğrisinin kapladığı alanın ve uygulanan frekansın küçük olması gerekmektedir. Çünkü histerisiz eğrisinde ortada bulunan, içi taralı bölgenin genişlemesi histerisiz kayıplarının arttığının işaretidir.

Şekil II.6 da görüldüğü gibi histerisiz eğrisinde çalışma bölgesi olarak gösterilen kısım yani dirsek bölgesi, malzemenin yavaş yavaş doymaya başladığını gösterir. Histerisiz eğrisinin elde edilişinde bobine verilen doğru akımın tek yönlü arttırılarak malzemenin akı olarak doymasını temin etmek esastır. Doyma elde edildikten sonra akım azalması ile B endüksiyonunun aynı eğri üzerinden dönmediği gözlemlenir. Bu durum manyetik olarak demir malzemeye verilen gücün geri kazanılmadığının göstergesidir. Malzeme mıknatıslanmadan önce yapıda düzensiz olarak bulunan moleküller akımın artması ile enerji kazanarak manyetik alan yönünde dizilirler. Bu durum Şekil II.7 de gösterilmiştir. [1]



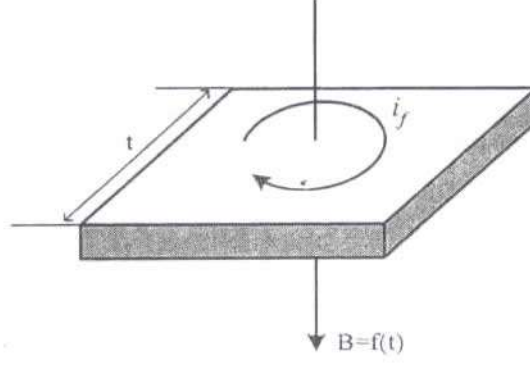
Şekil II.7 Kalıcı Mıknatıslıkta Moleküllerin Durumu a) Mıknatıslığı Olmayan Demir
b) Manyetik Alan İçindeki Mıknatıslık c) Kalıcı Mıknatıslık

Daha sonra bu alanın zayıflaması ve nihayet yok olması halinde moleküllerin çoğunluğu yapıda eski konumlarına döner. Geriye kalan küçük bir bölümde ise dışarıdan uygulanan mıknatıslayıcı enerji kaldırıldığı halde bu enerjinin yok olmadığı görülür. Bu nedenle B manyetik endüksiyonu, akım sıfır olduğu halde sıfıra gitmeyerek belli bir değerde kalır. çünkü arka arkaya dizilmiş olan moleküllerden bazıları eski haline dönmezler. Buna kalıcı mıknatıslık adı verilir ve malzemede kalıcı mıknatıslığın var olduğunu gösterir. [1]

II.3.4.1.2. Yüksüz Kayıplardaki Girdap Akım Kayıpları

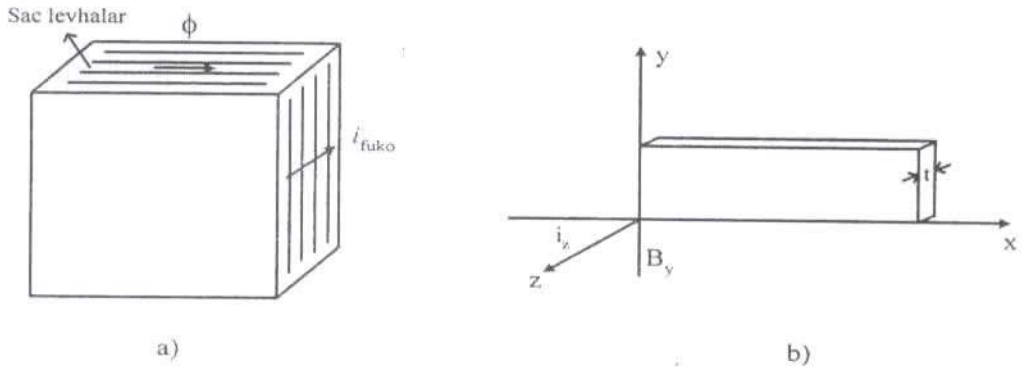
Genliğin değeri zamana göre değişen bir manyetik alan içinde bulunan ferromanyetik malzemeden yapılmış bir plaka sac düşünelim. Kalınlığı t olsun. Bu sac parçanın üzerine manyetik alan vektörünün 90° lik dik açı ile geldiğini varsayalım bu durumda sacın üzerinde Şekil II.8 de gösterilen yönde gerilim ve akım endüklenecektir. Gerilimin sacın elektriksel direnci ile orantılı olarak akıtacağı akım, sacın t kalınlığındaki kısmında akacak ve burada joule kaybı meydana getirecektir. Buna fuko kaybı adı verilir. Sakın kalınlığı olan t arttığında levhanın direnci azalacağından, fuko akımında büyüyecek ve joule kaybı da akımın karesi ile artacaktır. Bunun sonucunda sac aşırı derecede ısınacak ve üzerinde taşıdığı bobine onun izolasyonuna zarar verebilecek seviyeye ulaşarak, makinenin sağlıklı çalışmasını riske sokacaktır.

Bu nedenle demir malzemenin ısınması dikkate alınarak makine içinde gerekli soğutma tedbirleri alınmalı makinenin çalışmasına zarar verecek ısı değerlerini ulaşmasını engellemelidir.



Şekil II.8 Sac Plakanın Üzerine Dik Açılışla Gelen Manyetik Alan Vektörü

Fuko akımlarını küçük tutmanın yolu sacın kalınlığının mümkün olduğu kadar ince yapılması ve direncinin artırılmasıdır. Fakat bazı durumlarda bu bile yeterli değildir. Akıma karşı gösterilen direncin aktarılması için sacların bir tarafı yalıtılarak arka arkaya dizilirler. Bu suretle akımın sacdan saca geçmesine engel olunmuş olur. Eğer bu izolasyon tabakası olmaz ise saclar topluca bir kütle oluşturulacağından içinde endüklenen gerilim büyük bir fuko akımının akmasına yol açar. Artan fuko akımları etkisi ile sac fazlası ile ısınır ve bazı noktalarda akkor hale bile gelebilir. Bu bakımdan sacların bir tarafının yalıtılması şarttır. [1]



Şekil II.9 a)Demir Gövdede Meydana Gelen Manyetik Akımın ve Feko Akımının Yönleri b)Sacların Transformatörün Demir Gövdesinde z Yönünde Dizilişi

II.3.4.2.Yüklü Kayıplar

Transformatörün ikinci devresinde bir yük bağlandığı zaman, hem primer hem de sekonder sargıdan bir akım geçer. Bu akımlar sargıların dirençlerinden dolayı ($I^2.R$) şeklinde bir ısı kaybı oluştururlar. Bu kayıplara bakır kaybı da denir. Primerdeki bakır kayıpları $I_1^2.R_1$, sekonderdeki bakır kayıpları ise $I_2^2.R_2$ şeklinde bulunur. Birimleri wattır. Buna göre toplam bakır kaybı

$$P_{CU} = I_1^2.R_1 + I_2^2.R_2 \quad (II.10)$$

Transformatörün bakır kayıplarını primer veya sekondere göre bulunmuş eşdeğer dirençler yardımı ile de bulunabilir. Bu durumda,

$$P_{CU} = I_1^2.R_{e1} \quad (II.11)$$

$$P_{CU} = I_2^2.R_{e2} \quad (II.12)$$

Bakır kayıpları ısı şeklinde görülür. Bu nedenle bakır kayıplarına joule kayıpları da denilmektedir. Bakır kayıpları yüke göre değişen kayıplardır. Herhangi bir yükteki bakır kayıplarına, anma yükündeki bakır kayıplarından faydalanarak bulunabilir. Bunun için istenen yük akımının, anma akımına oranı bulunur, bunun karesi alınır ve anma yükündeki bakır kayıpları ile çarpılır. Bu ifadeyi aşağıdaki denklemde görebiliriz. [2]

$$P'_{CU} = P_{CU} \cdot \left(\frac{I'_2}{I_2} \right)^2 \quad (II.13)$$

II.4.TRANSFORMATÖRLERİN SOĞUTULMASI

Transformatörlerin çalışmasında demir gövdede oluşan histerisiz ve fuko kayıpları ile sargılarda meydana gelen joule kayıpları, sargıların ve demir çekirdeğin sıcaklıklarını belli bir zaman içinde yükseltir. Sıcaklığın yükselmesini önlemek için transformatörün içinde üretilen ısı enerjisinin transformatörün dışına atılması gerekir. Bu işleme soğutma denir. Isı enerjisinin transferi radyasyon ve konveksiyon yöntemleri ile gerçekleşir. [1]

Radyasyon yöntemi; ısınmış olan her malzemenin yaydığı gözle görülebilen veya ısınma vardır. Enerji bunun sayesinde bulunduğu ortamdan dışarıya atılır. Yağlı transformatörlerin çalışma sıcaklıkları 60 °C dir. Bu sıcaklıkta radyasyon ile yayılan ışıma enerjisi sıcaklığın çok düşük olmasından dolayı ihmal edilecek seviyelerde bir değere sahiptir. (%1)

Konveksiyon yönteminde; farklı sıcaklıklara sahip biri akışkan olan ortamlar birbiri ile temas ederek ısı transferini gerçekleştirirler (%99). Isı enerjisi sıcaklığını yüksek olan ortamdaki, sıcaklığı daha düşük olan ortama doğru yayılır. Dolayısıyla ısı enerjisini verene soğutulan ve enerjiyi alana ise soğuyan adı verilir. Transformatörlerde soğutulan esas itibarı ile demir çekirdek ve sargılardır. Soğutan ise bu iki eleman ile temas halinde olan ortamdır. Bu ortamın iyi yalıtkan, ısı transfer katsayısı yüksek olan, bol miktarda bulunan, ucuz bir malzeme olması gereklidir. Soğutanın cinsine göre soğutma sınıflara ayrılabilirdi gibi, soğutanın soğutulanla olan temas sıklığına göre de sınıflama yapmak mümkündür. [1]

Bütün makinelerde olduğu gibi, transformatörlerde de çalışma sırasında sargı ve demir kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar kendilerini buraları ısıtmak sureti ile hissettirirler. Sargı ve demir sıcaklıklarının fazla yükselmesini önlemek için buralarda açığa çıkan ısınn en uygun bir şekilde çevreye iletilmesi gerekir.

Bu ısınn açığa çıktığı yerlerden çevreye iletilmesinde soğutucu ortam olarak hava veya yağ kullanılmaktadır. Soğutma şekline göre transformatörler, kuru transformatörler (hava ile soğutulan) ve yağlı transformatörler (yağla soğutulan) diye iki kısma ayrılırlar.

Kuru tip transformatörler genel olarak küçük güçler için üretilmektedir. Genellikle kendi kendine ve çevreye taşınım yoluyla ısı verirler. Şekil II.6' da kendi kendine soğuyan kuru tip bir ve üç fazlı transformatörler görölmektedir. Burada hava kanallarının da çevreye etkili bir şekilde ısı vermesini sağlamak için bu kanalların havaya temaslarına engel olmayacak şekilde seçilmesi gerekir.



Şekil II.10 Bir ve Üç Fazlı Kuru Tip Transformatörler

Büyük güçler için kuru tip transformatörlerin kullanılması durumunda, transformatörün zorlanmış olarak da soğutulması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda vantilatör kullanılarak transformatörün birim zamanda çevreye verdiği ısı miktarı yükseltilmiş olur.

Yağlı tipte üretilen transformatörler genel olarak orta ve büyük güçlerde imal edilmektedirler. Buradaki soğutma şekli de kuru transformatörlerde olduğu gibi kendi kendine veya cebri yolla çevreye ısıyı taşımak şeklindedir. Kendi kendine soğuyan yağlı transformatörlerde yağ kabının yüzeyi düz saçlardan yapılırken, büyük güçlerdeki kendi kendine soğuyan yağlı transformatörlerde dalgalı kazan yüzeylerine soğutma yüzeyini artırmak için borular eklenir. Yağlı transformatörlerde soğutucu ortam trafo yağı olup, bu sargı ve demirden ısının kazan yüzeylerine taşınmasını sağlar. Havaya göre ısı iletimi daha yüksek olduğundan daha etkili bir soğutma etkisi oluşur ve iyi bir izolasyon sağlar. Şekil II.7’de üç fazlı yağlı bir transformatörün kullanıma hazır şekli görülmektedir.



Şekil II.11 Üç Fazlı Yağlı Tip Transformatör

Cebri olarak soğutulan transformatörlerde çeşitli metotlar uygulanmaktadır. Transformatör kazanı yüzeylerine vantilatörler yardımı ile hava üfleme sureti ile soğutma etkisini artırmak veya pompa yardımı ile yağı emip bir soğutucudan geçirmek ve sonra sıcaklık derecesi düşmüş yağı tekrar transformatör kazanına basmak suretiyle soğutma sağlanabilmektedir.

Ayrıca transformatör kazanı içinden soğuk su boruları geçirmek suretiyle kazan içindeki sıcaklığı uzaklaştırmak yöntemleri günümüzde kullanılmaktadır. [7, 8]

II.4.1. Transformatörlerin Soğutma Türleri

Transformatörlerde ısı artışı belirli sınırları aşmamalıdır. Bunun içinde iyi bir soğutma gerekmektedir. Transformatörün içinde oluşan ısıyı dışarıya iletebilmek için hava, yağ ve sudan faydalanılmaktadır. Günümüzde kuru tip transformatörlere epoksi reçine ile de soğutulma sağlanmaktadır. Transformatörlere uygulanan soğutma türü şu faktörlere göre belirlenir:

- a) Transformatörün çalışacağı yer ve işletme koşulları
- b) Transformatörden uzaklaştırılacak ısı miktarı
- c) Transformatörün yapım ve taşıma güçlükleri
- d) Transformatörün fiyatı ve işletme giderleri

II.4.1.1 Transformatörlerin Soğutma Türlerine Göre Sınıflandırılması

Transformatörler soğutma türlerine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

1. Doğal soğutmalı transformatörler
 - a) Doğal hava soğutmalı kuru transformatörler
 - b) Doğal hava soğutmalı yağlı transformatörler
 - c) Doğal hava soğutmalı, soğutucuları transformatörden ayrı yere konmuş yağlı transformatörler
2. Su ile soğutulan transformatörler
 - a) Su ile soğutulan bölümleri bulunan kuru transformatörler
 - b) Su soğutma sistemi, transformatör yağ kazanının içine yerleştirilmiş yağlı transformatörler
 - c) Su soğutma sistemi, transformatörün dışında olan yağlı transformatörler

3. Zorlanmış hava soğutmalı transformatörler

- a) Zorlanmış hava soğutmalı kuru transformatörler
- b) Zorlanmış hava soğutmalı yağlı transformatörler
- c) Zorlanmış hava soğutmalı, soğutucuları transformatörden ayrı yere konulmuş yağlı transformatörler [9]

II.4.1.2 Transformatörlerin Soğutma Türünün Belirlenmesi

Transformatörlerin soğutma türünün belirlenmesinde kullanılan soğutucu madde ve dolaşım çeşitleri için kullanılan harfler Tablo II.2’de görülmektedir.

Tablo II.2 Soğutucu Madde ve Dolaşım Çeşitleri Simgeleri

Soğutucu Madde	Simge	Soğutucu Maddenin Dolaşımı	Simge
Madensel Yağ veya Sentetik Yalıtkan Sıvı	O	Doğal (Tabii)	N
Yanıcı Olmayan Sentetik Yalıtkan Sıvı	L	Cebri	F
Gaz	G	Yağlı	D
Su	W		
Hava	A		

Soğutma türü transformatör imalatçısı tarafından dört harfle belirtilir. Tablo II.3’de bu harflerin kullanılış biçimleri görülmektedir. Kuru transformatörlerde sargılara yada sargıların yalıtkan bir madde ile (epoksi reçine) örtülü olması halinde bu maddeye değen soğutucu ortam için yalnızca iki harf ile gösterilirler. Bir transformatör için değişik bir soğutma türü kullanılmış ise (/) ile ayrılırlar. [1, 9]

Tablo II.3 Transformatörlerde Kullanılan Soğutucu Madde ve Soğutma Türüne
Göre Harflerin Sıralanışı ve Anlamları

1.Harf	2.Harf	3.Harf	4.Harf
Sargılara Değen Soğutma Maddesi İle İlgilidir.		Dış Soğutma Sistemine Değen Soğutma Maddeleri İle İlgilidir.	
Soğutucu Madde	Dolaşım Türü	Soğutucu Madde	Dolaşım Türü

II.4.2. Transformatörlerde Soğutan Ortama Göre Soğutma Türleri

Soğutma sınıflandırmasında soğutan ortama göre yapılan sınıflandırmada önemli olan demir çekirdek ve sargıların temas ettiği soğutan malzemenin cinsidir. Bu durumda iki seçenekle karşılaşılır. [1]

II.4.2.1.Hava İle Soğutma (Kuru Tip Transformatör)

Soğutan havadır ve iyi izolasyon malzemesidir (delinme dayanımı 30kV/cm). Isı transfer katsayısı kabul edilebilir büyüklükte olduğundan soğutma için elverişli bir ortam sağlar. Hava, bobinleri ve demir çekirdeği yalayarak soğutma işlemini yapar. Isınan hava yükselir ve yerini soğuk havaya bırakır. Böylece soğutma işlemi gerçekleşir. Bu konveksiyon yönteminin en güzel örneğidir.

II.4.2.2.Yağ İle Soğutma (Yağlı Tip Transformatör)

Transformatörün demir gövde ve bobinleri konveksiyon yöntemi kullanılarak yağ ile soğutulur. Yağ, transformatör yağı olarak bilinen özel kimyasal yapıya sahiptir. İyi ısı iletir ve iyi yalıtıcıdır. Yalıtkanlığı havaya göre 5 – 7 kat fazladır (Delinme dayanımı 150 – 250 kV/cm arasındadır). Bu nedenle yüksek gerilimli transformatörlerde yağ ile soğutma tercih edilir. Bu soğutma türünün sakıncalı yanı fazlasıyla higroskopik olması, rutubet kapalı bir yapıya sahip olmasıdır. Bu sorun gerekli önlemlerin alınması halinde, yağın kullanılmasına engel olabilecek bir duruma yol açmaz. Transformatörün emniyetli çalışması açısından, transformatör yağının delinme dayanımı belirgin aralıklarla kontrol edilmelidir.

Soğutana yağ olan transformatörün, yağının muhafazası için mutlaka bir tanka yerleştirilmesi gereklidir. Bu durumda yağ, çevre etkilerden ve rutubet kapmaktan korunur, bobinlerden ve demir gövdeden aldığı ısı enerjisini konveksiyon yolu ile kendini muhafaza eden tankın çelik gövdesine iletir ve onun ısınmasını sağlar. Tankın dışında bulunan soğutucu hava konveksiyonla tank yüzeyini yalar, ısı enerjisini alıp, yüzeylerin soğumasına neden olur. Bu çevrimin devamı ile transformatörün soğutulması sağlanır. [1]

II.4.3. Temas Sıklığına Göre Soğutma Türleri

Bu sınıflama şeklinde soğutan ile soğutulan ortamın temaslarındaki sıklık önemlidir. Sıklık, eğer kütleli olarak düşünülecek olursa, soğutan ortamın miktarını arttırmak anlamına gelir. Soğutan miktarının artırılması için soğutucunun soğutulanın üzerine daha fazla miktarda yönlendirilmesi gerekir. Yönlendirme işlemi dışarıdan başka bir enerji çeşidinin (örneğin elektrik enerjisi) kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Buna bir örnek olarak soğutucu havayı yönlendiren vantilatör veya yağı basınçla ileten bir yağ pompası verilebilir. Bu durumda sınıflandırma iki grup esas alınarak yapılır. [1]

II.4.3.1. Tabii Soğutma

Bu tür uygulamada soğutucu ortam kendi hali ile ısınan yüzeylere temas ederek yükselir ve yerine soğuk ortam gelerek soğutma işlemi yapılır.

II.4.3.2. Zorlanmış Soğutma

Eğer tabii soğutma yetersiz kalıyor ise, soğutucu ortamın ısınan yüzeylerle olan temas sıklığını arttırmak için zorlanmış koşullar kullanılır. Bu koşullar ortadan kalkınca tekrar tabii soğutmaya dönülür. Örnek : Vantilatör veya yağ pompasının kullanılması.

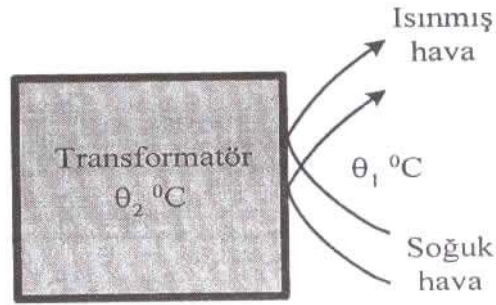
II.4.4. Transformatör Tipine Göre Soğutma Türleri

II.4.4.1. Kuru Tip Transformatörlerde Soğutma

Kuru tip transformatörler küçük güçte imal edildiklerinden ve genellikle kendi kendilerine soğuduklarından, soğutma tipi tabii soğutmadır.

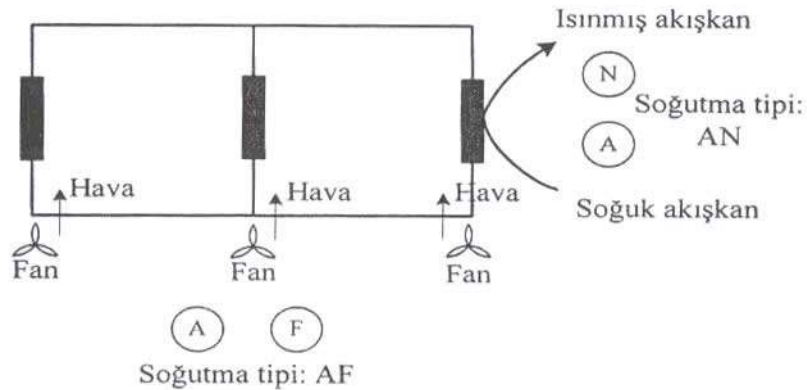
Şekil II.12. de tabii soğutma örneği verilmiştir. Burada yüzey ne kadar artarsa ısı transferi de aynı oranda artar. Dışarıya atılan ısı, yüzey ile doğru orantılıdır.

Yalanmak suretiyle transfer edilen enerji, malzemenin iletim katsayısına bağlıdır. Isı yüze­ye çarpıp yayıldığı için soğutma tabii soğutmadır ve 500 kVA gücüne kadar olan transformatörlerde bu soğutma kullanılır. Eğer soğutma için fan kullanılırsa zorlanmış soğutma olur. Yüksek gerilimde kuru transformatörü yapmak kolay değildir. İzolasyon ve g   problemleri ile karşılaşılır. Kuru transformatörlerde alçak gerilim sargısı epoksi reçine denilen bir malzeme ile havasız ortamda kaplanır. Bu ortamda yapılan kaplamada hava kabarcığı kalmadığından delinme dayanımı yüksek olan izolasyon elde edilir. Bu şekilde daha yüksek gerilimlere (30 kV) ve g  lere (2500 kVA kadar)  ıkılabilir. Rutubetli ve nemli ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir.



şekil II.12 Tabii Soğutmanın İlkesini Gösteren Blok Diyagram

şekil II.12 de sağ tarafta havanın transformatörün yüzeyine çarparak ısınıp yükselmesi gösterilmektedir, bu nedenle soğutma tipi tabii soğutmadır. Fakat şekil II.13 de aynı transformatörü soğutmak için fan kullanıldığı görülmektedir. Böylece soğutma türü zorlanmış soğutma haline getirilmiő olur. [1]



şekil II.13 Hava İle Zorlanmış Soğutmanın Yapılışı

II.4.4.2.Yağlı Tip Transformatörlerde Soğutma

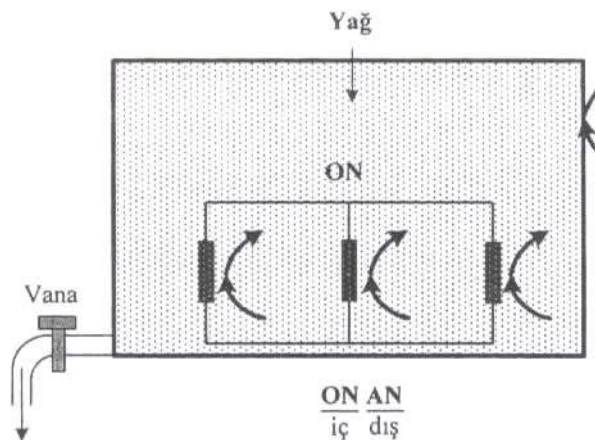
Yağlı tip transformatörler genel olarak orta ve büyük güçlerde imal edilirler. Soğutma tipi ya tabii soğutma ya da zorlanmış soğutma olabilir.

