

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**REZİSTANSLA ISITILAN TERMOFORM KALIP KURUTMA  
SİSTEMLERİNİN KARARLI HAL KOŞULLARINDA ISI  
DAĞILIMI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DURMUŞ ÇAKAR**

**DENİZLİ, ŞUBAT - 2021**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**REZİSTANSLA ISITILAN TERMOFORM KALIP KURUTMA  
SİSTEMLERİNİN KARARLI HAL KOŞULLARINDA ISI  
DAĞILIMI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DURMUŞ ÇAKAR**

**DENİZLİ, ŞUBAT - 2021**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**DURMUŞ ÇAKAR**

## ÖZET

**REZİSTANSLA ISITILAN TERMOFORM KALIP KURUTMA  
SİSTEMLERİNİN KARARLI HAL KOŞULLARINDA ISI DAĞILIMI  
ANALİZİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
DURMUŞ ÇAKAR  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ  
(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ EYLEM YILMAZ ULU)**

**DENİZLİ, ŞUBAT - 2021**

Bu çalışmada, termoform kalıpta kurutma sistemi test düzeneği imalatı yapılmış ve montajı gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak meydana gelen ısı dağılımı ve değişimi kararlı durum (steady state) için deneysel olarak incelenmiştir. Datalogger ile hassas olarak sıcaklık verisi izlenmiş ve kaydı gerçekleştirilmiştir. Sistemin ısı denge hali ve farklı noktalardaki ısı değişimleri gözlemlenmiştir. Isıtma tablasına yerleştirilen termokupl verileri incelendiğinde tablanın orta bölgesi ve kenar bölgesi arasında 10°C'lik sıcaklık farkının olduğu ve sıcaklık dağılımının homojen olmadığı tespit edilmiştir. Bu farkın üründe nemli bölgelerin oluşmasına sebep olabileceği tespit edilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak kullanılan izolasyon plakasının kalınlığının optimize edilmesi ve sistemin tükettiği enerjiye etkisi ortaya konmuştur. Test düzeneğinde kullanılan fişek tipi rezistans için ihtiyaç duyulan güç belirlenmiştir. Bir bilgisayar programında kararlı hal durumunun simülasyonu elde edilen deneysel veriler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Isıtma tablası için farklı malzemeler önerilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Homojen Isı Dağılımı, Kararlı Hal, Kalıpta Kurutma Sistemi

## **ABSTRACT**

### **HEAT DISTRIBUTION ANALYSIS UNDER STEADY STATE CONDITIONS OF THERMOFORM MOLD DRYING SYSTEMS HEATED WITH RESISTANCE**

**MSC THESIS  
DURMUS CAKAR  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
AUTOMOTIVE ENGINEERING  
(SUPERVISOR:ASTS. PROF. EYLEM YILMAZ ULU)**

**DENİZLİ, FEBRUARY 2021**

In this study, a thermoform mold drying system test mechanism was manufactured and assembled. Heat distribution and change occurring depending on time has been experimentally investigated for steady state. Temperature data were precisely monitored and recorded with the datalogger. The thermal equilibrium state of the system and temperature changes at different points were observed. When the thermocouple data placed on the heating table were examined, it was determined that there was a temperature difference of 10°C between the middle zone of the table and the edge zone and it was not homogeneous. It has been determined that this difference may cause humid areas in the product. Optimization of the thickness of the insulation plate used as an insulation material and its effect on the energy consumed by the system have been revealed. The power needed for the cartridge type resistor used in the test setup was determined. In a computer program, the simulation of the steady state condition was carried out through the experimental data obtained. Different materials have been proposed for the heating plate.

**KEYWORDS:**Homogeneous Heat Distribution, Steady State, Mold Drying System

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı .....	2
1.2 Literatür Özeti .....	3
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>8</b>
2.1 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Metodu.....	8
2.1.1 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	8
2.1.2 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünlerinin Tarihsel Gelişimi ve Uygulama Örnekleri.....	9
2.1.3 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Prosesi.....	11
2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	14
2.2.1 ANSYS ile Analiz.....	14
2.2.2 Termal Analiz Türleri .....	15
2.2.2.1 Kararlı Hal (Steady State) Termal Analizi.....	15
2.2.2.2 Geçici Termal Analiz (Zamana Bağlı Analiz) .....	18
<b>3. DENEYSEL SİSTEM VE YÖNTEM</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Tasarımı.....	19
3.1.2 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi İmalatı.....	20
3.1.2.1 Ana Gövde (Şasi) .....	20
3.1.2.2 İzolasyon Plakası.....	21
3.1.2.3 Kalıp Isıtma Tablası .....	22
3.1.2.3.1 Malzeme Seçim Kriterleri.....	23
3.1.2.3.2 Kalıp Isıtma Tablası Malzemesi .....	25
3.1.2.3.3 Kalıp Isıtma Tablası İçin Malzeme Önerileri .....	26
3.1.2.4 Kalıp Isıtma Yöntemi.....	29
3.1.2.4.1 Gerekli Isının Hesaplanması.....	36
3.1.2.5 Test Kalıbı Modeli .....	37
3.1.2.6 Sıcaklık Kontrol Ünitesi.....	38
3.1.2.7 Elektrik Sayacı .....	40
3.1.2.8 Veri İzleme ve Kayıt ( Datalogger).....	40
3.1.3 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Montajı .....	42
3.2 Deneysel Analiz .....	43
3.2.1 Termokupl Kalibrasyonu .....	43
3.2.2 Sıcaklık Ölçümleri .....	45
3.2.2.1 Deneysel Veriler.....	46
3.3 Simülasyon Analizi .....	64
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>73</b>
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>75</b>

<b>6. EKLER.....</b>	<b>79</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>80</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Termoform Kağıt Hamuru Kalıplama Makinası Üretim Prosesi.....	9
Şekil 2.2: İlk Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Makinesi.....	10
Şekil 2.3: Kalıplanmış Selozik Bazlı Kağıt Hamuru Ürünü Kullanılan 3 Ana Market .....	11
Şekil 2.4: Geri Dönüşüm Hammaddesi.....	12
Şekil 2.5: Telli Form Verme Kalıbı.....	12
Şekil 2.6: Presleme kalıbı.....	13
Şekil 2.7: Trimleme Safhası.....	13
Şekil 2.8: Son Ürün ve Kalite Kontrolü .....	14
Şekil 