Şekil II.14 de görüldüğü gibi transformatörün dış yüzeyi havanın tabii hareketi ile soğuduğu için, dış yüzeyin soğuma şekli hava ile tabii soğutmadır. Ayrıca transformatör tankı içindeki sıcak yağın tank yüzeyine çarparak soğuması, tank ile tabii soğutma sınıfına girer. Şekil II.14 de bu açık olarak görülmektedir. Şekil II.13 de olduğu gibi, eğer sistemde iki değişik soğutulan varsa, önce birinci soğutulanın harfi, daha sonra ikinci soğutulanın harfleri verilir. Burada ilk olarak soğutulan transformatör, soğutulan yağ ve soğutma türü de tabii olduğundan ON (Oil – Natural) dir. İkinci soğutulan ise yağ ve kazan yüzeyi, bunları soğutan hava, soğutma türü tabii'dir ve AN olarak verilir (Air – Natural). İki harf grubu birleştirilerek transformatörün soğutma yöntemi ONAN olarak saptanır.

Bobinlerden soğutucu ortama transfer edilen güç bobinlerde meydana gelen bakır kayıplarıdır. Bu kayıpların ısı enerjisi şeklindeki transferi, iletken ile onun etrafını saran izolasyon ve soğutucu ortam arasında oluşan ısı iletim katsayısı ile bobinlerin soğutucu ile temas eden yüzey miktarına bağlıdır ve bunlarla doğru orantılıdır.

$$P_{cu} = h.A.\theta \quad (II.14)$$

Burada, h malzemenin ısı iletim katsayısı ($W/^{\circ}Cm^2$), A bobinlerin soğutucu ortamla temas ettiği yüzey (m^2) ve θ sıcaklık arışı ($^{\circ}C$) dir. [1]



Şekil II.14 Tabii Soğutmalı Yağlı Transformatör

II.4.5. Transformatörlerin Yalıtım Sistemleri

Aşırı yüksek gerilimlerin dışında transformatörlerin yalıtımı diğer elektrik makinelerinin yalıtımına benzemektedir. Bilindiği gibi bir manyetik aygıtın ömrü yalıtım sistemine, yalıtım malzemelerinin karışımına, işlemlere ve etkileşimlere bağlıdır. Bir yalıtım sisteminin karakteristikleri elektrot geometrisi, kompozit dielektrikler, sıcaklık gradyanları ve farklı malzemeler arasındaki uyum ile etkilenir; bu durum ayrı malzemelerin özelliklerinden sistemin karakteristiklerinin tahmin edilmesini belirsiz hale getirir. Yalıtım malzemelerinin seçimi bir sistem perspektifi ve deneysel doğrulama gerektirir..

Manyetik aygıtların yalıtım sistemleri belirsizliklerle kuşatılmıştır. Geçici gerilim stresleri tam olarak tanımlanmamıştır. Elektrot geometrisi değişkendir. Kompozit dielektriklerin doğası belirsizdir. Yalıtım sisteminin çalışma sistemi belirsizdir. Yalıtım sisteminin tasarımcısı gereksinimler üzerinde çok sayıda belirsiz veriden gerçek çalışma şartlarına zar zor benzerlik gösteren veriyi kullanarak malzemeleri seçer. Sonuç olarak yalıtım sisteminin tasarımı güvenilirliğin garantiye alınması için cömert güvenlik faktörlerini içermektedir. [10]

II.4.5.1. Isıl Etmenler

Yalıtım ve nüvenin çalışma sıcaklıklarındaki sınırlamalar manyetik bileşenlerin boyutunu belirler. Çalışma sıcaklığı, çevre sıcaklığı ve aygıtın sıcaklık artışının toplamıdır. Aygıtın sıcaklık artışının çevre sıcaklığı üzerindeki bağımlılığı çoğu kez ihmal edilir. Aygıtın sıcaklık artışı ve çevre sıcaklığının kabul edilebilir doğru tahminleri tasarım aşamasında gereklidir. Isı iletim problemleriyle bu değerler hassas olarak belirlenemez. Aşağıdaki gibi transformatörleri ilgilendiren üç çalışma modu bulunmaktadır. Bunlar;

- En ağır sürekli yük ve en yüksek çevre sıcaklığı altında çalışma sıcaklığının son sıcaklık olduğu kararlı durum.
- Aygıtın izin verilen yalıtım sıcaklığını aşması için gerekenden daha az bir aralıkta ağır bir yükün uygulandığı kısa zaman yüklemesi.
- Etkin olarak ısı iletiminin oluşmadığı kısa bir aralıkta çok ağır bir yükün uygulandığı adyabatik yükleme.

Bu üç moddan kararlı durum ısı analizi aşağıdaki kısmın içeriğini oluşturmaktadır. [10, 11]

II.4.5.1.1.Kararlı Durum Isı Analizi

Isı manyetik aygıtlardan iletim, taşınım ve ışıma ile iletilir. Transformatörleri ilgilendirdiği ısı ile ilgili bazı eşitlikler uygunluk olması bakımından aşağıda verilmiştir.

İletim ile ısı iletimi Fourier kuralı ile aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$q = k_0 A \frac{d\tau}{dx} = \frac{k_0 A}{\Delta x} (\tau_1 - \tau_2) \quad (\text{II.15})$$

Burada q ısıнын zaman değişim oranı, A ısıнын iletim yoluyla iletildiği kesit alan, τ sıcaklık, x iletim yolunun uzunluğu ve k_0 malzemenin ısıl iletkenliğidir. $d\tau / dx$ kesit alanına normal gradyandır.

İşınım ile ısı iletimi aşağıdaki gibi Stefan - Boltzmann kuralı ile tanımlanır

$$q = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (\text{II.16})$$

Burada ε işınım yapan yüzeyin yayıcılığı, σ Stefan - Boltzmann sabiti, A işınım yapan yüzeyin alanı ve T mutlak sıcaklıktır. [13]

Soğuk bir cisim ile çevrelenen sıcak bir cisim arasındaki işınım aşağıdaki gibi bir ısı iletimi veya değişimi içindedir:

$$q = \varepsilon \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.17})$$

Burada T_1 sıcak cismin mutlak sıcaklığı ve T_2 çevreleyen soğuk cismin mutlak sıcaklığıdır.

Taşınım ile ısı iletimi karmaşık bir işlem olup bazen aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$q = h_c A (\tau_1 - \tau_2) \quad (\text{II.18})$$

Burada q taşınım ile ısı iletim oranı, h_c taşınım katsayısı, τ_1 ısıнын taşınımın iletildiği cismin yüzey sıcaklığı, τ_2 ortamın akışkan sıcaklığı ve A ısıнын taşınım iletildiği cismin yüzey alanıdır.

Işınım ile ısı iletiminin sadeleştirilmiş eşitliği bazen aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$q = h_R A (\tau_1 - \tau_2) \quad (II.19)$$

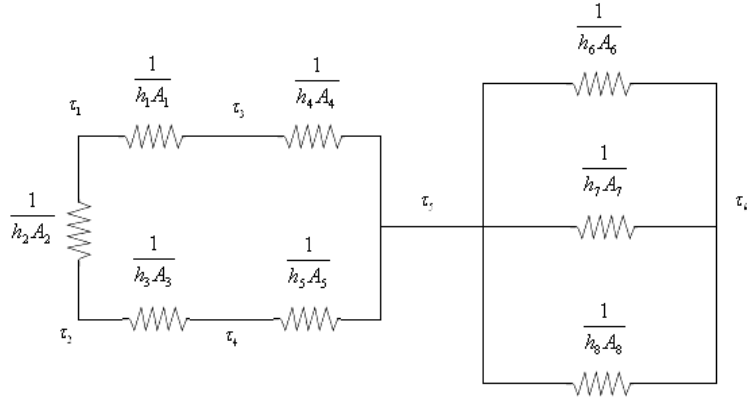
Burada h_R ışınımın eşdeğer ısı taşınım katsayısıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h_R = \frac{G(T_1^4 - T_2^4)}{(\tau_1 - \tau_2)} \quad (II.20)$$

Burada G cismin yayıcılığı, ışınım yapan ve emicilikte bulunan sistemin geometrisi ve sıcaklık ile belirlenen orantı sabitidir. (II.15), (II.18) ve (II.19) eşitlikleri bir elektrik eşdeğer devresine dönüştürülebilir. Bu eşdeğer devrede sıcaklık farkı bir potansiyel fark, ısıнын zaman değişim oranı akım ve alan ve ısıl iletkenlik katsayılarının çarpımlarının tersi direnç ile temsil edilir. Bir transformatörde ısı akışının elektriksel benzerliği veya eşdeğer Şekil II.15'de görülmektedir. Böyle benzerlikler ısı iletim sisteminin nitel olarak anlaşılmasında kullanışlıdır. Kullanışlı nicel bilginin elde edilmesi için sıcaklığın fonksiyonu olan katsayılar çoğu kez deneysel veriden alınarak değerlendirilir.

İçinde ısıнын düzgün olarak üretildiği iki paralel yüzey arasındaki bir cisim örnek alalım.

Bu iki yüzey sonsuza kadar uzanmakta ve aynı çevre sıcaklığına maruz kalmaktadır. İki yüzey arasındaki orta noktada oluşacak maksimum sıcaklık artışı aşağıdaki eşitlik ile verilir. [11, 12]

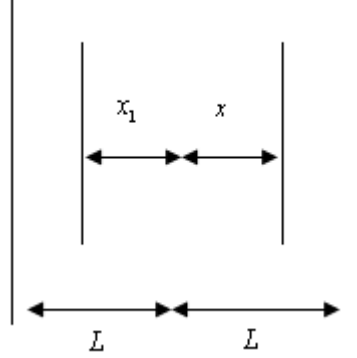


τ_1	Ortalama nüve sıcaklığı	τ_4	Ortalama açık sargı yüzey sıcaklığı
τ_2	Ortalama sargı sıcaklığı	τ_5	Muhafazanın ortalama yüzey sıcaklığı
τ_3	Ortalama nüve yüzey sıcaklığı	τ_6	Çevre sıcaklığı
$\frac{1}{h_1 A_1}$	Nüvenin içinden nüvenin yüzeyine	$\frac{1}{h_5 A_5}$	Sargının yüzeyi ve muhafaza
direnç		yüzeyi arasındaki ısıl direnç	
$\frac{1}{h_2 A_2}$	Sargı ve nüve arasındaki ısıl	$\frac{1}{h_6 A_6}$	Muhafaza yüzeyi ve çevre
direnç		arasındaki iletimi temsil eden ısıl direnç	
$\frac{1}{h_3 A_3}$	Sargının içinden sargının yüzeyine	$\frac{1}{h_7 A_7}$	Muhafaza yüzeyi ve çevre
ısıl direnç		arasındaki taşınımı temsil eden ısıl direnç	
$\frac{1}{h_4 A_4}$	Nüvenin yüzeyi ve muhafaza	$\frac{1}{h_8 A_8}$	Muhafaza yüzeyi ve çevre
yüzeyi		arasındaki ışıınımı temsil eden ısıl direnç	
arasındaki ısıl direnç			

Şekil II.15 Bir Transformatördeki Isı İletiminin Elektriksel Eşdeğeri

$$\theta_m = \frac{q_v}{2h_o} L^2 \quad (II.21)$$

Burada θ_m maksimum sıcaklık artışı, q_v birim hacim başına ısı üretiminin zaman oranı, h_o ısı iletkenlik katsayısı ve L Şekil II.9’da belirtilen uzunluktur. [10]



Şekil II.16 Arasında Isının Düzgün Olarak Üretildiği Paralel Yüzeyleri İle Isıl Olarak İletken Cismin Kesiti

Herhangi bir x noktasındaki sıcaklık artışı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\theta = \theta_M (1 - x^2 / l^2) \quad (II.22)$$

Cisim yoluyla ortalama sıcaklık artışı aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$\theta_{ort} = \frac{2}{3} \theta_m \quad (II.23)$$

Eğer cismin bir yüzeyi diğer yüzeyinden daha ılıksa bu durumda ılık yüzey şimdi x_1 ’de olarak Şekil II.16’ da görülen durum oluşur. Maksimum sıcaklık artışının mevcut olduğu nokta hala (II.21) eşitliği ile ifade edilir. Fakat bu eşitlikteki L yüzeysel arasındaki orta nokta olmasını sürdürmez. L’nin değeri aşağıdaki gibi verilir:

$$R = \frac{L}{x + L} \quad (II.24)$$

R’nin değeri aşağıdaki gibi belirlenir:

$$R = \frac{h_0 \theta_1}{q_1 (L + x_1)^2} + \frac{1}{2} \quad (\text{II.25})$$

Burada θ_1 ılık ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkıdır. Ortalama sıcaklık artışı aşağıdaki gibi verilir.

$$\theta_{ort} = \theta_m (2/3 + P - P^2) \quad (\text{II.26})$$

Burada P:

$$P = \frac{x_1}{L} \quad (\text{II.27})$$

(II.21) ve (II.27) arasındaki eşitlikler sargı ve nüveler arasındaki sıcaklık dağılımının yakınlştırılması için kullanışlıdır. (II.21) ve (II.22) eşitlikleri manyetik nüveye uygulanabilir. Isı nüvede yaklaşık olarak düzgün bir biçimde üretilir. Elektrik çelikleri yaklaşık olarak $(20-46) \text{ W/(m}^0\text{C)}$ ısı iletkenlik katsayısına sahiptir. Nüve kaybı tipik olarak $17086,5 \text{ W/m}^3$ tür. Açık yüzeyleri arasındaki boyutu 25,4 cm olan bir nüveyi dikkate alalım. Bu değerler (II.21) eşitliğinde kullanılarak aşağıdaki değer elde edilir:

$$\theta_m = \frac{170986,5}{2 \times 46} 0,127^2 \equiv 3^\circ \text{C}$$

Bu örnekte nüvenin maksimum iç sıcaklığı yüzey sıcaklığından sadece biraz daha büyüdür ve eğer nüvenin tamamı aynı sıcaklıkta alınırsa az bir hata ile sonuçlanır.

(II.23) ve (II.26) eşitlikleri maksimum ve ortalama iletken sıcaklıkları arasındaki ilişkinin tahmin edilmesinde kullanışlıdır; ortalama iletken sıcaklığı çoğu kez sıcaklık yükseltme ölçümünün direnç artış metodundan elde edilir. Bir nüveye yerleştirilmiş sargının açık yüzeyi Şekil II.16'da görüldüğü gibi yakınlştırılmıştır. x_1 'deki yüzey sargı ve nüve arasındaki temas yüzeyine karşılık gelmektedir; burada nüve yüksek ısı iletkenliğinden dolayı sargıdan daha soğuk olacak fakat çevreye yayılan nüve kayıplarından dolayı nüve ve sargı etrafındaki ortamdan daha ılık olacaktır.

Isıl iletkenlerin farklı değerleri ile laminasyonlu yapıdaki bir sargı aşağıdaki gibi laminasyon yapısı için normal ısı iletkenliğın ortalama bir katsayısına sahip olacaktır.

Isıl iletkenliklerin farklı değerleri ile laminasyonlu yapıdaki bir sargı aşağıdaki gibi laminasyon yapısı için normal ısı iletkenliğın ortalama bir katsayısına sahip olacaktır. [10]

$$h_{ort} = \frac{X_T}{\sum_n x_n l h_n} \quad (II.28)$$

Eğer sargı metalik iletken ve yalıtkanın alternatif katmanlarından oluşuyorsa bu malzemelerin tamamen farklı değerleri (II.128) eşitliğinin yaklaşık olarak aşağıdaki eşitliğe indirgenmesine neden olur.

$$h_{ort} = \frac{X_T}{X_1} h_1 \quad (II.29)$$

Burada X_T toplam sargı yığını, X_1 toplam yalıtkan yığını ve h_1 yalıtkanın ısı iletkenlik katsayısıdır.

Her iletken katmanı düzgün bir sıcaklıkta yakınlaştırılır. Sıcaklık gradyanları çoğunlukla katmandan katmana mevcut olur. (II.28) ve (II.29) eşitlikleri ile belirlenen ısı iletkenlik katsayısının ortalama değeri maksimum iletken sıcaklığının tahmin edilmesi için (II.21) eşitliğinde kullanılabilir.

Kutulanmış nüve ve sargılarda dolgu malzemesinin uçlarındaki sıcaklık düşümünün belirlenmesi için (II.15) eşitliğindeki Fourier ısı iletim kuralı uygulanır.

Dolgu malzemesinin ortalama alanı , ortalama kalınlığı ve ısı iletkenliğinin bilinmesi gerekir .

Ortalama alan aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$A_{ort} = \frac{1}{2} (A_C + A_{Fe} + A_{Cu}) \quad (II.30)$$

Burada A_C , A_{Fe} ve A_{Cu} kutunun, manyetik nüvenin ve açık sargı yüzeyinin yüzey alanlarıdır. Dolgu malzemesinin ortalama kalınlığı yüzey alanları nüve ve sargı ve kutunun yüzey alanlarına eşit eş merkezli iki küre arasındaki uzaklığın belirlenmesiyle tahmin edilir.

$$X = \sqrt{\frac{A_C}{4\pi}} - \sqrt{\frac{A_{Fe} + A_{Cu}}{4\pi}} \quad (II.31)$$

Tablo II.4’de yaygın olarak kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir. Nüve, sargı ve kutu arasındaki sıcaklık düşümünün belirlenmesi emdirmе malzemesi yağ olduğunda zordur. Armour Araştırma Kuruluşu aşağıdaki deneysel formülü önermiştir;

$$\theta = 3,3 \frac{X}{A_{ort}} (W_T)^{0,78} \quad (II.32)$$

(II.32) eşitliğinde θ nüve ve sargı yüzeyi ve muhafaza yüzeyi arasındaki sıcaklık düşümü, A_{ort} (II.30) eşitliğinden belirlenebilecek ortalama alan (m^2), x iki yüzey arasındaki ortalama uzaklık (m) ve W_T nüve ve sargının toplam ısı kaybıdır(W).

Tablo II.4Yaygın Yüzeylerin Isıl İletkenlik Katsayıları

Malzeme	h, w/m ° C	Malzeme	h, w/m ° C
Bakır	385	Vernikli kumaş	0,2
Alüminyum	205	Pamuk kumaş	0,07
Elektrik çelikleri	20-46	Pressbant	0,17
Pirinç	100	Hava, 20 ° C	0,025
Mika	0,36	A sınıfı yalıtkan	0,12
Mika şerit	0,15-0,6	B sınıfı yalıtkan	0,0015-0,2

Bir aygıtın açık yüzeyinden ortama ışıınım ve doğal konveksiyon ile ısı iletimi Armour Araştırma Kuruluşu tarafından önerilen aşağıdaki deneysel formül ile tanımlanabilir;

$$W_A = 5,7 \times 10^{-8} \delta (T_1^4 - T_2^4) + 2,167 (T_1 - T_2)^{1,25} \quad W/m^2 \quad (II.33)$$

Burada W_A ısı iletim ortamı ($W m^2$). T_1 ışıınım yapan yüzeyin mutlak sıcaklığı (K), T_2 ortamın mutlak sıcaklığı (K) ve δ ışıınım yüzeyinin yayıcılığıdır. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin yüzey yayıcılıkları Tablo II.5’ görülmektedir.

Tablo II.5 Yaygın Yüzeylerin Kızılötesi Işıınım Yayıcılık Özellikleri

Yüzey	Yayıcılık katsayısı , δ	Yüzey	Yayıcılık katsayısı , δ
Parlatılmış alüminyum	0,04	Levha çelik	0,55
Parlatılmış pirinç	0,03	Kalaylı levha çelk	0,04-0,06
Parlatılmış bakır	0,02	Boya, bütün renk	0,09-0,96

Bazı elektronik aygıtlar tamamen kapalıdır. Isı çoğu kez ısı veren bileşenlerin üzerine doğrudan monte edildiği kanatlı alüminyum soğutucular veya ısı yataklarıyla uzaklaştırılır.

Yatağın sıcaklığı kanatları yalayarak geçen cebri veya doğal bir hava akışı ile belirlenen bir maksimum veya daha aşağı sıcaklıkta tutulur. Böyle bir düzenleme ile nüve ve sargının ürettiği ısıнын çoğu yataklara iletilir.

Sargının ısısı nüve yoluyla yatağa iletilmelidir. Nüve ve yatak arasındaki ısıl direnç kısmi olarak yüzeyin düzgünlüğü ile belirlenir. Isıl birleşme kompudunun kullanılmasıyla bu ısıl direnç azalır. [10, 13]

II.4.5.1.2. Isı Artışı Hesaplamaları

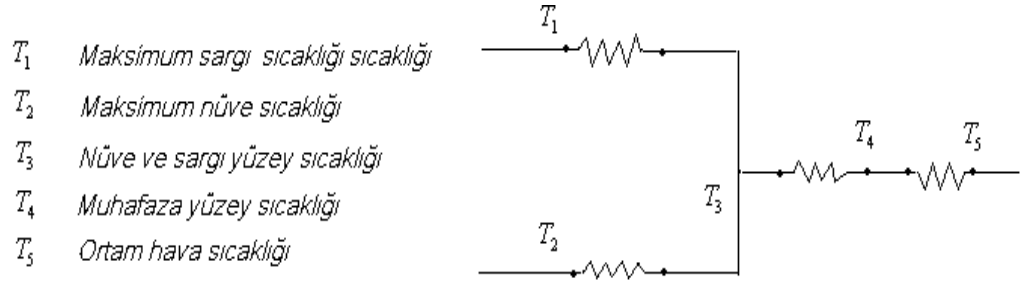
Manyetik bileşenlerin sıcaklık yükselmesinin en basit ve en kesin yolu ısıl özellikleri bilinen benzer mevcut tasarımlarla karşılaştırılarak yapılır. Nüvelerin imalatı oldukça sıradan hale getirildiğinden yeni tasarıma oldukça benzeyen mevcut bir tasarımın bulunması pratik açıdan kolaydır. Karşılaştırmanın geçerli olması için iki tasarım doğru bir şekilde birbirine benzer olmalı ve sıcaklık artışı, nüve kaybı ve mevcut tasarımın bakır kaybı belirli bir doğrulukla bilinmelidir. Benzer mevcut tasarımın yokluğunda diğer metotlara başvurulması gereklidir.

Sıcaklık artışının hesaplanması için pratik metotlar deneysel veri ve basitleştirilmiş teorinin kombinasyonlarıdır. Sonuçların test ile doğrulanması tavsiye edilir. Aşağıda verilen metot çoğunlukla bundan önceki kısımda verilen bilgiye dayanmaktadır.

Bu metotta maksimum iletken sıcaklığının belirlenmesine teşebbüs edilir; bu değer ortalama sıcaklığa göre yalıtkanın ömrünün daha olması bir belirleyici olup dirençteki değişim metodu ile iletkenin sıcaklığının ölçümlerinden elde edilen sonuçtur. Sıcaklık artışının belirlenmesinin bir vasıtası olarak yaygın olarak kabul edilen bu uygun test ortak referans olarak ortalama sıcaklığın kullanımına öncülük etmelidir. (II.9) eşitliğinde ortalama ve maksimum sıcaklık yükselmesi arasındaki farkın tahmin edilmesinin bir yolu verilmektedir.

Şekil II.15'deki basitleştirilmiş ısı iletim eşdeğer devresi Şekil II.17'deki devrenin basitleştirilmiş halidir. Burada nüve ve sargı arasındaki ısı iletim yolu kaldırılmış ve sargı ve nüvenin yüzey sıcaklıklarının aynı olduğu kabul edilmiştir. Bu sadeleştirme ve basitleştirme nüve ve sargılar arasındaki önemli miktardaki

yalıtkandan kaynaklanmaktadır. Muhafaza duvarı ve ortam arasındaki üç yol bir yol olarak birleştirilmiştir. Bunun yapılmasının nedeni yaklaşık katsayıların iletim, konveksiyon ve ışıınım'ın birleşik etkileri için mevcut olmasıdır. Bunların ayrılması zordur ve ek hatalar meydana gelir.



Şekil II.17 Bir Transformatördeki Isı İletiminin Basitleştirilmiş Elektriksel Eşdeğeri

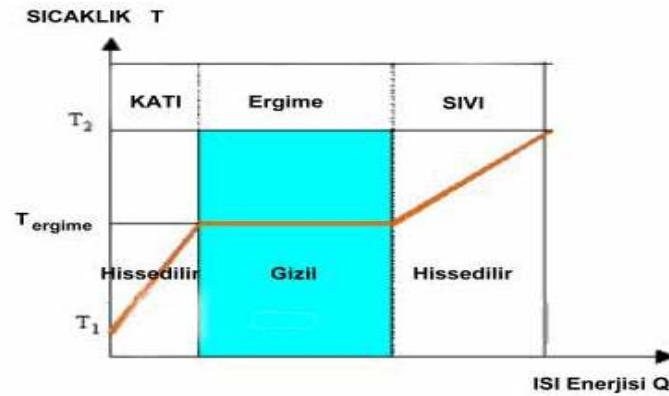
(II.21) ve (II.29) eşitlikleri sargının ve sargı yüzeyinin maksimum sıcaklığı arasındaki farkın hesaplanmasında kullanılır.

Aynı sıcaklıkta olduğu varsayılan nüve ve sargının birleşik açık alanları dolgu malzemesine veya çevreye hem demir hem de bakır kayıpları yayar. Eğer dolgu malzemesi katı ise ısı iletimi sadece iletim ile gerçekleşir ve (II.15) eşitliği uygulanabilir. (II.30) ve (II.31) eşitlikleri yüzeyler arasındaki ortalama alanın ve ortalama uzaklığın yakınlştırılmasında kullanılır. Eğer dolgu malzemesi sıvı ise nüve ve sargı takımının yüzeyi ve muhafazanın yüzeyi arasındaki iletim yolu farklı iki alanlı (fakat aynı iletkenlik katsayısı ile) seri iki direnç yolu olarak dikkate alınabilir. Bir sıvı dolgu malzemesinde doğal konveksiyonlu sıcaklık gradyanı çoğunlukla üstten aşağı doğrudur. Doğal konveksiyon altında ısı iletiminin en etkin alanları dikey alanlardır, ısı iletiminin çoğu yatay yöndedir. Hesaplama amaçları için yağın sıcaklığı ve katsayının tanımı ortalama yağ sıcaklığına dayandırılabilir. Basitleştirilmiş metotta sadece muhafazanın dikey alanı dikkate alınır ve iletkenlik katsayıları ısı iletiminin bütün tiplerini içerir. [10]

BÖLÜM III.

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM) VE UYGULAMALARI

PCM "Phase Change Material" teriminin kısaltılmışıdır. Bu kavram “Durum Değişimindeki Madde” olarak Türkçe’ye çevrilebilir. Maddenin durumunu değiştirmesi, örneğin katı durumdan sıvı duruma, ya da sıvıdan gaz haline geçer. Madde belirli miktarda bir ısıyı alarak faz değiştirir. Maddenin faz değiştirmesine neden olan ısıya gizli ısı denir. Bu süreç tersine çevrilirse, yani gaz durumundan sıvıya, ya da sıvı durumdan katı durumuna geçildiğinde, daha önce emilmiş olan enerji gene sıcaklıkta kayda değer bir değişiklik olmadan serbest kalıp açığa çıkmaktadır. Maddenin durumunda değişikli yapacak sıcaklık derecesinin dışındaki sıcaklıklarda madde ısıyı alışlagelmiş biçimde depolamakta ya da vermektedir. Bu durum aşağıdaki grafikte ifade edilebilir.



Şekil III.1 Maddenin Hal Değişirme Evreleri

Bu tür maddelerin düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesi için gerekli temel koşulların arasında, durum değiştirmedeki sabitlik ve bir dizi materyal sabitlerinin yanı sıra, maddenin hacminde de nispeten az bir değişim gelmektedir. Bu nedenle pratikte latent ısı depolama amacıyla sadece ergime/kristalleşme ısısı (katı-sıvı durum değişmesi) uygulama bulmaktadır. Alışılagelmiş, duyumsanabilen ısıнын depolama sürecinde elde edilebilecek enerji yoğunluğu, maddenin yoğunluğu ile özgül ısı kapasitesinin çarpımına ($r \cdot c_p$) ve de ısı yükleme ile ısı boşaltma arasındaki sıcaklık farkına orantılıdır.

Örneğin su için, 50 Kelvinlik ($-223,15 \text{ } ^\circ\text{C}$) bir ısı yükleme farkında, hacime özgül depolanabilir enerji miktarı 58 kWh/m^3 olacaktır. Eğer bu ısı yükleme aralığında ayrıca bir de maddenin durum değiştirmesi söz konusu olursa, latent ısı miktarı da buna eklenecektir. Alışılagelmiş ısıtma sistemleri uzun bir süredir duyumsanabilen ısı depolama temelinde çalışmaktadır. Son yıllarda bu sistemlerin yalıtımında ve diğer sistem parçalarında önemli iyileştirmeler elde edildi, ama temel prensip aynı kaldı; yani depolama yoğunlukları oldukça sınırlıdır ve sistem ısıyı dolaşım sırasında görece hızla kaybetmektedir. [14]

III.1. ISI DEPOLAMADA KULLANILAN FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER

Isı depolama tekniğinde kullanılan belli başlı bazı PCM malzemeler ve temel özellikleri Ekler kısmında özellikleri ile beraber verilmiştir. [15]

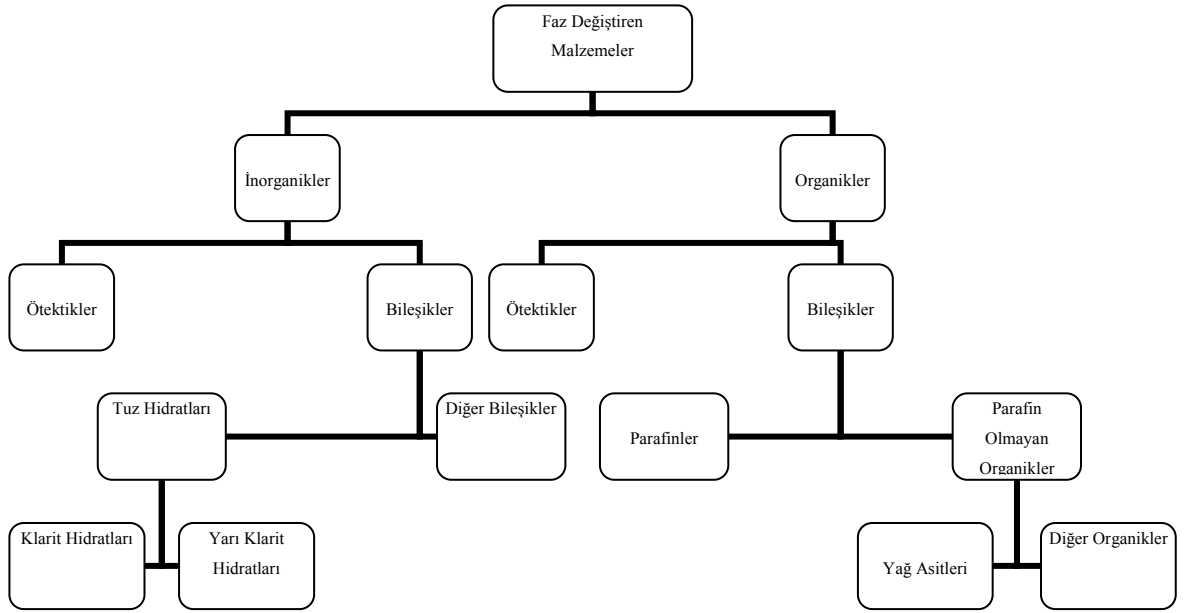
III.2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (PCM)

Uygun bir sıcaklık aralığında faz değişimine uğrayan maddeler ısı enerjisini depolamak için kullanılabilirler. Faz değişimi; katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz şeklinde olabilir. Bu işlemdeki temel prensip; sabit sıcaklık ve basınç şartlarında maddeye ısı verilmesi veya maddeden ısı çekilmesi şeklinde olmaktadır. Faz değişimi sırasında maddeye verilen veya maddeden alınan ısı enerjisine “ Gizli ısı veya faz değişim ısı” adı verilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümlerinin gizli ısıları yüksek olmasına rağmen, hacimde meydana gelen büyük değişimler sistemleri karmaşık yaparak pratikte kullanılabilirlikten uzaklaştırmaktadır. Katı-sıvı dönüşümünün gizli ısı, katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümünün gizli ısıyla karşılaştırıldığında küçük olmasına rağmen, hacimdeki küçük değişimler, sistemi pratikte kullanılabilirlik açısından avantajlı duruma getirmektedir.

Katı-sıvı faz dönüşümüyle ısı depolama uygulamaları için birçok organik ve inorganik türde uygun PCM’ler mevcuttur. Bu konudaki araştırmaların bir çoğu tuz hidratları üzerinde yoğunlaşmıştır. 0-100 °C sıcaklık aralığında eriyen yüksek füzyon ısına sahip çok sayıda organik ve inorganik kimyasal madde bilinmektedir. Güneş enerjisi ile bina ısıtma ve sıcak su temini için optimum sıcaklık aralığı 40-60 °C iken, ısı pompalarında bu değer 20-30 °C’dir. 0-100 °C sıcaklık aralığında faz değiştiren maddeler aşağıda görüldüğü gibi organik ve inorganik olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar. [16 – 17]

III.2.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

Tek başına hiçbir materyal istenen özellikleri karşılayamamaktadır. Bu yüzden PCM belirlenirken arzulanan sıcaklık aralıklarında faz değişimi göstermesine bakılır. 0 – 120 °C aralığında sıcaklık değişimi gösteren maddeler PCM olarak kullanılmaya adaydırlar. Bunlar organik ve inorganik bileşikler ve onların karışımları şeklinde gruplandırılırlar. Bunlarda kendi içlerinde alt gruplara ayrılırlar.



Şekil III.2 Faz Değiştiren Isı Depolama Maddelerinin Sınıflandırılması

İnorganik tuzların erime ısıları yüksektir. Organiklerin erime ısıları ise (ısı depolama kapasitesi) inorganik tuzlarınkinin yarısı kadardır.

Organik bileşikler ile depolamada gerekli depolama hacminin fazla olması gibi bir dezavantaj olsa da, uygun olarak erime (kongruent), kendi kendine kristalleşebilme, aşırı soğuktan donabilme ve geleneksel tasarım modelleri ile uygun olarak kullanabilme gibi üstünlükleri bulunmaktadır.

İnorganik PCM'ler grubunda bulunan tuz hidratları ısı depolama için önemli olduklarından çalışmalar bu alanda yoğunlaşmıştır. Çeşitli PCM'ler üç temel grup

içinde incelenebilir. Bunlar; tuz hidratları, parafinler ve parafin olmayan organiklerdir. [16, 17, 18]

III.2.1.1.Tuz Hidratlar

Faz değıştirme sıcaklık aralığı 0-150 °C olan inorganik maddelerin en önemli grubunu tuz hidratlar oluşturmaktadır. Genellikle suda çözünen tuz hidratlar kullanılır. Enerjinin gizli ısı şeklinde depolanmasında en sık kullanılan tuz hidratların bazı termofiziksel özellikleri ve maliyetleri Tablo III.1’ de verilmiştir.

Tablo III.1. Enerji Depolamada En Çok Kullanılan Tuz Hidratlar

Tuz hidratlar	Erime noktası	Yoğunluk (kg/m ³)	Füzyon ısısı (kJ/kg)	Maliyeti (\$/kg)
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	31,6 °C	1460,0	252,16	0,26
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	32-36 °C	1440,0	248,48	0,29
CaCl ₂ .6H ₂ O	27-32 °C	1710,0	187,49	0,17
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	36,0 °C	1520,0	274,22	0,61

Tuz hidratların çoğunda karşılaşılan en önemli problem erime-katılaşma esnasındaki faz ayrımıdır. Erime esnasında açığa çıkan kristalizasyon suyu ortamdaki katı fazı çözmek için yeterli değildir (erime sıcaklığında bu çözelti aşırı doymun haldedir). Katı faz sıvı faza göre daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan bulunduğu kabın alt kısmına çöker. Tersinir işlem esnasında (örneğin, kristalizasyon veya katılaşma) çöken tuzun önemli bir kısmı ile kristalleşmesi gereken suyun bir faz yardımıyla birbirinden ayrılmasıdır. Su–kristal faz ayrımı problemini gidermek için aşağıdaki işlemlerden birine başvurulabilir;

a) Susuz tuzun çökmesini önlemek veya süspansiyonda daha az hidrat tutmak için koyulaştırıcı bir madde kullanmak.

b) Karıştırma, titreştirme gibi mekanik yöntemler kullanmak.

c) Fazla su ilave ederek bu aşırı doymun hali (katı maddenin dibe çökmesi) gidermek.

d) Faz ayrımını azaltmak için PCM’i kapsül içerisine koymak. Bu esnada tuz hidratlar metalik kapları korozyona uğratabileceğinden, kapsülleme için plastik

kapların kullanılması korozyon oluşturmama bakımından avantajlıdır. Ancak, bu durumda da ısı iletim probleminin ortaya çıkacağı da unutulmamalıdır.

Tuz hidratların bir çoğunda karşılaşılan ikinci problem ise, katılaşma esnasında tuz hidratın aşırı soğumasıdır. Yani, kristal oluşum (çekirdekleşme) hızı çok düşük olduğu için, katılaşma işlemi erime sıcaklığında gerçekleşmez. Aşırı soğumadan dolayı, PCM depoladığı enerjiyi beklendiği gibi erime noktasında değil, ancak birkaç derece düşük sıcaklıkta geri verebilir.

Tuz hidratlarda karşılaşılan aşırı soğuma problemi aşağıda verilen yöntemlerin biri ile önemli derecede azaltılabilir.

a) Maddenin kristal yapısına benzeyen küçük bir kristal parçanın ilavesiyle faz değiştiren madde kristallerinin büyümesi sağlanabilir.

b) Heterojen çekirdekleşmeyi iletirmek için pürüzlü ısı değiştirici yüzeyi ve pürüzlü kapsül duvarları gibi mekanik vasıtalar kullanmak.

III.2.1.2.Parafinler

Metandan, pentana kadar alkanlar, oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gazdırlar. C_5H_{12} ile $C_{15}H_{32}$ arasındaki bileşikler sıvıdır ve onbeşden fazla karbon içeren bileşikler ise oda sıcaklığında mumsu katılıktadırlar. Bu maddelerin erime noktaları ve füzyon ısıları molekül ağırlığı ile birlikte artar. Böylece, karbon sayısı 14-40 ve erime noktası 6-80°C arasında olan parafin hidrokarbonların ısı depolama için PCM olarak kullanmak mümkündür. Ucuz olmaları, bol bulunmaları ve daha kararlı olmaları parafinler için başlıca tercih sebebidir. Ayrıca, PCM olarak kullanılan parafinlerin bazı avantajlı özellikleri aşağıda verilmiştir;

- a) Bol ve ucuz olarak bulunabilirler,
- b) Koroziv ve oksitleyici değildirler,
- c) Geniş bir erime aralığına sahiptirler,
- d) Yüksek füzyon gizli ısılarına sahip olabilirler,
- e) Faz geçişleri hızlıdır,
- f) Kimyasal olarak kararlıdırlar ve yoğunlukları düşüktür,
- g) Önemsiz miktarda aşırı soğuma gösterirler,
- h) Kendi kendilerine çekirdekleşebilirler,
- i) Erime noktasındaki hacim değişimleri düşüktür.

Parafinler, tuz hidratlarla karşılaştırıldıklarında hacimsel enerji depolama yoğunlukları daha düşüktür. Bu maddeler erime esnasında faz ayrılma problemi

göstermezler ve çekirdekletiriciye gerek duymayacak kadar kendi kendine çekirdekleşme özelliği gösterirler. Fakat bu maddelerin termal iletkenlikleri zayıftır ve ısı değıştirici tasarımında özel bir itina gerektirirler. Ayrıca, ekonomik olmaları nedeniyle depolamada daha çok teknik saflıkta parafinler kullanılır.

Teknik saflıktaki parafinler bir çok hidrokarbonun karışımı olduğı için sabit bir erime noktasından daha çok bir erime aralığına sahiptirler. Ticari parafin waxlar ısı depolama uygulamaları için en çok incelenen maddelerin başında gelir Ticari saflıktaki parafinlerin termal davranışı DSC analizi ile detaylıca incelenmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçların bazıları Tablo III.2’de verilmiştir. [16, 19]

Tablo III.2 Teknik Saflıktaki Bazı Parafin Waksların Termofiziksel Özellikleri

Teknik saf. parafin wax	Başlangıç sıcaklığı	İlk pik sıcaklığı (°C)		Entalpi (J/g)		Katı-sıvı faz dönüşüm entalpisi	
		Erime	Katılaşma	Sıcaklık aralığı (°C)	Entalpi (J/g)	Sıcaklık aralığı (°C)	Entalpi (J/g)
PG	43,95 °C	51,25	49,95	15,85- 43,95	55,7	43,95- 52,10	135,3
PSS	44,25 °C	51,4	50,4	15,85- 44,25	61,7	44,25- 52,08	132,1
PSSH	43,85 °C	51,5	50,15	15,85- 13,85	60	43,85- 52,05	136,9

III.2.1.3. Parafin Olmayan Organik Maddeler

Parafin olmayan organik maddeler yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller gibi geniş aralığı içerir. Literatürde erime aralığı 7-187 °C ve erime entalpisi; 42-250 kJ/kg olan yaklaşık yetmiş tane parafin olmayan maddenin ısı depolama amaçlı kullanılabileceğı belirtilmiştir. Bu organik maddeler; yağ asitleri, yağ asiti karışımları ve diğer parafin olmayan organik maddeler olarak alt gruba ayrılırlar. Yağ asitlerinin genel formülü $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ olup füzyon ısı değeri parafinlerle karşılaştırılacak kadar yüksektir. Yağ asitleri bir çok parafin ve tuz hidrata göre daha uygun erime noktasına sahip olduğundan dolayı daha çok bina

ısıtma uygulamaları için tercih edilirler. Yağ asitleri mükemmel bir erime-katılma özelliğine sahiptirler yani aşırı soğuma davranışı göstermezler.

DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) ölçüm tekniği kullanılarak yağ asitleri üzerine bir çok araştırmalar yapılmıştır. Deneysel olarak test edilen yağ asitlerinden bazıları Tablo III.3’de verilmiştir. [17]

Tablo III.3 Bazı Yağ Asitleri Ve Termofiziksel Özellikleri

Yağ Asiti	Erime aralığı (°C)	Füzyon ısısı (kJ/kg)	Spesifik ısısı (C _p) (kJ/kg°C)	Spesifik ısısı (C _p) (kJ/kg°C)
<i>Kaprik asit</i>	-	-	-	-
Laurik asit	40-43	167-171	-	-
Miristik asit	50,4-53,6	189	-	-
Palmitik asit	57,8-61,8	201	2,2	1,7
Stearik asit	65,2-68,5	210	2,07	1,9

III.3. ISIL DEPOLAMA

Enerji ısıtma amaçlı olarak kullanılıyorsa depolamada ısı olarak yapılabilir. Böylece hiçbir dönüşüm yapılmayacağından basit malzemeler kullanılacak ve dönüşümden kaynaklanan enerji kayıpları oluşmayacaktır.

Isıl depolamada bazı temel özellikler istenmektedir. Bunlar:

- Kompakt olmalı, birim hacim ve kütle için ısı depolama kapasitesi yüksek olmalıdır.
- Depolama verimliliği yüksek olmalıdır.
- Sıcaklık dağılımı düzenli olmalıdır.
- Çalışma sıcaklık aralığı ısı depolama ortamı ile uyumlu olmalıdır.
- Sıcaklık farklılıkları olmaksızın büyük ısı alma ve verme hızlarında ısı depolama ve ısı kullanma kapasitelerinde olmalıdır.
- Çevrimsel işlem geçirebilme özelliklerinden olmalı, yapısı bozulmamalıdır.

- Çok fazla sayıda ısı depolama ve ısı depolama çevrimlerinde, ısı depolama kapasitesi ve verimliliğinde kayıp olmaksızın çalışabilmelidir.
- Çevreye olan ısı kayıpları ve çevrimin gerçekleşebilmesi için harcanan ısı ihmal edilebilecek kadar küçük olmalıdır.
- Uzun ömürlü olmalıdır.
- Kurulum ve işletme maliyetleri düşük olmalıdır.
- Korozyon olmamalı, kullanılan malzemeye uyumlu olmalıdır.
- Yangın ve zehirlenme tehlikeleri olmamalıdır. [20]

III.3.1. Gizli Isı Depolama

Değişik ısı depolama teknikleri arasında, gizli ısı depolama teknikleri yüksek enerji depolama kapasiteleri ve faz değiştirme sıcaklığındaki sabit bir sıcaklıkta ısıyı depolayabilme yönleriyle ilgi çekici sistemlerdir.

Bu yöntemde bazı kimyasal maddelerin faz değişimi sırasında enerji absorbe etme yetenekleri kullanılır. Kullanılan malzemelerin ısı depolama kapasiteleri genellikle yüksektir ve düşük sıcaklık aralıklarında büyük ısılar depolanabilir. Faz dönüşümü katı – katı, katı – sıvı, sıvı – buhar ve katı – buhar şeklinde olabilir.

Katı – katı faz dönüşümü, bir maddenin kristal yapısının değişmesi ile meydana gelir. Depolanan ısı ve hacimdeki değişim ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu yüzden uygulamada genellikle bu çeşit faz dönüşümü kullanılmaz.

Katı – buhar ve sıvı – buhar dönüşümlerinde depolanan ısı çok yüksektir. Ancak buhar halindeki maddeyi tutmak için gerekli hacim çok büyük ve basınç taşıyabilecek yetenekte olmalıdır. Buda sistemin pahalı ve karmaşık olmasına neden olur ve sistem uygulanabilirliğinden uzaklaşır.

Katı – sıvı değişiminin ısı depolama kapasitesi buhar dönüşümlerine göre daha düşüktür ancak hacimdeki değişim çok düşüktür, %10'u geçmez ve genellikle daha küçüktür. Ayrıca dönüşüm düşük bir sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bu gibi nedenler katı – sıvı faz dönüşümünün uygulanabilir olmasını ve gizli ısı depolamada bu yöntem kullanılır.

Gizli ısı depolamasının gücü, katı maddelerin eritilmesi için birim ağırlık başına gereken ısıнын fazla olmasından gelmektedir. PCM tamamen eritildikten sonra eklenen fazla ısı PCM'in sadece duyulur ısını artırır. Gizli ısı depolamanın diğer tekniklere göre bazı üstünlükleri vardır.

- Duyulur ısı depolamaya göre ısı depolama kapasitesi yüksektir ve ısı deposu hacmi daha küçüktür.
- PCM birim kütesinin ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- PCM'lerin faz değıştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur.
- Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için uygundur. [20, 21]

III.3.1.1.Gizli Isı Depolama Maddesinin Seçimi

Duyulur ısı maddelerinden farklı olarak; faz değıştiren maddeler belirli sıcaklık arlığında işlem görürler. Bu sebeple PCM'in erime sıcaklığı ile sistemin işlem sıcaklığı aynı olmalıdır. Tek bir PCM bütün uygulamalarda kullanılamaz. Kullanım amacına uygun PCM'in seçimi için bazı önemli kriterleri içeren bir seri araştırma yapılmalıdır.

Gizli ısı depolama maddesi olarak düşünölen çok sayıda kimyasal bileşik ve karışım olmasına rağmen, bunların birçoğı, ekonomik, güvenlik veya genel fiziksel, kimyasal ve ısısal özelliklerinden dolayı tercih edilmezler. Faz değışim maddelerinin seçimi hususunda birçok araştırma yapılmıştır ve PCM seçiminde esas alınacak kriterler aşğıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

PCM malzemelerin gizli ısı depolama amacıyla yararlanılmasında termodinamik, kinetik ve kimyasal yönlerden belirli özelliklerin bulunması gerekir. Ayrıca maliyet ve çok miktarda bulunabilirlik dikkate alınmalıdır.

Termodinamik ölçütler şöyle sıralanabilir:

- Ergime noktası gereksinim duyulan sıcaklık arlığında olmalıdır.
- Birim kütesinin ergime ısısı yüksek olmalıdır. Böylece yüksek bir enerji miktarı elde etmek için daha az depo maddesi kullanmak gerecektir.
- Küçük hacimdeki depolara yerleştirilebilmesi için yoğunluğu yüksek olmalıdır.
- Isıl iletkenliği yüksek olmalıdır. Böylece depo maddesine ısı doldurulması ve geri kazanılması için gerekli sıcaklık aralığı küçük olacaktır.

- Materyal tamamen ergiyerek düzgün eğrime göstermelidir. Aksi durumda sıvı ve katı fazlar arasında yoğunluk farkı oluşursa, faz ayrışması gerçekleşir ve materyalin kimyasal yapısı değişir.
- Faz değiştirme sonucunda hacim değişimi az olmalıdır. Böylece basit bir depo ve ısı dönüştürücüsü kullanılabilir.

Kinetik ölçütler şöyle sıralanabilir:

Donma sırasında çok az aşırı soğuma etkisi göstermeli yada hiç göstermemelidir. Eriyiğin kristallenmesi maddenin termodinamik donma noktasında olur. Bunun başarılı olabilmesi için çekirdekleşme hızı yüksek ve kristal oluşum hızı büyük olmalıdır.

Kimyasal ölçütler şöyle sıralanabilir:

- Kimyasal özellikleri değişmemelidir.
- Kullanım süresinin uzun olması için kimyasal bozulmaya uğramamalıdır.
- Depo malzemesi için Korozyon etkide olmamalıdır.
- Yanıcı, zehirli ve patlayıcı özelliklerde olmamalıdır. [22]

III.3.1.1.1. Faz Dönüşüm Sıcaklığı

Hemen hemen her sıcaklık bölgesinde ısı depolama uygulaması mevcuttur. Fakat belirli bir uygulama için PCM seçiminde faz dönüşüm sıcaklığı ile ısıtma veya soğutma sisteminin çalışma sıcaklığının karşılaştırılması esastır. [14]

III.3.1.1.2. Füzyon Isısı

Yüksek faz dönüşüm ısısı PCM’de aranan en önemli özelliklerden biridir. Dekahidrat (10 H₂O) ve dodekahidrat (12 H₂O) gibi yüksek hidratlaşma derecesine sahip tuzlar genellikle, büyük füzyon ısısına sahiptirler. Fakat, bu tuz bileşikler genellikle düzensiz ve yarı düzenli erime davranışı gösterirler. Örneğin, yarı düzenli eriyen tuz hidratlarda kristallenme esnasında faz ayrımı meydana gelmesinden dolayı ısı kapasitelerinde bir azalma gözlenir. Bu nedenle bu tip maddelere erime

esnasındaki konveksiyonlu ısı transferini önleyecek bazı maddeler ilave edilir. Düzenli eriyen bir PCM düşük füzyon ısısına sahip olsa bile diğerlerine nazaran tercih edilir. [14]

III.3.1.1.3. Faz Ayırımı

Gizli ısı depolamada depolama verimini etkileyen en büyük engel PCM'in istenmeyen faz denge özelliklerine sahip olmasıdır.

Bu sebeple, PCM'in faz diyagramının çok iyi anlaşılması ısı depolama araştırmaları ve uygulamaları için önemlidir. [14]

III.3.1.1.4. PCM'in Doldurulduğu Kap (veya kapsül)

PCM'ye depoluk görevi yapacak olan kaplar sadece erimiş ısı depolama ortamını tutmakla kalmaz aynı zamanda da katı ve likit halde PCM'i destekler bir yapı ve bir buhar engeli durumundadır. Bu kaplar, tuz hidratlarda nem kaybını ve nemlenmeyi önlemeli ve organik maddeler ise, buharlara karşı bir engel görevinde olmalıdır. Buhar basıncı arttıkça PCM'in doldurulacağı kabın üstleneceği görevde artmaktadır. Bu kaplar ayrıca, genleşme ve erime esnasında ortaya çıkan zıt kuvvetlere dirençli olması bakımından dayanıklı olmalıdırlar. Küçük hacim değişimine sahip PCM'lere depoluk edecek kapların ise, daha az özellikte olması yeterlidir. [16]

III.3.1.1.5. Yoğunluk

Verilen bir hacimde daha fazla bir ısının depolanması için yüksek yoğunluk önem arz eder. Bununla birlikte yoğunluk çoğu kez füzyon ısısının azalmasına bağlı olarak artar. Örneğin bir tuz hidrat iyonunun atom ağırlığı artarken yoğunluğu da artar, fakat birim kütle başına düşen füzyon ısısı azalır. Bununla birlikte, bir tuzun hidratlaşma derecesi artarken yoğunluk düşer, fakat yüksek su içeriğinden dolayı füzyon ısısı da artar.

III.3.1.1.6. Aşırı Soğuma ve Kristal Büyümesi

Aşırı soğuma olayı gizli ısı depolamada karşılaşılan problemlerden biridir (özellikle tuz hidratlarda). Etkili bir çekirdek oluşumuyla bu problem çözülebilir. Sistemin çalışma sıcaklığının 5-10 °C üzerinde eriyen bir PCM'in depolama

materyali olarak seçimi rasgele bir iştir. Bu seçim ısı kayıplarını minimize etmek ve iyi bir ısı transferini devam ettirmek için yeterli sıcaklık farkı sağlamak durumundadır. Birkaç dereceden daha çok bir aşırı soğuma hali, depodan uygun ısı çıkışı sağlanarak engellenebilir. Aşırı soğumanın gözlenmediği bir halde bile, tabii olarak gerçekleşen yavaş kristal büyüme hızı, ısı çekilme hızını istenmeyen düşük bir değere kadar azaltabilir. [14]

III.3.1.1.7. Kimyasal Kararlılık ve Uygunluk

PCM'in yarı kararlı veya tam kararlı erime ve katılaşma özelliğine bağlı olarak depolama kapasitesinde ve maddenin ısı performansında meydana gelecek bir azalma önemli bir problem teşkil eder. Ayrıca, oksidasyon, ısı ayrışma, hidroliz veya diğer reaksiyonlar başka özellikleri yönüyle kabul edilen bir PCM'in ısı depolama maddesi olarak kullanılmasını engelleyebilir. PCM, kendisine depoluk edecek kapla bir kimyasal reaksiyona girmemelidir. İstenilen özelliğe sahip kapların temini kolay olsa da diğer yandan bu depolara uygun depolama materyalinin maliyetinin yüksek olması bu konuya ayrı bir sınırlama getirmektedir.

III.3.1.1.8. Güvenlik

Güvenlik; PCM seçiminde önemli bir unsurdur. Materyaller toksik, korozif, yanıcı ve patlayıcı olma gibi benzeri hususlar yönüyle güvenli olmalıdır. Fakat şu nokta yine de unutulmamalıdır ki “ hemen hemen her kimyasal madde bir tehlike arz eder”. Dolayısıyla tüm PCM için uygun bir güvenlik seviyesi şarttır, fakat mutlak güvenlik bir aldaniştir.

Güvenlik konusunda diğer önemli bir nokta ise; PCM'in zahmetli bir faktör haline gelmemesidir. Bazı organik materyaller yavaş bir difüzyon işlemiyle hareketli bir yüzey içerisinde buharlaştırılabilirler ve bu esnada bazı istenmeyen kokular meydana gelebilir. Örneğin, depolama maddesi olarak seçilen naftalin çok sayıda faz dönüşümüne uğradığında istenmeyen bir koku yaymaya başlar. [14]

III.4. PCM İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

PCM kullanarak ısı depolama işlemi günümüzde bazı uygulamaları ticari başarı sağlamış bir konudur. Bu konu ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olup bütün bu çalışmaları pratik amaca yönelik değerlendirmek ve bu teknolojiyi geliştirmek amacıyla Uluslararası Enerji Ajansına bağlı olarak Annex 10 oluşturulmuştur. Bu çalışma grubunda Bulgaristan, Kanada, Finlandiya, Almanya, Japonya, Polonya, İsveç ve Türkiye katılımcı, Avustralya, Çin, Hollanda, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri üye olarak yer almışlardır. Annex 10'un bir toplantısı Türkiye'de Çukurova Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. [17]

Bu toplantıya PCM ile ilgili çalışmalar yürüten araştırmacılar ve PCM uygulamalarını ticari hale getirmiş firma temsilcileri katılmıştır. Önceki çalışmalar bölümü anlatılırken Annex 10'un sağladığı verilerden yararlanılmıştır.

Manz ve ark. (1997) güneş enerjisini pasif olarak depomla üzerine bir araştırma yapmış ve bu çalışmada güneş ışıınının maddelerin ergimesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada PCM'lerin görünür ışığı geçirme özelliklerinden faydalanılmıştır. Suyun ışık geçirgenli insan gözünün hassasiyet aralığıyla uyum gösterdiğinden yüksek miktarda su içeren PCM'ler tercih edilmiştir. Beton veya briket türü klasik duvar kullanılan yapılarda güneş ışıınının duvar tarafından tutulduğunu belirten araştırmacı güneş ışıınınından en iyi düzeyde fayda sağlamak için ısı yalıtımlı saydam duvarlar kullanılmıştır. Pasif duvar sistemleri için yapılan bu deneysel çalışmada PCM olarak tuz hidratları ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve saydam izolasyon maddeleri seçilmiştir. PCM cam tüplere ve ticari olarak üretilen cam bloklara doldurulmuştur. Güneş ışıınınının bir kısmı gün ışığından faydalanmak amacıyla doğrudan geçirilmiştir. Ayrıca yaz aylarında ortamın aşırı ısınmasını engellemek için düzeneğe döner perdeler eklenmiştir. Gündüz aşırı ısıdan korunmayı sağlayan perdeler gece ısı kayıplarını engellemek için kullanılmıştır. [23]

Kullanılan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için 5660 erime döngüsü sonucunda termal özelliklerde bir değişiklik olmadığı saptanmış ve düşük miktarda aşırı soğuma görülmüştür. Faz değişiminin ortam üzerinde olumlu etkisi gözlenmiştir. Bununla birlikte $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nin katı halde güneş ışıınınını kırması ve saçması ısı ve ışık kazanımını azaltıcı (negatif etki) etki göstermektedir. Kaurnen (1991) PASİF GÜNEŞLE ISITMA sistemlerinde faz değiştiren materyal (PCM) seçimi için depolama sıcaklığı önemli bir kriter olduğunu belirtmektedir. Bu araştırmada çalışan

iklimin özel gereksinimleri doğrultusunda erime noktalarının düzenlemesiyle ilgili çalışmalar yapılmış ve farklı karboksilik asit karışımlarının hazırlanması için yöntem önerilmiştir. Hazırlanan karışımların özellikleri DSC ile belirlenmiş ve PCM duvarlara uygulanabilmesi için yöntem araştırması yapılmıştır. Teorik modelin doğruluğu ± 2 °C olup deneysel yöntemlerle $\pm 0,5$ °C civarında gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmada PCM olarak glober tuzu ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve organik bileşikler (aklanlar ve yağ asitleri) kullanılmıştır. Kaurnen (1991) pasif güneş uygulamaları için organik kimyasalların; yapı malzemelerine emdirilebilmesi, kendi kendine çekirdekleşebilmesi ve hiç yada çok az aşırı soğuma göstermesi özelliklerinden dolayı daha uygun materyaller olduklarını belirtmiştir.

Bu çalışmada 20 – 30 °C sıcaklık aralığında erime noktasına sahip farklı PCM karışımları hazırlanması için bir yöntem geliştirilmiştir. PCM karışımı hazırlanırken formülle ilişkilendirilmiştir. [24]

$$\ln x_i = \Delta H_{0,i} / R(1/T_{0,i} + 1/T_i) \quad (\text{III.1})$$

x_i =Karışımın ana bileşenlerinin mol kesri

$\Delta H_{0,i}$ =Saf bileşenin (i) ergime gizli ısısı (J/mol)

$T_{0,i}$ = Saf bileşenin (i) erime noktası (K)

T_i =(i) Bileşenini içeren karışımın erime noktası (K)

R=Gaz sabiti (8,315 j/Kmol)

Bu araştırma; çalışılan iklim koşullarında optimum değer için gerçekleştirilmiş olup bu değerler 21,5 °C, 22,0 °C ve 23,0 °C dir. Erime aralıkları 31,5 – 70,0 °C aralığında ölçüm yapabilen DSC ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada beton harcı, alçı duvar ve diğer yapı malzemelerine organik PCM'ler emdirilerek performansları incelenmiştir.

Çalışılan iklimlerde eğrime gizli ısılarının karışımlar için uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça %30 PCM içeren alçı duvarlarının eğrime ısısı 46kj/kg olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada olumlu sonuçlar gözlenmiş olup; bundan sonraki çalışmaların PCM alçı duvarlarda ısı transferi, termal kararlılık ve yangına karşı güvenlik konularında yoğunlaşmasının yararlı olacağı önerilmiştir. PCM alçı duvarlarının ısı depolama kapasiteleri ve verimliliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada gizli ısı depolamanın büyük ölçekli modellemesinin başarılması amaçlanmış, kullanılan duvara karşı PCM emdirilmiş duvarların ısıtma ve soğutma

modellerinde çalışma performansı incelenmiş, duvarlarda PCM kullanmanın ısı geçirgenliğine etkisi belirlenmiştir. PCM'li duvar kullanılan odadaki hava kalitesi incelenmiştir. Bu çalışmada %50 bütüls-tearat ve %48 bütülpalmitat karışımı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; duvarlarda duvarlarda PCM alçı tahtası kullanımının ısıtma ve soğutma sistemi devre dışı kaldığında ortamın ısısının daha uzun süre korunmasını sağlandığı belirlenmiştir.

Fischer (1998) Almanya'da bir okul binasının ısıtılması için; 7000 kg zeolit3X içinde enerji depolamıştır.

Depolama ortamının yüklenmesi gece saatlerinde veya hafta sonlarında 130 °C'de hava ve buhar geçirilerek gerçekleştirilmiş, yükleme sırasında ısıtma amacıyla kullanılan buhar hava karışımı okul binasına değil zeolit tankına gönderilerek depolanması sağlanmış ve depolanan bu ısı gün içinde depolama tankına gönderilerek depolaması sağlanmış ve depolanan bu ısı gün içinde depolama tankına 20 – 25 °C'de hava üflenerek 65 °C'de geri kazanılarak ortama verilmiştir. Mart 1997'de depolamaya tekrar başlanmış ve Haziran 1997'ye kadar geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Şubat 1998'e kadar elde edilen enerji 126kwh/m³ olarak gerçekleşmiştir. [25]

Binark (1998) inorganik kimyasallarla yaptığı çalışmada CaCl₂.6H₂O ve Na₂SO₄.10H₂O kullanmıştır. PCM'ler pinpon toplarına yerleştirilerek güneş toplaçlarına monte edilmiştir. Güneş toplaçlarının çalışması esnasında eriyen PCM'lerin depolayacağı enerji gece süresince, PCM'in donmasıyla geri verilecek ve böylece toplaçlardan güneş olmadığı zamanlarda da fayda sağlanacaktır. Bu çalışma; gıda sektöründe, kapalı mekanlarda kurutma işlemine yeni alçimler sunmak üzere gerçekleştirilmiştir.

Univercity of Reading'de seraların ısıtılması için iki farklı uygulama üzerinde çalışılmıştır. Birinci PCM kullanımında sıcaklığın gün boyu optimum değer dışına çıkması engellenmeye çalışılmış ve gece boyunca optimuma yakın bir değere çıkarmak için kullanılmış. İkinci PCM kullanımı çalışması çok düşük faz değiştirme sıcaklığında yapılmış. Bunun anlamı ürün soğuk gecelerde dondan kaynaklı hasardan korunacaktır. Bu sistemler İngiltere'de denenmiş ama sıcak iklimlerde kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Çünkü sıcak iklimlerde sıcaklık geceleri çok düşmektedir.

Los Alamos National Laboratuarlarında yapılan bilgisayar modellemeli çalışmada evlerde PCM yapı malzemesi olarak kullanıldığında iklime bağlı olarak

%30 ile %50 arasında değişen fazla verim sağlanabilmektedir (Boston ikliminde %30, Denver ikliminde %50). Bu çalışmada pasif solar sistemli evlerin içereceği optimum PCM konsantrasyonu ekonomik analizlerle ağırlığın onda biri olarak bulunmuş ve sonuçta yapıda yıllık elektrik ısı pompasından sağlanacak tasarruf dūřınılduęunda bu sistemin geri ödemesi 3 – 5 yıl arasında hesaplanmıştır.

Solar Energy and Energy Conservation Laboratory, Florida da suyun ısıtılması ve bölgesel ısıtmanın başarısı için PCM'lerin kullanılmasıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada depolama sistemlerinin modelleri bölgesel ısıtma için uygulanmıştır.

İsveç'te Climinator adlı bir şirket kapsüllenmiş globler tuzlarını PCM olarak kullanarak ısıtma soğutma sistemleri üretmektedir. Sistem tarafından kullanılan fanların enerjisi fotovoltatik güneş enerjisi sistemiyle sağlanmaktadır. [24]

Dünyanın çeşitli yerlerinde uygulanan bir yöntemde ağaçları PCM ile sararak dondan korumaktır. Bu yöntemle ağaçların gövdeleri sabit bir sıcaklıkta tutulur ve donması önlenir.

Türkiye'de PCM depolama sistemi 180 m²'lik bir serayı ısıtmak için kullanılmıştır. Bir tank mevsimlik depolama nitesi olarak kullanılıp 6000 kg parafin ile doldurulmuştur.

Japonya'da iki farklı tesiste PCM olarak globler tuzu kullanılarak seraların ısıtılması çalışmaları yapılmıştır. Bu PCM'ler 22 ve 24 C aralıklarında erimekteirler.

Univercity of Dayton'da parafin PCM olarak kullanılarak köprü güvertesinin geceleri donmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu işlem köprünün donmasını tamamen önleyememiş yolu kullanım açısından rahatlatmıştır.

PCM'lerle ilgili çalışmaların bazıları Tablo III.4 de görülmektedir.

Tablo III.4 Önceki Çalışmalara Genel Bir Bakış

Sıcaklık Aralığı °C	Uygulama	Madde	Referans	Amaç
(-11) – (-15)	Tıbbi Pakatleme	Üre – Su	Salyer	Patent
0	Havalandırma (Soğutma)	Buz	Birçok Kaynak	Ticari
<10	Havalandırma (Soğutma)	Clatharate : 141b/H ₂ O	Nedo 1993	Deneme
Oda Sıcaklığı	Alan Isıtma/Soğutma	Glober Tuzu	Climatör 1996	Ticari
22	Sera	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O/Üre	Machida 1995	Deneme
24	Sera	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O/NaCl	Machida 1995	Deneme
28	Isı Depolama	n – Octadekan	ITO – 1991	Modelleme
29	Konut Isıtma	CaCl ₂ .6H ₂ O	Çomaklı 1993	Deneme
30	Isı Depolama	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	Farid 1994	Deneyssel
42		Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	Farid 1994	
48 – 60	Sera	Parafin	Başçetinçelik 1996	Deneme
58	Isı Depolama	CH ₃ COONa.3H ₂ O	Woo 1991	Pilot
58 – 62	Güneşle Isıtma	Su, Palmitik Asit	Hasan 1994	Deneyssel

III.4.1. Elektrik Motorunun PCM ile Soğutulması Çalışması

Elektrik motorlarının boyutlarının küçülmesi ve belirli güç artırımlarıyla, ısının dağıtılması giderek daha önemli bir sorun haline gelmiştir. Bugünlerde gelişme temel olarak ısı seviyesiyle sınırlandırılmıştır. Elektrik yalıtkanları ve stator kabloları gibi bazı bileşenlerin ömürleri, aşırı ısıya maruz kaldıklarında azalır. Kontrol alanında kullanılan bazı motorlar özellikle geçici (transient) durumda yüksek yerel ısılar ileterek çalışırlar. Bu çalışma aralıklı çalışan otosenkronlu (kendi kendine eşzamanlı olan) bir elektrik motorunun soğutulmasını araştırır. Bu tip bir motorda Jul kayıpları büyük olur ve statorda yoğunlaşır. Bu nedenle sadece stator bölümü burada dikkate alınmıştır.

Daha önceki bir çalışmada motor termal davranışını tahmin etmek ve değişik soğutma sistemleri denemek için bir stator modeli geliştirilmiştir. Bu çeşit bir çalışma için uygun olduğu ve bir çok yazar tarafından kullanıldığı için listelenen yöntemler içerisinde, nodal yöntem seçilmiştir. Simülasyonlar göstermiştir ki, stator sıcak noktaları sargı kafalarında (iletkenlerin slotların dışında kalan bölümleri) yoğunlaşmış ve uygun bir soğutma sisteminin seçimine olanak sağlamıştır. Bu sistemin ilkesi Koziej'in önerdiği ve Malecki'nin modellediği gibi bir faz değişim maddesinin erimesidir (phase change material PCM). PCM sargı kafalarını emdirerek çalışma sırasındaki enerji kayıplarını emer ve sargı kafasının maksimum ısını düşürebilir.

Bu çalışma deneysel veriler ile temel modelin ayarlanmasına, PCM erime modeline ve soğutulmuş motor simülasyonuna odaklanır.

III.4.1.1. Motor Dizaynı

Motor (Şekil III.3) düşük güçlü otosenkron bir makinedir. Kapalı alüminyum alaşımı bir çerçeve ve dayanakları destekleyen iki kalkandan oluşur. Statör, birbirinden vernik tabakayla yalıtılmış manyetik silikon demir levhalardan oluşur. İçinde, her biri dört basit bakır telle yapılmış 18 iletken içeren 18 oluk vardır. Teller bir yalıtım malzemesi ile kaplanmış ve bir oluk yalıtkanıyla metal levhalardan ayrılmıştır, bütüne de reçine emdirilmiştir. Olukların dışında sargı kafalarından gelen birbirlerine bağlı iletkenler vardır. [25]

III.4.1.2. Alan Tanımı

Yarıçap simetrisinden dolayı alan, yarım dış veya yarım oluk gibi en küçük geometrik periyotlara karşılık veren bir stator bölümüdür. İki kalkanın geometrisinin farklı olmasıyla, başka simetri yoktur.

III.4.1.3. Blok Şema

Yayılan ısı göz ardı edildiğinde, düşünülen ısı transferi iletken veya ısı yayımlıdır. Bu hipotez, ışınlı ısı transferinin motor maksimum ısıları üzerine araştırma yapmış birkaç yazar tarafından kabullenilmiştir.

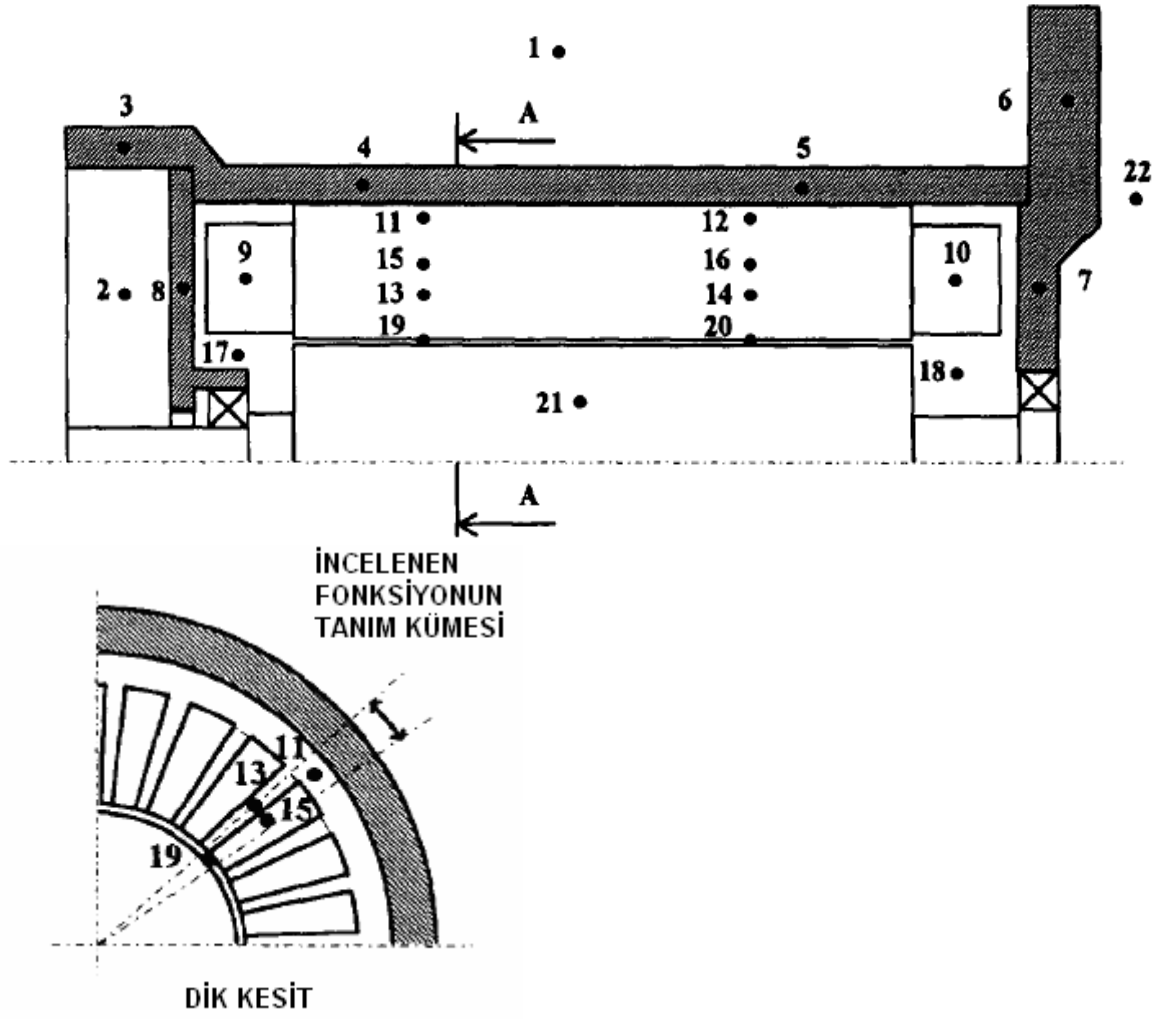
Bu hipotezin aralıklı durumda çalışan statorumuzda doğruluğunu kanıtlamak için, sargı başlarında (9. ve 10. nodlar), çerçevede (4. ve 5. nodlar) ve sargı başları ile kalkanlar (7. ve 8. nodlar) arasındaki çukurluklara yayımlı ısı transferi sağladık. Denklem (III.2)' de verilen ışınlı iletkenlikler, gri bölgedeki ısı transfer bölgesinin geçirgen bir ortamda çoklu yansıtma olmaksızın yaydığı varsayılarak hesaplanmıştır:

$$G_{il} = \varepsilon_i . \alpha_j . \sigma . F_{ij} . S_i . (T_i^2 + T_j^2) . (T_i + T_j) \text{ (III.2)}$$

70 saniyelik çalışmada (termal olarak gerçek çalışmaya denk) elde edilen sonuçlar Tablo III. 6'da verilmiştir. Simülasyonlar temel modelle yapılmıştır.

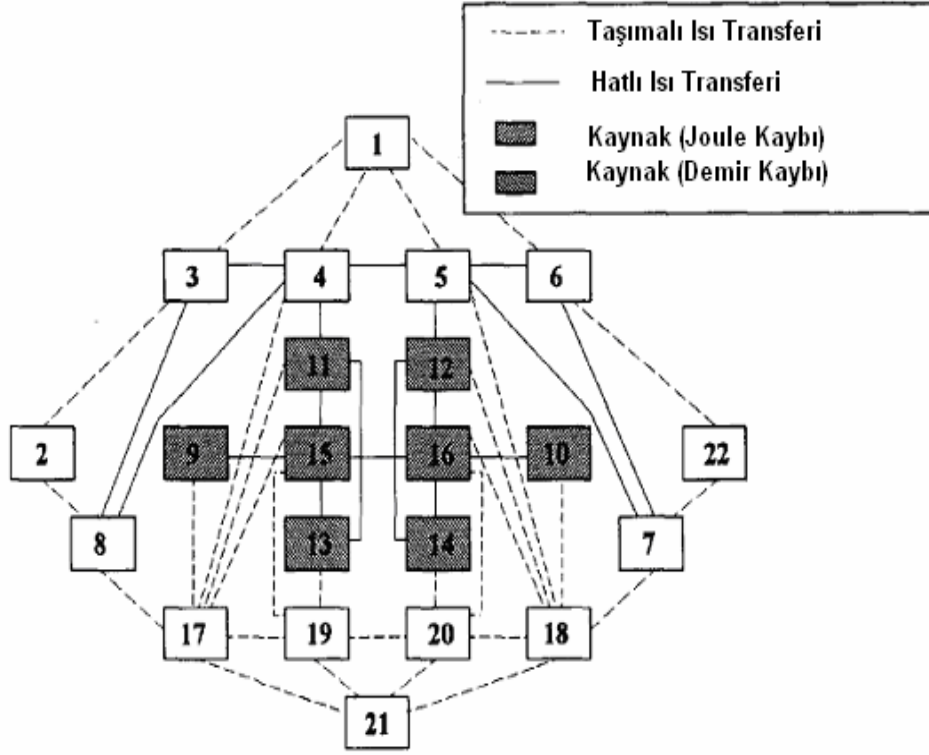
Yayılan ısı transferi hesaba katıldığında sıcak nokta ısıları %0.2 ila %1.6 arasında düşmektedir. (25 derece hava sıcaklığı merkez olarak alındığında) ve iletken sıcaklığı %0.2 ila %1.0 arasında düşmektedir. Bu sonuçlar yüksek ısılarda zayıf ısı yayılımı etkisi hipotezini doğrulamaktadır.

Şekil III.4'deki blok şemada nodlar ve sıcaklık kaynakları arasındaki termal bağlantılar gösterilmiştir. [25]



Nb	Yeri	Nb	Yeri
1, 2, 22	Çevre Havası	13, 14	Diş
3, 4, 5	Çerçeve	15, 16	İletken
6, 7	Sağ Koruyucu	17	Sol boşluk
8	Sol Koruyucu	18	Sağ boşluk
9	Sol sarıcı kafa	19, 20	Rotor – Stator hava boşluğu
10	Sağ sarıcı kafa	21	Rotor
11, 12	Metal levhalar		

Şekil III.3 Motor Dizaynı ve Nod Yerleri



Şekil III.4 Blok Şema

III.4.1.4. İletkenlik, Termal Durgunluk ve Güç Kayıpları

Makine homojen veya bileşik maddelerden oluşmuştur. Değişik elemanların termal iletkenliklerini ve termal durgunluklarını kararlaştırmak için bunların termal iletkenlikleri, özel ısı ve yoğunlukları gereklidir. Homojen maddeler için bu özellikler Tablo III.5’da verilmiştir. [25]

Tablo III.5 Materyal Özellikleri

Materyal	Nodlar	$\Lambda(\text{W/m.K})$	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
UTA6V	8	6.7	543	4430
AU4G	3, 4, 5, 6, 7	169	881	2790
Silikon (%3) Demir	11 ,12 ,13, 14, 21	27	459	7650
Bakır	9, 10, 15, 16	372	383	8300
Vernik	15, 16	0.3	790	1800
Havalandırma	1, 2, 17, 18, 19, 20, 22	0.025	1004	1.29

Heterojen maddeleri tanımlamak (metal tabakalar, sargı başları, yarıçap veya teğet yönlerdeki iletkenler) ve bazı geometrik parametreler (sargı başları hacmi) kolay değildir. Temel modelde referanslardan alınır, daha sonra deneysel verilerle değiştirilirler.

Termal bağlantı dirençleri : Stator parçaları genellikle ince yalıtkan alanla ayrılır. Rotor-stator hava boşluğu, en alt stator boşluğu, sargı başı çukuru, metal tabakalar paket çerçevesi, kalkan çerçevesi. Bu termal dirençler, modelin deneysel verilerle değiştirilmesiyle kararlaştırılmalıdır. Konvektif iletkenlikler : Çerçeve yatay bir silindir olarak düşünülmüş ve onun dışarıdaki havayla temas eden dış yüzeyi için doğal ısı transferi yayılımı katsayısı MacAdams korelasyonundan faydalanır

III.4.1.5. Temel Modelin Deneysel Doğrulanması

Deneysel çalışma, soğutma sistemi olmayan bir motoru konu almaktadır. Amaç, daha sonra PCM erimesi soğutma sisteminin performansını ölçmek için sıcak nokta ısılarını tam olarak belirlemektir.

Deneyisel Testler : Isı ölçümleri sargı başlarında termoçiftler (thermo couples) kullanılarak yapılmıştır. Bunlar, çemberin etrafında düzenli olarak yerleştirilmişlerdir. Dört termoçift simetrik olarak dönüş eksenine, ve iki termoçift en alt oluk yalıtkanı ile metal levha paketi arasına. [25]

Son ikisi, yaklaşık olarak metal levha paketinin ısısının ölçümünü vermektedir. İki test yapılmıştır. Birincisinde, sabit durum çalışmasına yaklaşık olarak ulaşılmış ve kalkan, diş ve çerçeve sıcaklıkları da ölçülmüştür. İkincisinde, motor 70 saniye çalıştırılmıştır.

Parametrik Çalışma :

Temel modelin on altı parametresi tanımlanmıştır:

Dört termal iletkenlik (metal tabakalar, dişler, iletkenler – yarıçap, teğet)

Üç termal durgunluk (metal tabakalar, iletkenler)

Bir geometrik parametre (sargı başı hacmi)

Dört konvektif temas direnci

Dört konvektif ısı transferi katsayısı (yan çukurlarda, rotor – statör hava boşluğunda, çerçeve ve ortam havası arasında ve kalkanlarla ortam havası arasında).

Bütün bu bilinmeyen parametreler için bir çalışma yapılmasının amacı motor ısı alanına etkilerini görmektir. Parametrelerin değişim yelpazeleri verilen değerlere göre kararlaştırılmıştır.

En etkili parametreler, çap ve teğet termal iletkenlikleri, yan çukurlardaki ısı transfer katsayıları, çerçeve ve ortam havası arası ve metal tabaka paketi ile çerçeve arasındaki termal temas direncidir.

III.4.1.6. Faz Değişim Maddesinin Erimesiyle Soğutma:Modelleme Ve Simülasyon

Bu çalışmada, PCM erimesiyle sargı başı soğutma sisteminin performansı incelenmiştir.

Temel stator modeline biri sıvı faz (nod 23) diğeri kat faz (nod 24) iki nod eklenerek iki model geliştirilmiştir. Modeller doğrusal oldukları için PCM ayrıca bölmeye gerek yoktur.

Birinci modelde, sargı başının sadece bir tarafı PCM ile kaplanmış ve sıvının doğal yayılımı göz önünde bulundurulmuştur; ikinci modelde, PCM bütün sargı başına yedirilmiştir ve doğal yayılım göz önünde bulundurulmamıştır. [25]

III.4.1.7. Erime Modellemesinin Tarifi

Sargı başının tek tarafında PCM : PCM sargı başının tarafıyla kalkan arasındaki boşluğu doldurur. Diğer taraflar, çukurla birlikte konvektif ısı transferine bırakılmıştır. Dört çalışma aşaması hesaba katılmıştır.

Birinci Aşama : Erimeden önce ısı, sargı başından katı PCM'e ve kalkana doğru temasla akar. İnce PCM tabakasının çukurlarla ısı değişimi yapmadığını varsayılmıştır. PCM tamamen ya da kısmen katıyken (iki fazın yoğunluk farkından dolayı) PCM ile kalkan arasında bir hava boşluğu kalır. Sargı başı – katı PCM arabirimi sıcaklığı bu arabirimdeki enerji balansıyla aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_i = \frac{G_{wh-s} \times T_{wh} + G_{s-wh} \times T_s}{G_{wh-s} + G_{s-wh}} , \quad (III.3)$$

T_i ,PCM erime noktasından düşük olduğu sürece, katı PCM bitişik nodlarla iletken ısı transferi yoluyla ısınır. T_i erime noktasına ulaştığında ikinci aşama başlar.

İkinci Aşama : Doğal konveksiyon olmadan erime. Isı, sargı başlarından eriyen ön tarafa sabit bir sıcaklıkta temas yoluyla akar. Aynı şekilde, eriyen ön taraf ile kalkanlar arasındaki kondüktif ısı transferi göz önünde bulundurulmuştur. Her bir adımda, eriyen kütle katı – sıvı arabirimdeki ısı değişimiyle belirlenir.

Sıvı kütlenin artması, katı kütlenin azalması kalınlık farklarına, ve sonuç olarak bir sonraki adımda ele alınacak olan sıvı ve katı iletkenlikleri farklılıklarına neden olur.

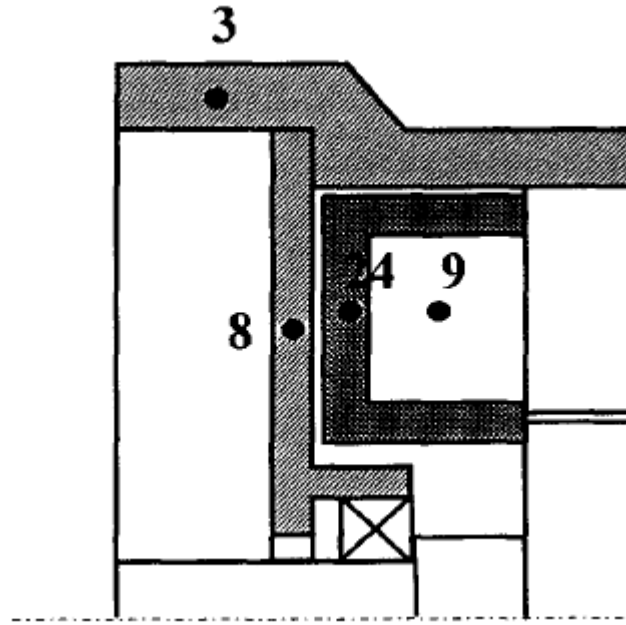
Üçüncü Aşama : Sıvının doğal ısı yayılımıyla erime. Bu aşama için aşağıdaki varsayımlarda bulunulmuştur:

1. Motorun rotor eksenini yataydır ve sargı başındaki ısı kayıpları tek çeşittir. Sonuç olarak, eriyen ön taraf mükemmel bir şekilde düz ve dikeydir. Hiçbir bozulma olmamıştır.

2. Gerçek hayat göz önünde bulundurularak doğal ısıyayım yerleşme zamanı kısa tutulmuştur.

Sonuç olarak, ısı alışverişleri, sıcaklıkları düşünülen zamana göre hesaplanan iki sabit duvar arasındaki konvektif ısı transferinden dolayı farklılık göstermez. [25]

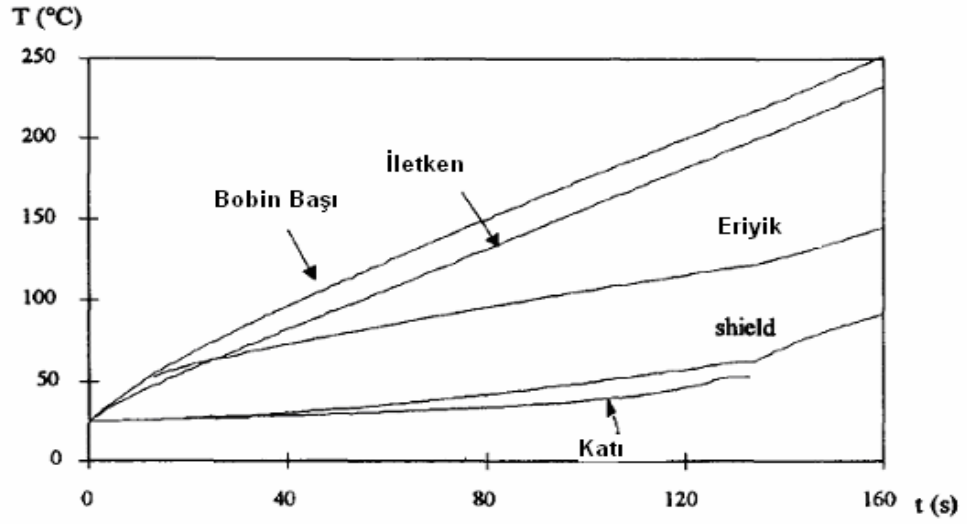
Dördüncü Aşama : Erime sonrası. Şekil, PCM in tamamen sıvı halde olması ve hava boşluğunun yok olmuş olması dışında (genellikle olduğu gibi sıvı faz katı fazdan daha yoğunsa) birinci aşamayla aynıdır.



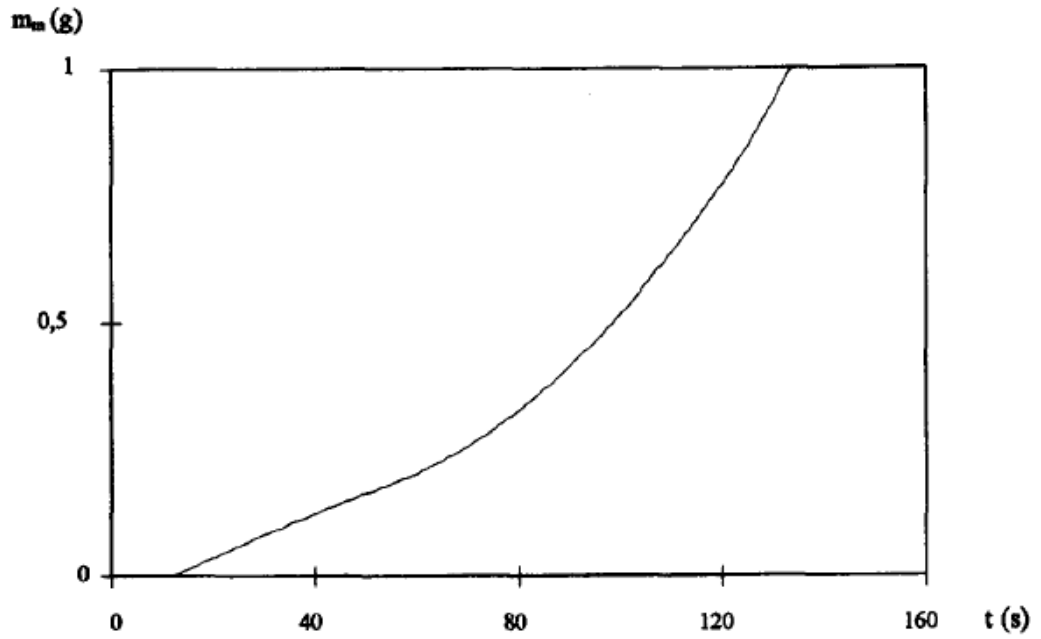
Şekil III.5 Bütün Oluklardaki PCM

III.4.1.8 Çalışmadan Çıkarılan Sonuçlar

Erime ısısı 53°C olan 1g 'lık cytoparaffinle bir simülasyon yapılmıştır. Bu kütle, 7mm kalınlığında bir katı fazda ve 8.2 mm kalınlığında bir sıvı fazda karşılaşmıştır. Grafik 1 ve 2'de, ısılar ve erimiş kütle çeşitleri, 25°C ortam sıcaklığı olmak üzere, işaretlenmiştir. Daha önce tarif edilen dört aşama gözlemlenebilir: [25]



Şekil III.6 Sıcaklığın Zamanla Değişimi



Şekil III.7 Zamanla Değişen Eriyen Kütle

- 0 – 12 saniye : Sargı başı – PCM arabirimi erime noktasına henüz ulaşamamıştır. Sargı başı, iletken, katı PCM ve kalkan ısıları artar.
- 13 – 54 saniye : Erime doğal taşıma olmadan gerçekleşir. Sıvı kütle yavaşça artar. Sıvı ve katı faz sıcaklıkları artar. Sargı başı sıcaklığı eğrisi eğimi, erime olgusundan dolayı daha küçüktür.

- 55 – 133 saniye : Erime sırasında doğal taşıma gerçekleşir. Erimiş kütle daha hızlı artar. Sıvı termal direnç daha az olduğu için, ısı, eriyen ön tarafa daha kolay bir şekilde akar.
- 134 – 160 saniye : PCM tamamen sıvıdır. Erimenin bitmesinden hemen önce, gizli ısı termal emilimi ortadan kaybolduğu için, kalkan ve sıvı faz sıcaklıkları güçlü bir şekilde artar.

Bu çalışma 70 saniyelik bir çalışmada en iyi sargı başı soğutmasını sağlayan PCM yi belirlemeyi amaçlar. Daha önce Belletre tarafından 60 PCM üzerinde yapılan çalışmada 20 – 200°C erime ısıları listelenmiştir. Bu PCM ler, esasen saf alkali, yağlı asitler veya parafinlerdir. Sadece bir metal bu erime ısısı yelpazesinde bulunmuştur. Bu metalin dışında listelenen diğer PCM lerin özellikleri benzerdir :

- Saklı erime ısısı 130 ila 300 kJ/kg,
- Yoğunluk 750 ila 1500 kg/m³
- Özel ısı 1300 ila 3500 J/kg.K,
- Termal iletkenlik 0.10 ila 0.50 W/m.K

PCMler iki statör modelinde kullanılmışlardır. Karşılaştırmalar, kalkan – sargı başı mesafesi sabitesini (8mm) muhafaza etmek için aynı PCM kalınlığında yapılmıştır. Soğutma için en uygun PCM galliumdur. Elverişli gallium iletkenliğinden dolayı (her iki faz için 34 W/m.K), sargı başı ile kalkan veya çerçeve arasındaki ısı transferi iyileşmiş ve sargı başı sıcaklığı önemli ölçüde düşmüştür. İletken daha az soğumuş ve böylece statör sıcak noktası olmuştur.

P116 paraffin ikinci en uygun PCM dir. Katı ve sıvı faz termal iletkenlikleri metal olmayan PCM ler içinde en yüksek olanlarıdır. Erime sıcaklığı en düşüklerden; saklı erime ısısı, yoğunluğu ve özel ısısı en yüksek olanlardandır. Aynı PCM kalınlığını muhafaza etmek için 0.9 ve 2.4g kütle miktarları sırasıyla birinci ve ikinci modelde hesaba katılmıştır.

Bu çalışma, geçici durumda çalışan bir otosenkron motor statorun soğutulmasıyla ilgilidir. Soğutma sistemi, sıcak noktaların yoğunlaştığı sargı kafalarına nüfuz eden katı – sıvı PCM’ nin faz değişimidir. A 25 nod modeli motorun termal davranışını simüle etmek ve en uygun PCM yi belirlemek için geliştirilmiştir.

[25]

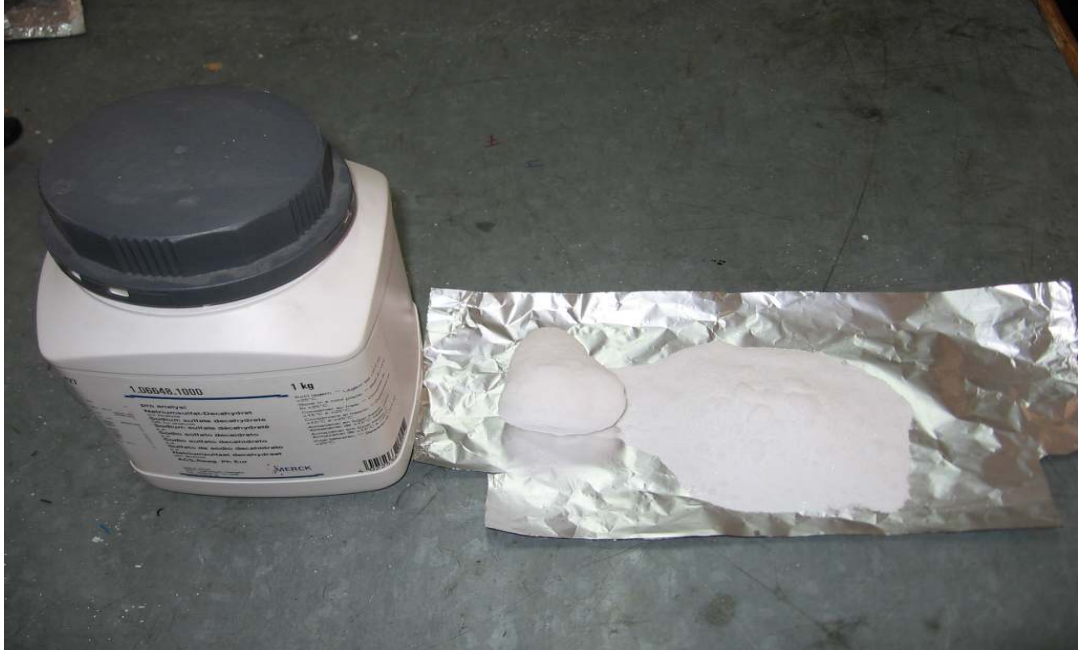
Bu çalışma belirlenen parametrelerin (iletken yarıçap ve teğet iletkenlikleri, çukurlardaki konvektif ısı transferi katsayıları) deneysel verilerle karşılaştırarak değiştirilmesine olanak verir. Model amaçlarımıza ulaşmak için yeterince doğru bilgi verir. Sargı başı için sıcaklık uyumsuzluğu sabit durumda %4.4, ve 70 s. üzerindeki ısınma süresi için %6.3 tür. Soğutma sistemi simülasyonu, sıcak nokta sıcaklığının saklı ısı enerjisi deposuna, hissedilebilir ısı enerjisi deposuna ve sargı başı – kalkan veya çerçeve iletken ısı transferine bağlı olarak düştüğünü göstermiştir. PCM termofizik özellikleriyle ilgili parametrik çalışma sargı başı sıcaklığının artan iletkenlikle, termal durgunlukla ve saklı erime ısıyla ve düşen erime sıcaklığıyla düştüğünü göstermiştir. 70 saniyelik ısınma periyotlarında yapılan simülasyonlar sargı başı soğumasının galliumla 69K, P116 parafinle 14K olduğunu göstermiştir. Aynı soğuma stator termal durgunluğunda %15 lik bir artırmayla da elde edilebilir.

Bu çalışma, sadece bir geçici olayla ilgilidir ancak, geçicilerin bir başarısına yer sağlamak önemli olmalıdır. Bu yüzden, böyle bir soğutma sistemin performansı gerçekten, ısınmaya (PCM erimesiyle) ve soğumaya (PCM katılaşması) tabi birçok elektrikli sistem için araştırılabilir. [25]

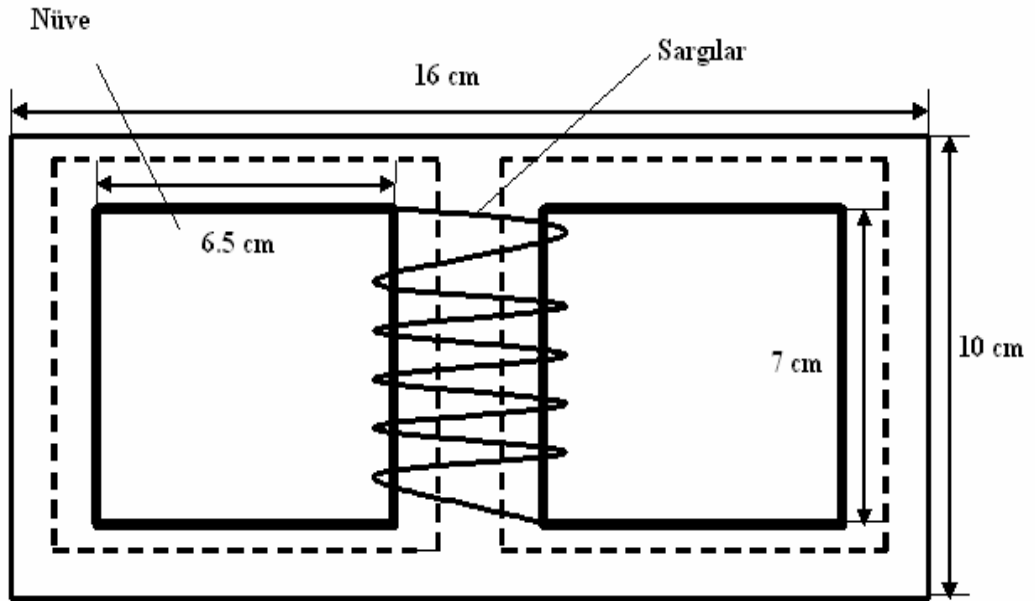
BÖLÜM IV.

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEME (PCM) KULLANILARAK TRANSFORMATÖR SOĞUTMASI DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Yapılan deneysel çalışmada, model olarak alınan transformatörün faz değiştiren malzeme kullanılarak soğutulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Seçilen model transformatör bir fazlı, mantel tip, 8 kVA gücünde ve 220V/36V giriş – çıkış gerilimlerine sahiptir. Transformatör yüklenerek alınan sıcaklık değerlerine göre seçilen faz değiştiren malzeme ise Merck firması tarafından üretilmiş olup bir kilogramlık kutusu içinde satın alınmıştır. Kullanılan PCM malzeme $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Sodyum Sülfat Dekahidrat $25^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ 'de faz değiştirmektedir. Aynı zamanda malzeme eriyik durumunda iletkenidir. Model transformatöre uygulanan PCM malzemenin kullanılmadan önceki durumu Şekil IV.1'de görülmektedir. Şekil IV.2'de model olarak alınan transformatörün ölçüleri görülmektedir.



Şekil IV.1 PCM Malzemenin Kullanımdan Önceki Görünümü



Şekil IV.2 Model Transformatörün Ölçüleri

IV.1. MATERYAL VE METOD

IV.1.1. Materyal

Deneyisel çalışmada faz değiştiren materyal olarak 25°C’de faz değiştiren Na₂SO₄.10H₂O Sodyum Sülfat Dekahidrat PCM kimyasal malzemesi kullanılmıştır. Malzeme Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü’nün sarf malzeme alımından temin edilmiştir.

Deneyde kullanılan transformatör 1 fazlı olup, mantel tipinde, 8 kVA gücünde 220V/36V giriş – çıkış gerilim değerlerine sahiptir. Deneyde ölçü aleti olarak yeni kalibre edilmiş AVOMetre’nin sıcaklık kadranı ısı ölçüm problemleri vasıtası ile belirlenen noktalardan sıcaklık değerleri alınarak kullanılmıştır.

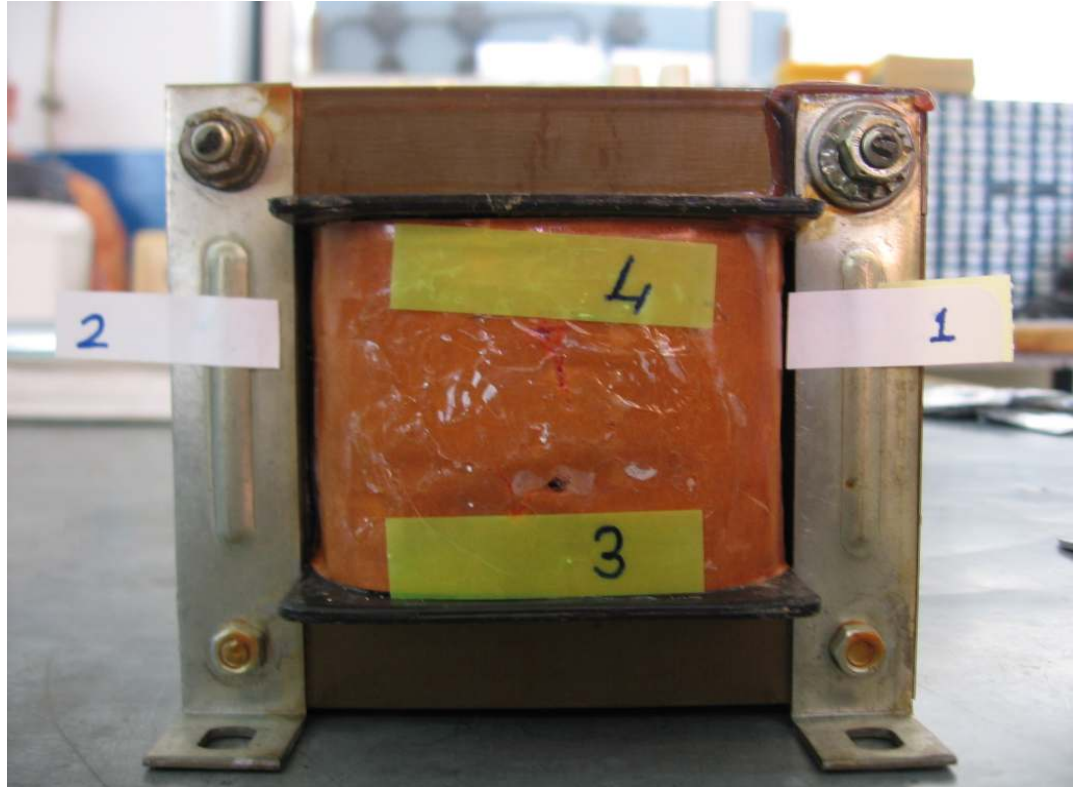
IV.1.2. Deneyde Yapılması Planlanan Aşamalar

1. Model transformatörün seçilmesi
2. Model transformatörün nominal yükünde yüklenerek, transformatörün muhtelif ısınan noktaların belirlenmesi ve alınan sıcaklık değerlerinin kaydedilmesi
3. Alınan sıcaklık değerlerine göre hangi tip faz değiştiren malzemenin kullanılmasının tespiti
4. Boş alüminyum folyoyu transformatöre sararak muhtelif ısınan noktalardan sıcaklık değerleri alınarak kaydedilmesi
5. Faz değiştiren malzemenin sargılara temas etmemesi için alüminyum folyo ile uygun paketler yapılarak model transformatörün soğutma noktalarına yerleştirilmesinin gerçekleştirilmesi
6. Nominal yükünün üzerinde çalıştırılarak faz değiştiren malzeme eklenmiş transformatörün sıcaklıkları belirlenmiş noktalarındaki değerlerin ölçülmesi ve kaydedilmesi
7. PCM’li ve PCM’siz sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

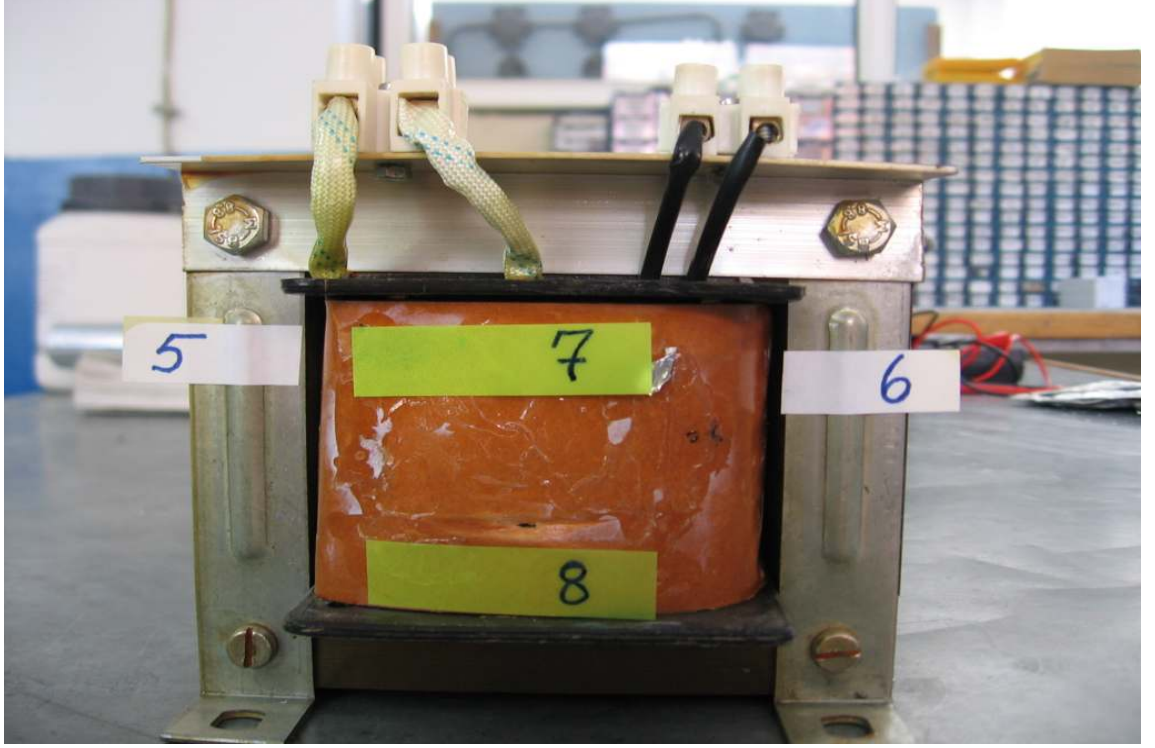
IV.1.2.1. Model Transformatörden Alınan Sıcaklık Değerleri

Yapılan çalışmada 1 fazlı, mantel tip, 8 kVA gücünde 220V – 36V giriş – çıkış gerilim değeri veren bir transformatör model olarak alınmıştır. Transformatörün çıkışına 10 Ohm değerinde 10 adet reosta paralel bağlanmak suretiyle, transformatör 10 Ohm ile yüklenerek devreden 22 Amper akım geçmesi sağlanmış böylece yaklaşık olarak 8 kVA yükte çalıştırılarak ısınması sağlanmıştır. Bu yükte çalışan transformatörün ısınma noktalarındaki ısı artışları incelenmiştir. Isınan transformatörün en çok ısınan noktalarından değişik zaman dilimlerinde değerler alınarak kaydedilmiştir.

Şekil IV.3’ ve Şekil IV.4’ de transformatörün ön ve arka sargıları ve manyetik nüveleri, en çok ısınan noktaları tespit edilmiş ve 1’ den 8’ e kadar numara verilmiştir. Numaralandırılmış kısımlardan daha sonra transformatör yüklenerek ölçü aleti vasıtasıyla sıcaklık değerleri alınmış ve Tablo IV.1, Tablo IV.2, Tablo IV.3, Tablo IV.4, Tablo IV.5, Tablo IV.6, Tablo IV.7, Tablo IV.8 ve Tablo IV.9’ a kaydedilmiştir. Deneyin yapıldığı anda ortam sıcaklığı 18 °C olarak kaydedilmiştir.



Şekil IV.3 Model Transformatörün 1 – 4 Arası Numaralandırılmış Alanları



Şekil IV.4 Model Transformatörün 5 – 8 Arası Numaralandırılmış Alanları

Numaralandırılmış kısımlardan, model transformatörün çıkışına 10 ohm değerinde 8 kVA gücünde bir yük bağlanarak sıcaklık değerleri değişik sürelerde alınmıştır ve alınan sıcaklık değerleri Tablo IV.1'e kaydedilmiştir.

Şekil IV.5'de model transformatörün yüklü olarak çalışma durumundaki deney setinin resmi görülmektedir.



Şekil IV.5 Model Transformatörün Çıkışına Bağlanan Reostalar ve Ölçü Aleti

Tablo IV.1 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
1	2.00	38
1	2.30	46
1	3	50
1	3.30	54
1	4	59
1	4.30	67
1	5	74
1	5.30	79
1	6	84

Tablo IV.2 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
2	2.00	35
2	2.30	44
2	3	52
2	3.30	59
2	4	66
2	4.30	70
2	5	75
2	5.30	80
2	6	87

Tablo IV.3 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
3	2.00	38
3	2.30	46
3	3	50
3	3.30	54
3	4	59
3	4.30	67
3	5	74
3	5.30	79
3	6	84

Tablo IV.4 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
4	2.00	41
4	2.30	47
4	3	53
4	3.30	60
4	4	64
4	4.30	71
4	5	76
4	5.30	83
4	6	88

Tablo IV.5 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
5	2.00	39
5	2.30	46
5	3	51
5	3.30	57
5	4	63
5	4.30	69
5	5	77
5	5.30	81
5	6	87

Tablo IV.6 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
6	2.00	34
6	2.30	44
6	3	51
6	3.30	59
6	4	67
6	4.30	72
6	5	75
6	5.30	80
6	6	89

Tablo IV.7 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
7	2.00	40
7	2.30	47
7	3	54
7	3.30	61
7	4	68
7	4.30	75
7	5	76
7	5.30	82
7	6	88

Tablo IV.8 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
8	2.00	38
8	2.30	46
8	3	51
8	3.30	57
8	4	63
8	4.30	68
8	5	74
8	5.30	79
8	6	85

Tablo IV.9 Model Transformatörün Dış Gövdesinden Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
Dış Gövde	2.00	27
Dış Gövde	2.30	29
Dış Gövde	3	30
Dış Gövde	3.30	34
Dış Gövde	4	39
Dış Gövde	4.30	42
Dış Gövde	5	47
Dış Gövde	5.30	49
Dış Gövde	6	53

IV.1.2.2.Model Transformatöre Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Değerler

Model transformatöre PCM faz değiştiren malzeme eklenmeden önce, faz değiştiren malzemenin sarıldığı alüminyum folyo transformatör etrafına PCM' siz boş olarak sarılmış ve belirlenen noktalardan sıcaklık değerleri alınarak, Tablo IV.10, Tablo IV.11, Tablo IV.12, Tablo IV.13, Tablo IV.14, Tablo IV.15, Tablo IV.16, Tablo IV.17, Tablo IV.18' e kaydedilmiştir.

Tablo IV.10 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
1	2.00	35
1	2.30	41
1	3	49
1	3.30	55
1	4	60
1	4.30	64
1	5	69
1	5.30	76
1	6	81

Tablo IV.11 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
2	2.00	35
2	2.30	41
2	3	49
2	3.30	55
2	4	62
2	4.30	70
2	5	72
2	5.30	78
2	6	83

Tablo IV.12 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
3	2.00	36
3	2.30	45
3	3	50
3	3.30	54
3	4	59
3	4.30	65
3	5	72
3	5.30	78
3	6	83

Tablo IV.13 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
4	2.00	37
4	2.30	44
4	3	51
4	3.30	59
4	4	64
4	4.30	70
4	5	76
4	5.30	81
4	6	85

Tablo IV.14 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
5	2.00	35
5	2.30	42
5	3	50
5	3.30	55
5	4	63
5	4.30	68
5	5	75
5	5.30	81
5	6	86

Tablo IV.15 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
6	2.00	30
6	2.30	39
6	3	47
6	3.30	55
6	4	63
6	4.30	71
6	5	75
6	5.30	79
6	6	84

Tablo IV.16 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
7	2.00	35
7	2.30	44
7	3	51
7	3.30	59
7	4	64
7	4.30	71
7	5	76
7	5.30	80
7	6	85

Tablo IV.17 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Boş
Alüminyum Folyo Sarılarak Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
8	2.00	38
8	2.30	44
8	3	51
8	3.30	55
8	4	62
8	4.30	65
8	5	72
8	5.30	76
8	6	83

Tablo IV.18 Model Transformatörün Dış Gövdeden Boş Alüminyum Folyo Sarılarak
Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
Dış Gövde	2.00	20
Dış Gövde	2.30	24
Dış Gövde	3	29
Dış Gövde	3.30	32
Dış Gövde	4	35
Dış Gövde	4.30	39
Dış Gövde	5	44
Dış Gövde	5.30	47
Dış Gövde	6	50



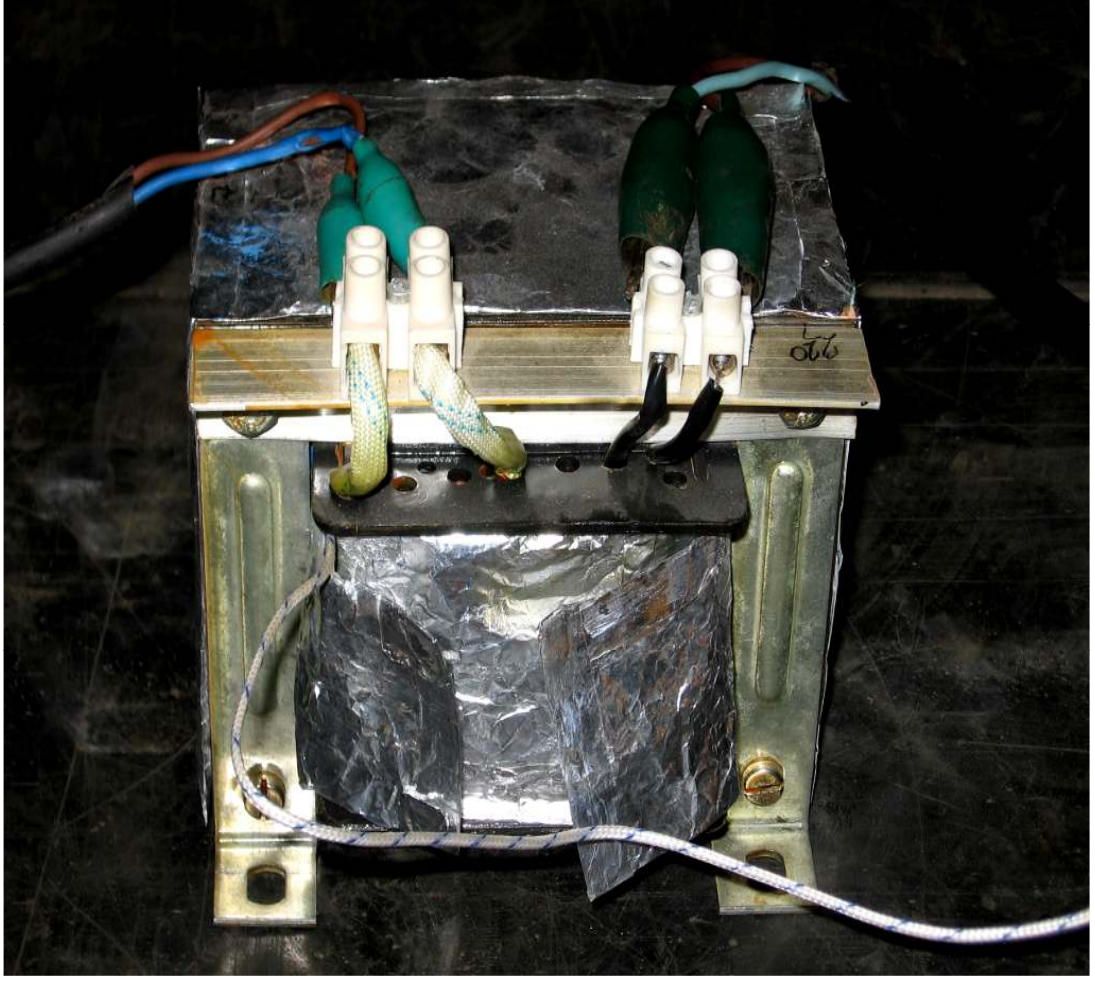
Şekil IV.6 Model Transformatörün Numaralandırılmış Kısımlarından Boş
Alüminyum Folyo Sarılmış Sıcaklık Değerlerinin Alınması

IV.1.2.3.Model Transformatöre PCM Eklenmesi

Transformatörü nominal yükünün üstünde yükleyerek sıcaklık değerini artırdıktan sonra en çok ısınan alanlara faz değiştiren malzeme alüminyum folyo ile yapılmış paketlere konularak enjekte edilmiştir. Alüminyum folyo içine konulan paketlerdeki PCM malzemeler Şekil IV.7’de görüldüğü gibi küçük paketler 110 gr, büyük paketlere 175 gr PCM malzeme konularak hazırlanmıştır. Model transformatöre enjekte edilen $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Sodyum Sülfat Dekahidrat 25°C ’de faz değiştiren kristal yapıdaki PCM malzemedir. Şekil IV.8’de transformatörün PCM malzeme kullanılarak soğutulması görülmektedir. Aynı noktalardan, aynı sürelerde alınan sıcaklık değerleri de Tablo IV.19, Tablo IV.20, Tablo IV.21, Tablo IV.22, Tablo IV.23, Tablo IV.24, Tablo IV.25, Tablo IV.26, Tablo IV.27’de görülmektedir.



Şekil IV.7 Deney Transformatörüne Eklenen PCM Malzeme Paketleri



Şekil IV.8 Deney Transformatörüne PCM Malzeme Yerleştirilmesi

Tablo IV.19 Transformatörün PCM' li Durumda 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
1	2.00	30
1	2.30	37
1	3	44
1	3.30	49
1	4	52
1	4.30	57
1	5	63
1	5.30	70
1	6	75

Tablo IV.20 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
2	2.00	30
2	2.30	34
2	3	42
2	3.30	49
2	4	56
2	4.30	61
2	5	69
2	5.30	74
2	6	79

Tablo IV.21 Model Transformatörün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
3	2.00	31
3	2.30	38
3	3	42
3	3.30	48
3	4	54
3	4.30	60
3	5	66
3	5.30	71
3	6	77

Tablo IV.22 Model Transformatörün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
4	2.00	32
4	2.30	38
4	3	44
4	3.30	50
4	4	55
4	4.30	61
4	5	66
4	5.30	71
4	6	79

Tablo IV.23 Model Transformatörün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
5	2.00	29
5	2.30	37
5	3	42
5	3.30	46
5	4	52
5	4.30	59
5	5	62
5	5.30	69
5	6	75

Tablo IV.24 Model Transformatörün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
6	2.00	30
6	2.30	33
6	3	41
6	3.30	47
6	4	55
6	4.30	61
6	5	66
6	5.30	71
6	6	76

Tablo IV.25 Model Transformatörün 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
7	2.00	32
7	2.30	37
7	3	44
7	3.30	51
7	4	57
7	4.30	63
7	5	67
7	5.30	71
7	6	80

Tablo IV.26 Model Transformatörün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
8	2.00	28
8	2.30	36
8	3	42
8	3.30	46
8	4	52
8	4.30	59
8	5	61
8	5.30	69
8	6	76

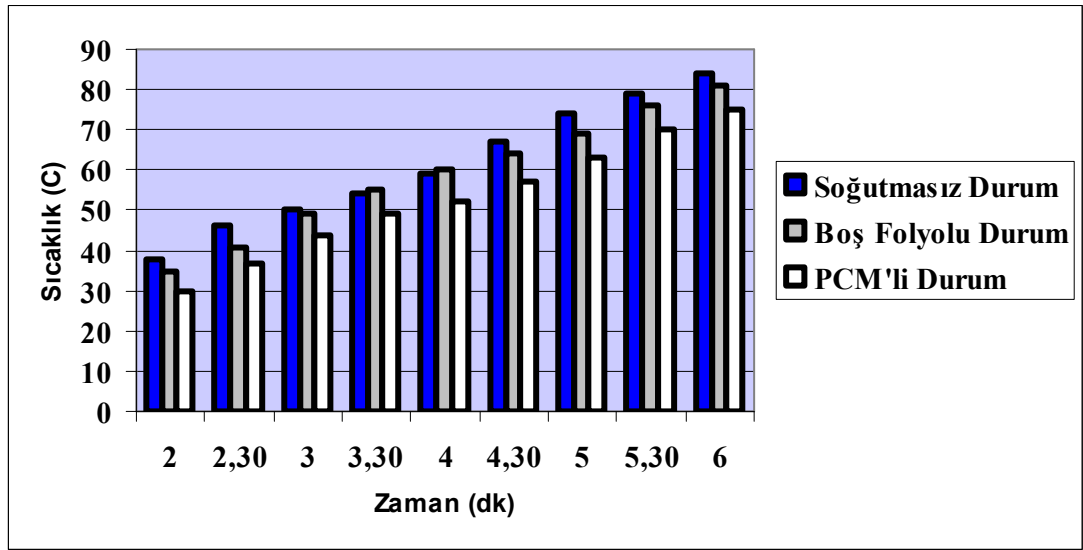
Tablo IV.27 Model Transformatörün Dış Gövdesinden Alınan Sıcaklık Değerleri (Sabit Yük)

Numara	Geçen Süre (dk)	Alınan Sıcaklık Değeri (°C)
Dış Gövde	2.00	20
Dış Gövde	2.30	23
Dış Gövde	3	27
Dış Gövde	3.30	33
Dış Gövde	4	38
Dış Gövde	4.30	41
Dış Gövde	5	43
Dış Gövde	5.30	46
Dış Gövde	6	48

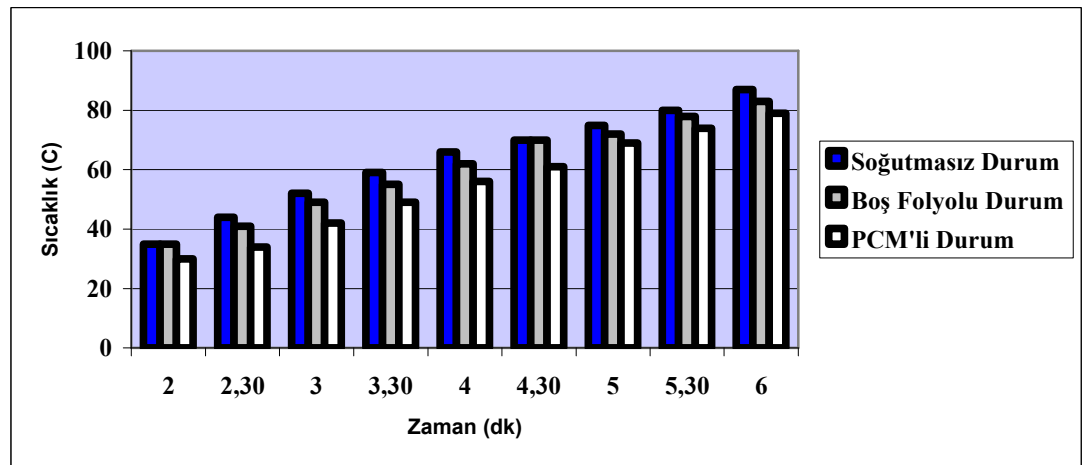
IV.2. ALINAN SICAKLIK DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

IV.2.1. Model Transformatörden Alınan Sıcaklık Eğrileri

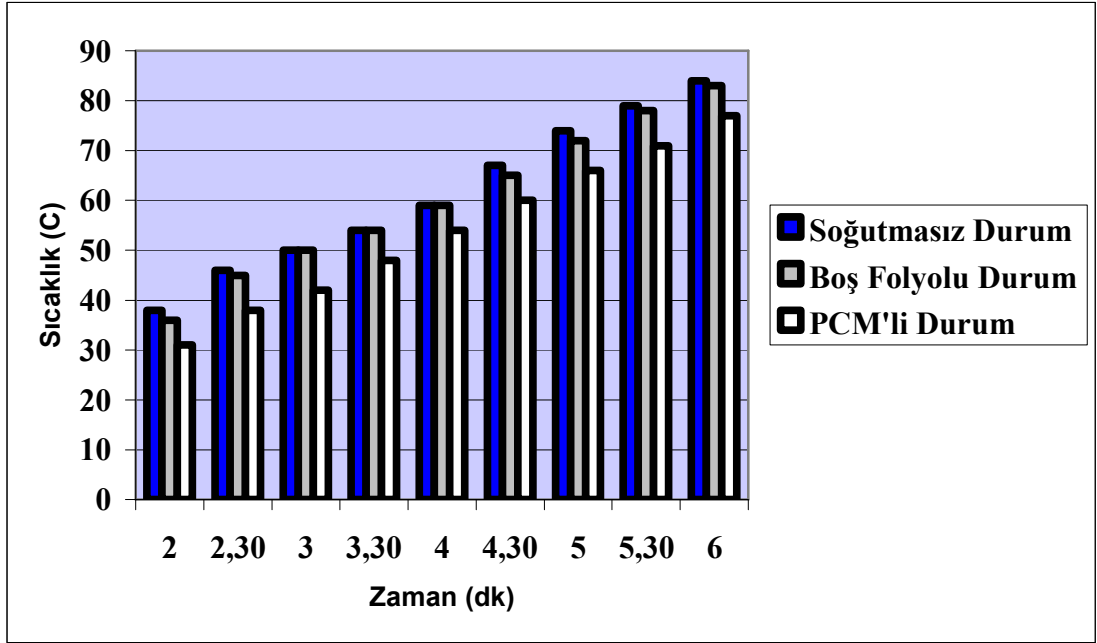
Model transformatörün belirlenen sıcaklık noktalarından alınan ve bir önceki bölümde tablolara kaydedilen sıcaklık değerleri aşağıdaki şekillerde soğutma yapılmadan, boş alüminyum folyolu durum ve PCM eklendikten sonraki durum olmak üzere aynı şekil üzerinde her nokta için ayrı olmak üzere gösterilmiştir.



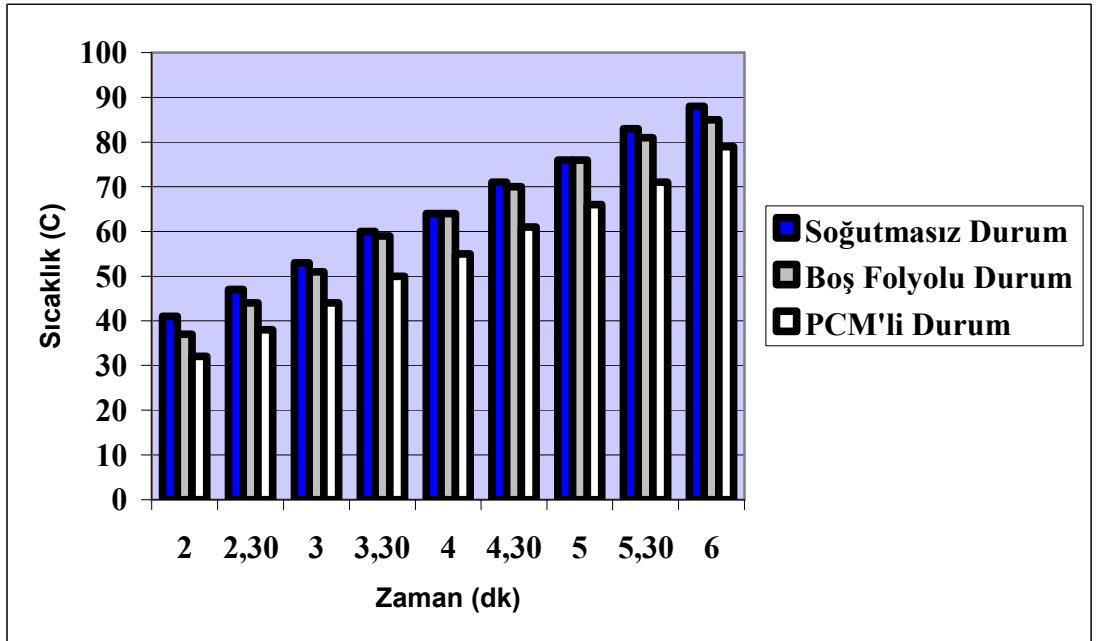
Şekil IV.9 Model Transformatörün 1 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



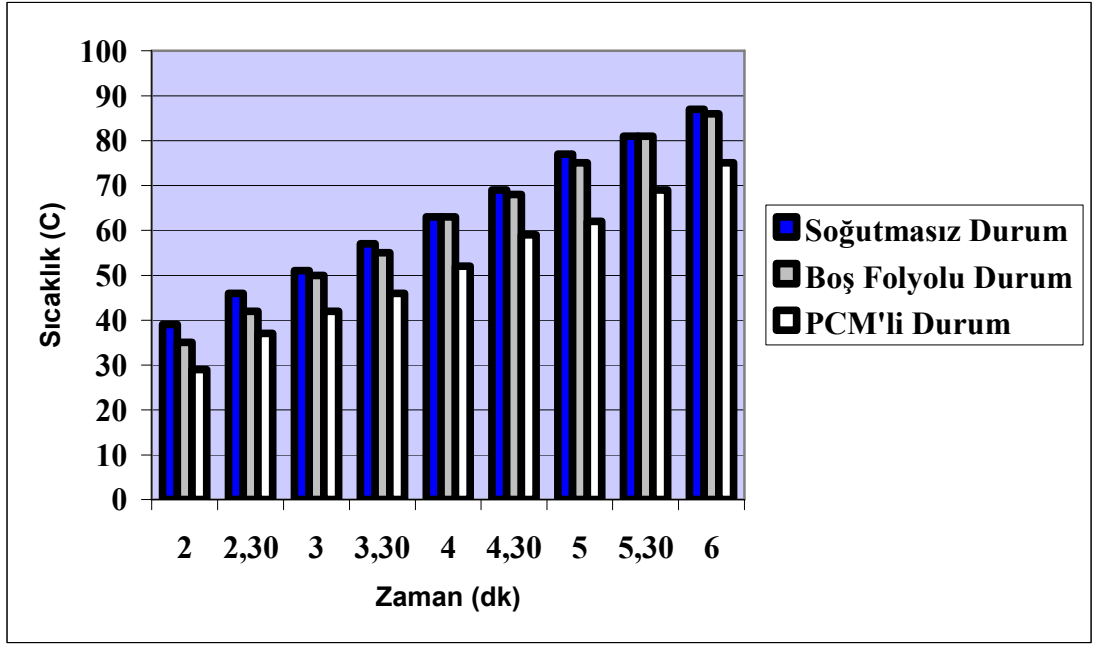
Şekil IV.10 Model Transformatörün 2 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



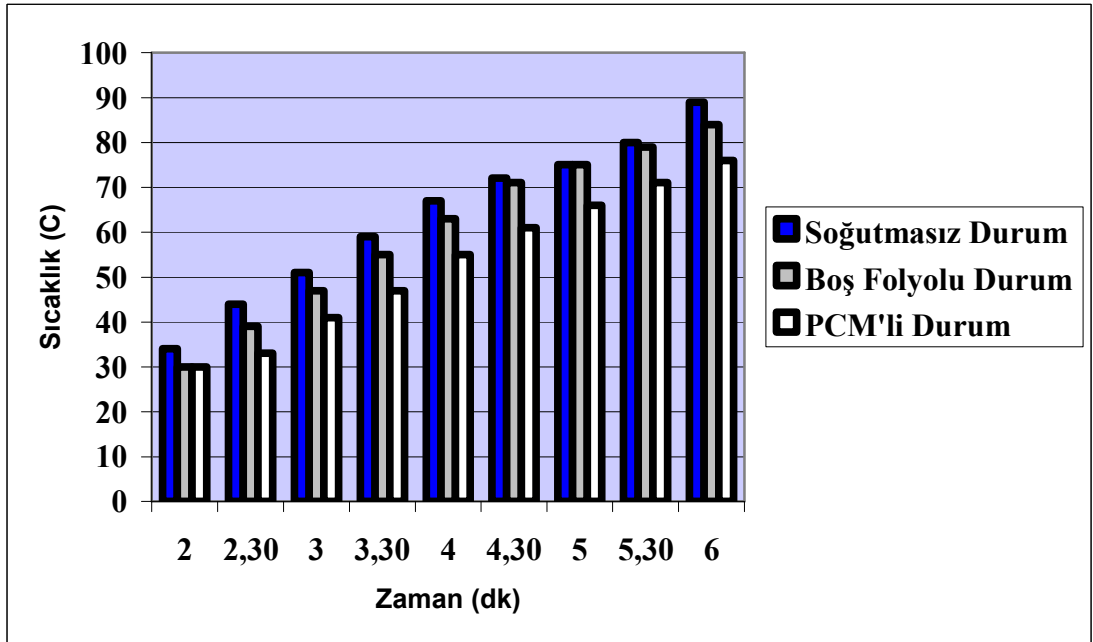
Şekil IV.11 Model Transformatorün 3 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



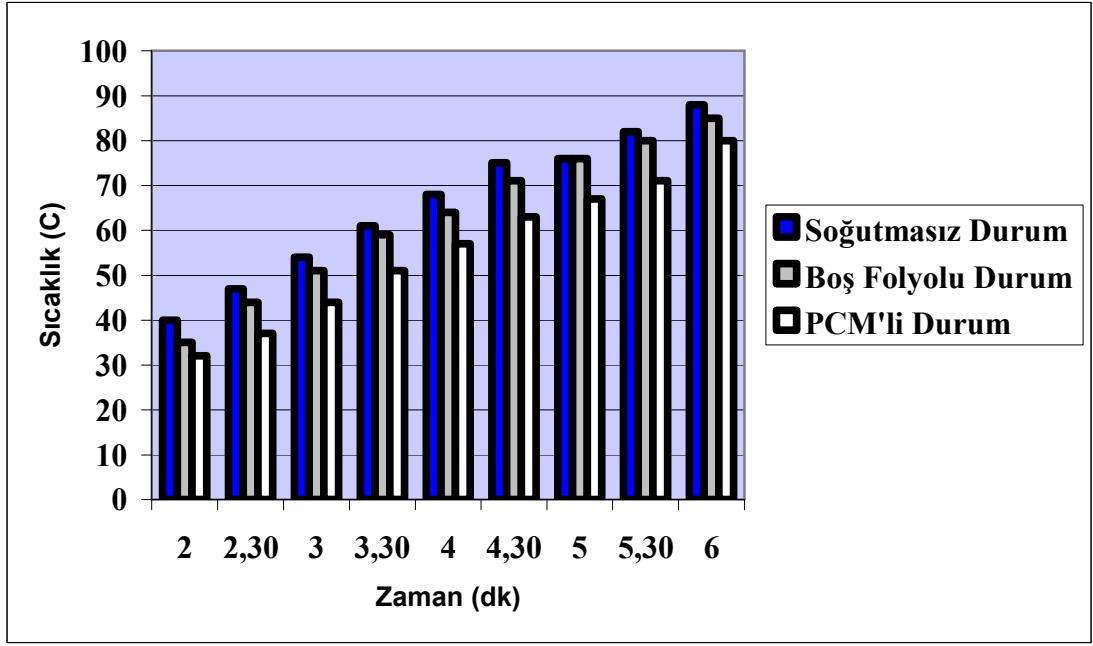
Şekil IV.12 Model Transformatorün 4 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



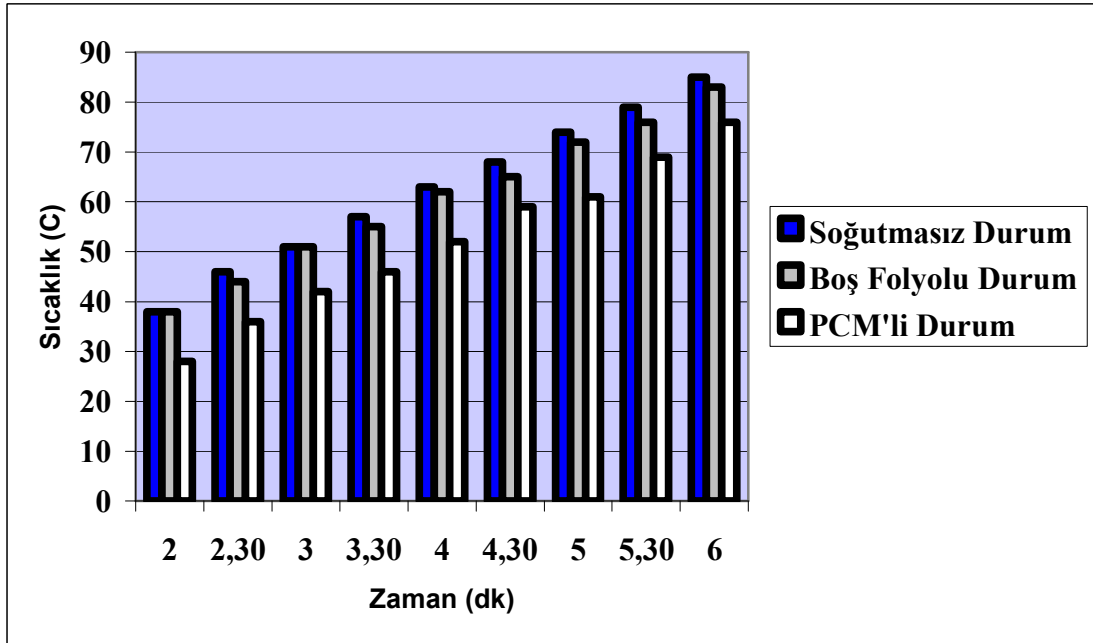
Şekil IV.13 Model Transformatorün 5 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



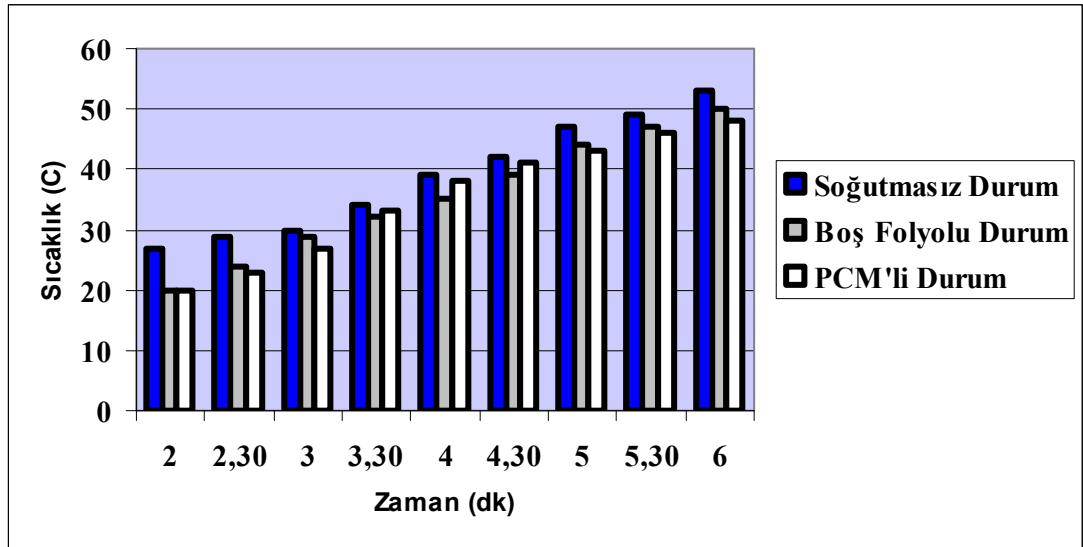
Şekil IV.14 Model Transformatorün 6 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



Şekil IV.15 Model Transformatorün 7 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



Şekil IV.16 Model Transformatorün 8 Numaralı Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi



Şekil IV.17 Model Transformatörün Dış Gövde Sıcaklık Noktasından Alınan Değerlerin 3 Farklı Durum İçin Gösterilişi

BÖLÜM V.

SONUÇLAR

Bu deneylerin yapılmasının amacı transformatörlerin soğutulmasına faz değiştiren malzeme kullanarak değişik bir alternatif sunmaktır. Aynı zamanda yapılan literatür çalışması neticesinde, faz değiştiren malzemenin soğutma ve ısıtma amaçlı kullanılması ile ilgili çalışmaların gün geçtikçe hızla arttığı fakat faz değiştiren malzemelerin transformatörlerin soğutulma çalışmalarında hiç kullanılmadığı sonucuna da varılmıştır.

Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucundaki deneyler, model transformatörün soğutmasız olarak muhtelif ısınan noktalarının belirlenmesi değerleri, PCM' li ve PCM' siz boş alüminyum folyo durumları için sıcaklık değerleri alınarak kıyaslanmış ve PCM' in model olarak alınan transformatörde şu sonuçlar ortaya konulmuştur.

1. Transformatörün PCM' siz şekilde ölçülen kısımlarından alınan sıcaklık değerleri transformatörün muhtelif ısınma gösteren alanları belirlenerek alınmıştır. Bu sıcaklık değerleri belirlenirken model transformatör yaklaşık olarak 8 kVA sabit yük ile yüklenmiştir. Bu noktalardan alına sıcaklık değerlerine göre transformatörün sargı sıcaklığı 7 ve 8. noktalarda 5 – 5.30 dk zaman diliminde 74 – 82 °C, sargı ile dış gövde aralığında 5 ve 6. noktalarda 4 – 4.30 dk zaman diliminse 69 – 77 °C olarak kaydedilmiştir.

Aynı noktalara, aynı zaman diliminde faz değiştiren malzeme alüminyum folyo içine sarılmış şekilde soğutma amaçlı olarak enjekte edildiğinde ise 5. ve 6. noktaların sıcaklık değerleri 52 – 55 °C, 7. ve 8. noktaların sıcaklık değeri ise 71 – 69 °C olarak azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuca göre faz deęiřtiren malzemenin aynı zaman diliminde sıcaklık deęerini model transformatörde dūřurdūęu görülmektedir.

3. Faz dönüştürerek gizli ısı depolayan kimyasal maddelerin, transformatör soğutmalarında deneysel olarak kullanılmasında çok iyi sonuçlar alınmış olmasına rağmen, kombine olarak kullanılmasında kimyasal malzemenin kısa sürede işlevselliğini yitirmeye neden olacağından sistem ekonomikliğini yitirebilmektedir.

4. Ekonomi devri olan 21. yüzyılda gelişen teknoloji sayesinde uzun çevrimler sonucunda özelliklerini kaybetmeyen ve yeterince ekonomik olan yeni kimyasal maddeler bulunmasıyla veya mevcut kimyasal maddelerin, istenilen kriterleri karşılayacak şekilde geliştirilmesiyle, transformatörlerin kombine soğutma sistemlerine alternatif bir yaklaşım olarak faz değiştiren malzemelerin kullanılması daha cazip ve verimli olarak kullanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Mergen, F., Zorlu, S., “Elektrik Makinaları – I Transformatörler”, Birsen Yayınevi, (2005)
- [2] Peşint, A., Ürkmez, A., “Elektrik Makinaları – Transformatörler” Milli Eğitim Basımevi, İstanbul (1992)
- [3] www.gyte.edu.tr (Erişim tarihi: Mart 2006)
- [4] Boduroğlu, T., “Elektrik Makinaları Dersleri – Transformatörler”, Cilt I, Beta Basım Yayın Dağıtım, İstanbul, (1988)
- [5] Özgirgin, M.U. “Amorf Malzemeli Güç Transformatörlerinde Çekirdek Yapılarının Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, (2003)
- [6] Kennedy, B.W., "Energy Efficient Transformers", McGraw-Hill, (1998)
- [7] Büyükbıçakcı, E.; Binark, A.K.; Temiz, İ; Erdal, H.,: “Transformatör Soğutmalarında Isı Depolayan Kimyasal Malzeme Uygulaması”, I.Uluslararası Teknik Eğitim Sempozyumu Marmara Üniv. TEF İstanbul,Türkiye, (2005)
- [8] KBA Şebek İşletme Grup Müdürlüğü Sakarya Bölgesi Test Grup Baş Müh. Kütüphanesi, “Transformatör Soğutma Sistemleri”, 2002
- [9] Sünnetçioğlu, N., : “Transformatörlerin Soğutulması”, Elektrik Mühendisliği Dergisi, Sayı 95, (1983)
- [10] Gürdal, O., “Elektrik Makinelerinin Tasarımı”, Atlas Yayınları, İstanbul, (2001)
- [11] Bhag, S., Hızıroğlu, H.,R., “Electric Machinery and Transformersc, Sounders College Publishing, London, (1988)
- [12] Flanagan, William, M., “Handbook of Transformer Desingn and Applications“, McGraw Hill, USA, (1992)

- [13] Bal, G., “Özel Elektrik Makineleri”, Gazi Üniversitesi – TEF Yayınları, Ankara, (1997)
- [14] Sarı, A.: “Bazı Yağ Asitleri ve Ötektik Karışımlarının Enerji Depolayıcı Madde Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, G.O.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, (2000)
- [15] Uslu, M., Binark, A.,K. : “Isı Depolama Tekniğinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemeler ve Özellikleri”, II.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (1999)
- [16] Sarı, A.,Tahran, S., Kaygusuz, K. , : “Enerjiyi Düşük Sıcaklıkta Gizli Isı Olarak Depolayan Kimyasal Maddeler”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu, Kayseri, (2005)
- [17] Mazman, M.: “Güneş Enerjisinin Faz Değiştiren Organik Kimyasallarda Gizli Isı Şeklinde Depolanması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, (2000)
- [18] Akarsu, F.: “Faz Değiştiren Malzemeler Kullanılarak Güneş Enerjisinin Depolanması”, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, (2002)
- [19] Furbo, S.,: “Heat Storage With an Incoungruently Melting Salt Hydrate as Storage Medium Based on the Exstra Water Principle“, Thermal Of Solar Energy, Proceedings of an International TNO Symposium, Amsterdam, (1980)
- [20] Güngör, A.: “Güneş Enerjisinin Depolanması“, Güneş Enerjisi Enstitüsü Dergisi, Sayı 1, Cilt 2, (1993)
- [21] Mullick, S.C., Bhargava, A.K.,,: “Solar Termal Energy Storage“, D.Reidel Publishing Company, Holland, (1985)
- [22] Öztürk, H.: “Sera Isıtma İçin Güneş Enerjisinin Faz Değiştiren Materyalde (PCM) Depolaması Üzerine Bir Araştırma”, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, (1997)
- [23] Manz, H., Egof, P.W., Sutter, P.,: “TIM – PCM External Wall System For Solar Space Heating And Daylighting“, Solar Energy, (1997)

- [24] Fischer, S., Hauer, A., Schreiner, M., Zavala, G.,: “A Heat Storage System With Zeolite For Space Heating In A School Building“, Proc.Megastock 97 Conf., (1997)
- [25] <http://www.artech.se/clim/> (Erişim tarihi: Mart 2005)
- [26] Bellettre, J., Sartre, V., Biais, F., Jallemand, A., “Transient State Study of Elektrik Motor Heating and Phase Change Solid – Liquid Cooling” Pergamon, France (1997)

EKLER

Isı Depolama Tekniğinde Kullanılan PCM'ler ve Özellikleri

	Parafin Wax $-(CH_2)_N-CH_3-(CH_2)_N-CH_3$	Polyethylene Glycols (Polyethylene Oxide) $HO(C_2H_4O)_8C_2H_4OH$	Polyethylene Glycols (Polyethylene Oxide) $HO(C_2H_4O)_{12}C_2H_4OH$	Cross – Linked Polyethylene $CH_2=CH_2$ $(-CH_2-CH_2-)_N$	Calcium Chloride Hexahydrate, Modified $Ca C_{12} 6 H_2O$
Erime noktası	43 – 56 °C 316 – 329 K 109 – 133 °F	7 °C 280 K 45 °F	23 °C 298 K 73 °F	129-134 °C 402-407 K 264-273 °F	29.6 °C 302.8 K 85.3 °F
Füzyon ısısı	63.5 cal/g °C 266 kJ/kg K 114 BTU/lb	23.8 cal/g 99.6 kJ/kg 42.8 BTU/lb	30.4 cal/g 127.3 kJ/kg 54.7 BTU/lb	40-48 cal/g 167-201 kJ/kg 72-86 BTU/lb	45.6 cal/g 190.8 kJ/kg 82.1 BTU/lb
Özgül Isı (sıvı)	0.600 cal/g °C 2.51 kJ/kg K 0.600 BTU/lb °F	25 °C 0.498 cal/g °C 2.08 kJ/kg K 0.498 BTU/lb °F	0.49 cal/g °C 2.05 kJ/kg K 0.49 BTU/lb °F		48 °C (118 °F) 0.502 cal/g °C 2.10 kJ/kg K 0.502 BTU/lb °F
Özgül ısı (katı)	25 °C 0.600 g/cal °C 2.95 kJ/kg K 0.705 BTU/lb °F			96 °C 0.62 cal/g °C 2.6 kJ/kg K 0.62 BTU/lb °F	16 °C (61 °F) 0.340 cal/g °C 1.42 kJ/kg K 0.340 BTU/lb °F
Yoğunluk (sıvı)	0.760 g/cm ³ 0.760*10 ³ kg/m ³ 47.4 lb/ft ³	25 °C 1.122 g/cm ³ 1.122*10 ³ kg/m ³ 70.0 lb/ft ³	25 °C 1.123 g/cm ³ 1.123*10 ³ kg/m ³ 70.1 lb/ft ³		32 °C (90 °F) 1.562 g/cm ³ 1.562*10 ³ kg/m ³ 97.5 lb/ft ³
Yoğunluk(katı)	25 °C 0.818 g/cm ³ 0.818*10 ³ kg/m ³ 51.5 lb/ft ³			0.950-0.965 g/cm ³ 0.950-0965*10 ³ kg/m ³ 59.60 lb/ft ³	24 °C (75 °F) 1.802 g/cm ³ 1.802*10 ³ kg/m ³ 112.5 lb/ft ³
Isı iletim katsayısı (sıvı)	0.57* 10 ³ cal/cm sec °C 0.24 w/m K 0.14 BTU/hr ft °C			150 °C 0.57* 10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.24 w/m K 0.140 BTU/hr ft °C	39 °C (102 °F) 0.29* 10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.540 w/m K 0.312 BTU/hr ft °C
Isı iletim katsayısı (katı)	25 °C 0.57* 10 ³ cal/cm sec °C 0.24 w/m K 0.14 BTU/hr ft °C			125 °C 0.58* 10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.25 w/m K 0.143 BTU/hr ft °C	23 °C (73 °F) 2.60* 10 ⁻³ cal/cm sec °C 1.088 w/m K 0.629 BTU/hr ft °C
Viskozite	1.9 cps 1.9 kg/m/sec 76 lb/ft/hr	38 °C 55cps 0.055 kg/m/sec 133 lb/ft/hr	38 °C 81cps 0.081 kg/m/sec 196 lb/ft/hr		50 °C 11. 80cps 0.0118 kg/m/sec 28.6 lb/ft/hr

Molekül ağırlığı (ortalama)	332 g/mol 332 g/mol 0.73 lb/mol	400 g/mol 400 g/mol 0.880 lb/mol	600 g/mol 600 g/mol 1.32 lb/mol	10.000-20.000g/mol	219.0784 g/mol 219.0784 g/mol 0.4829852 lb/mol
Solüsyon ısısı					17.2 cal/g 72.0 kj/kg 31.0 BTU/lb
Oluşum ısısı					25 °C _623.0 kcal/mol _2.6079 MJ/mol _2472 BTU/mol
Yüzey gerilimi					25 °C 103 dyn/cm 0.103 kg/sec ² 7.02*10 ³ lb/ft
% TΩ					50.66 Wt %
% Su					49.34 Wt %
Ekonomi	0.55 US \$ / kg İn USA	17.02 US \$ / kg İn TURKEY	17.02 US \$ / kg İn TURKEY	17.02 US \$ / kg İn TURKEY	1.73 US \$ / kg İn TURKEY

Calcium Chloride Hexahydrate, (Commercial) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Calcium Bromide Hexahydrate, $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Magnesium Nitrate Hexahydrate $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Lithium Nitrate Trihydrate $\text{LiNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Potassium Fluoride Tetrahydrate $\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Ammonium Alum $\text{N H}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
27 °C 300 K 81 °F	34.3 °C 307.5 K 93.7 °F	89.9 °C 363 K 194 °F	29.9 °C 303.1 K 85.8 °F	18.5 °C 301.7 K 65.3 °F	93.95 °C 367.13 K 201.1 °F
46 cal/g 192 kj/kg K 82 BTU/lb	27.6 cal/g 115.5 kj/kg K 49.7 BTU/lb	38.9 cal/g 162.8 kj/kg K 70.0 BTU/lb	70.7 cal/g 296.0 kj/kg K 127.3 BTU/lb	55.2 cal/g 231.0 kj/kg K 99.3 BTU/lb	64.3 cal/g 269 kj/kg K 116 BTU/lb
3 cal/ g °C 2.2 kj/kg K 0.53 BTU/lb °F		98 °C (208°F) 0.592 cal/g °C 2.48 kj/kg K 0.592 BTU/lb °F		18.5 °C (65.3 °F) 0.571 cal/g °C 2.39 kj/kg K 0.571 BTU/lb °F	95.9 °C (118 °F) 0.728 cal/g °C 3.05 kj/kg K 0.728 BTU/lb °F
0.34 cal/ g °C 1.4 kj/kg K 0.34 BTU/lb °F		81 °C (178°F) 0.433 cal/g °C 1.81 kj/kg K 0.433 BTU/lb °F		18.5 °C (65.3°F) 0.440 cal/g °C 1.84 kj/kg K 0.440 BTU/lb °F	82.3 °C (150.1°F) 0.408 cal/g °C 1.706 kj/kg K 0.406 BTU/lb °F
40 °C (104°F) 1.53 g/cm ³ 1.53*10 ³ kg/m ³ 95.5 lb/ft ³	35 °C (95°F) 1.956 g/cm ³ 1.956*10 ³ kg/m ³ 122.1 lb/ft ³	94 °C (201°F) 1.55 g/cm ³ 1.55*10 ³ kg/m ³ 96.8 lb/ft ³		20.0 °C (68.0°F) 1.455 g/cm ³ 1.455*10 ³ kg/m ³ 90.8 lb/ft ³	
25 °C (77°F) 1.71 g/cm ³ 1.71*10 ³ kg/m ³ 106.8 lb/ft ³	24 °C (75°F) 2.194 g/cm ³ 2.194*10 ³ kg/m ³ 137.0 lb/ft ³	25 °C (77°F) 1.636 g/cm ³ 1.636*10 ³ kg/m ³ 102.1 lb/ft ³		18.5 °C (77°F) 1.447 g/cm ³ 1.447*10 ³ kg/m ³ 90.3 lb/ft ³	1.65 g/cm ³ 1.65*10 ³ kg/m ³ 103 lb/ft ³
39 °C (102 °F) 1.3*10 ³ cal/cm sec°C 0.54 W/ m K 0.31 BTU/hr ft °C		95 °C (102 °F) 1.17*10 ³ cal/cm sec°C 0.490 W/ m K 0.283 BTU/hr ft °C			
23 °C (73 °F) 2.6*10 ³ cal/cm sec°C 1.09 W/ m K 0.63 BTU/hr ft °C		56 °C (132 °F) 1.60*10 ³ cal/cm sec°C 0.669 W/ m K 0.387 BTU/hr ft °C			
50 °C 11.80cps 0.0118 kg/ m/ sec 28.6 lb/ ft/ hr					
219.0784 g / mol 219.0784 g / mol 0.4829852 lb / mol	307.9904 g / mol 307.9904 g / mol 0.6790026 lb / mol	256.4142 g / mol 256.4142 g / mol 0.5652965 lb / mol	122.9921 g / mol 122.9921 g / mol 0.2711512 lb / mol	130.2 g / mol 130.2 g / mol 0.287 lb / mol	453.3282 g / mol 453.3282 g / mol 0.9994175 lb / mol
17.2 cal/ g 72.0 kj/ kg 31.0 BTU/ lb			0.24 cal/ g 1.02 kj/ kg 0.43 BTU/ lb		
25 °C _623.0 kcal/ mol _2.6079 MJ/ mol _2472 BTU/ mol	25 °C _598.7 kcal/ mol _2.506 MJ/ mol _2376 BTU/ mol	25 °C _624.3 kcal/ mol _2.613 MJ/ mol _2477 BTU/ mol	25 °C _328.3 kcal/ mol _1.374 MJ/ mol _1303 BTU/ mol		25 °C _1420.38 kcal/ mol _5.9424 MJ/ mol _5836.8 BTU/ mol
25 °C 103 dyn/cm 0.104 kg/sec ² 7.02*10 ³ lb / ft					
48 Wt %	64.90 Wt %	57.84 Wt %	58.05 Wt %	44.64 Wt %	47.69 Wt %

47 Wt %	35.10 Wt %	41.16 Wt %	43.95 Wt %	55.36 Wt %	52.31 Wt %
1.73 US \$ / kg TÜRKİYE	0.77 US \$ / kg ABD	17.58 US \$ / kg TÜRKİYE	TÜRKİYE 24.84 US \$ / kg 87.78 US \$ / kg	49.85 US \$ / kg TÜRKİYE	36.84 US \$ / kg TÜRKİYE
Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yetersiz
Yetersiz	Yetersiz	Yetersiz		Yetersiz	Yetersiz
Konulabilir	Korozif	Korozif	Konulabilir	Konulabilir	Konulabilir
Emniyetli	Toksik	Emniyetli	Toksik	Toksik	Emniyetli
133 °C 406 K 270 °F	9 °C 422 K 300 °F	138 °C 411 K 280 °F	117 °C 390 K 213 °F	108 °C 381 K 196 °F	120 °C 390 K 250 °F
30 °C 7 mm Hg 933 pa 0.14 lb/ in ²					
Kararlı	Kararlı	Kararlı			

Magnesium Chloride Hexahydrate Mg Cl ₂ . 6H ₂ O	Calcium Chloride/ Bromide Hexahydrate, Ca Cl ₂ . 6 H ₂ O / Ca Br ₂ . 6 H ₂ O	Magnesium Chloride/ Nitrate Hexahydrate Mg Cl ₂ . 6H ₂ O / Mg(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	Sodium Thiosulfate Pentahydrate Na ₂ S ₂ O ₃ . 5H ₂ O Hypo	Sodium Carbonate Decahydrate Na ₂ CO ₃ . 10 H ₂ O	Disodium Phosphate Dodecahydrate Na ₂ HPO ₄ . 12 H ₂ O
116.7 °C 389.9 K 242.1 °F	14.7 °C 287.9 K 58.5 °F	58 °C 331 K 136 °F	48.45-55.2 °C 321.63-328.4 K 119.21-101.4 °F	33 °C(peritectic point) 306 K 91 °F	35.2 °C 306.4-317.6 K 95.4-112.3 °F
40.3 cal/ g 168.6 kj/ kg 72.5 BTU/ lb	34 cal/ g 140 kj/ kg 61 BTU/ lb	31.6 cal/ g 132.2 kj/ kg 56.9 BTU/ lb			
120 °C (248 °F) 0.624 cal/ g °C 2.61 kj/ kg K 0.624 BTU/lb °F		72 °C (162 °F) 0.580 cal/ g °C 2.43 kj/ kg K 0.580 BTU/lb °F	85.4 °C 0.576 cal/ g °C 2.411 kj/ kg K 0.576 BTU/lb °F		0.47 cal/ g °C 1.95 kj/ kg K 0.47 BTU/lb °F
100 °C (212 °F) 0.537 cal/ g °C 2.25 kj/ kg K 0.537 BTU/lb °F		37 °C (99 °F) 0.465 cal/ g °C 1.946 kj/ kg K 0.465 BTU/lb °F	42.3 °C 0.355 cal/ g °C 1.484 kj/ kg K 0.355 BTU/lb °F		0.41 cal/ g °C 1.70 kj/ kg K 0.41 BTU/lb °F
120 °C (248 °F) 1.45 g/ cm ³ 1.45*10 ³ kg/ m ³ 90.5 lb/ ft ³	24 °C (75 °F) 1.78 g/ cm ³ 1.78*10 ³ kg/ m ³ 111 lb/ ft ³	69 °C (158 °F) 1.52 g/ cm ³ 1.52*10 ³ kg/ m ³ 95 lb/ ft ³	1.67 g/ cm ³ 1.67*10 ³ kg/ m ³ 104 lb/ ft ³		1.442 g/ cm ³ 1.442*10 ³ kg/ m ³ 90.0 lb/ ft ³
20 °C (68 °F) 1.57 g/ cm ³ 1.57*10 ³ kg/ m ³ 98.0 lb/ ft ³	14 °C (57 °F) 1.94 g/ cm ³ 1.64*10 ³ kg/ m ³ 121 lb/ ft ³	24 °C (68 °F) 1.63 g/ cm ³ 1.63*10 ³ kg/ m ³ 102 lb/ ft ³	25 °C 1.750 g/ cm ³ 1.750*10 ³ kg/ m ³ 109.3 lb/ ft ³	1.460 g/ cm ³ 1.460*10 ³ kg/ m ³ 91.1 lb/ ft ³	1.52 g/ cm ³ 1.52*10 ³ kg/ m ³ 95.0 lb/ ft ³
120 °C (248 °F) 1.36*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.570 w/ m K		65 °C (149 °F) 1.22*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.510 w/ m K 0.295 BTU/ hr ft °C			1.137*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.476 w/ m K 0.275 BTU/ hr ft °C

0.329 BTU/ hr ft °C					
110 °C (230 °F) 1.68*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.704 w/ m K 0.400 BTU/ hr ft °C		53 °C (127 °F) 1.62*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.678 w/ m K 0.392 BTU/ hr ft °C			1.228*10 ⁻³ cal/cm sec °C 0.514 w/ m K 0.297 BTU/ hr ft °C
203.3104 g/ mol 203.3104 g/ mol 0.4482227 lb/ mol			248.1828 g/ mol 248.1828 g/ mol 0.5471494 lb/ mol	286.1430 g/ mol 286.1430 g/ mol 0.6308373 lb/ mol	358.1438 g/ mol 358.1438 g/ mol 0.7895719 lb/ mol
304 cal/ g 1273 kj/ kg 548 BTU/ lb			25 °C 44.7 cal/ g 187 kj/ kg 80.4 BTU/ lb		
25 °C _597.0 kcal/ mol _2.449 MJ/ mol _2369 BTU/ mol			25 °C _623.0 kcal/ mol _2.608 MJ/ mol _2472 BTU/ mol	25 °C _975.0 kcal/ mol _4.081 MJ/ mol _3869 BTU/ mol	25 °C _1265.6 kcal/ mol _5.298 MJ/ mol _5023 BTU/ mol
46.8 Wt %	59.9 Wt %	53.30 Wt %	63.71 Wt %	37.04 Wt %	39.64 Wt %
53.2 Wt %	40.1 Wt %	46.70 Wt %	36.29 Wt %	62.96 Wt %	60.36 Wt %
			48.0 cal/ g 201 kj/ kg 86.4 BTU/ lb	59 cal/ g 247 kj/ kg 106 BTU/ lb	66.8 cal/ g 279.6 kj/ kg 120.2 BTU/ lb
11.52 US \$ / kg TÜRKİYE	2.00 US \$ / kg TÜRKİYE	11.52 US \$ / kg TÜRKİYE	1.97 US \$ / kg TÜRKİYE	21.50 US \$ / kg TÜRKİYE	5.90 US \$ / kg TÜRKİYE
Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli
Yetersiz	Yetersiz	Yetersiz	Yetersiz	Yeterli	Yetersiz
Konulabilir	Konulabilir	Konulabilir	Konulabilir	Konulabilir	Konulabilir
Emniyetli	Emniyetli	Emniyetli	Tehlikeli	Yehlikeli	Emniyetli
163 °C 436 K 325 °F		138 °C 411 K 280 °F		132 °C 405 K 270 °F	
Kararlı	Kararlı	Kararlı	Kararsız	Kararlı	Kararsız

ÖZGEÇMİŞ

30.05.1980 yılında Kastamonu da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı yerde tamamladıktan sonra 1998 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 2002 yılında M.Ü. Rektör Yardımcısı ve Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi ABD Başk. Prof.Dr.İrfan GÜNEY Danışmanlığında hazırladığı bitirme projesi ile aynı bölümden iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl M.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine girdi. Ders aşamasını başarı ile tamamlayarak 2003 yılında Yrd.Doç.Dr.İsmail TEMİZ ve Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL danışmanlığında Yüksek Lisans tez çalışmasına başladı. 13.08.2004 tarihinde Sakarya Üniversitesi Karasu Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojisi ve Programlama Programına Öğretim Görevlisi olarak atandı. Şubat 2005 tarihinden bu yana aynı birimde Müdür Yardımcılığı ve Öğrenci İşleri Koordinatörlüğünü yürütmektedir.

Erdal BÜYÜKBİÇAKCI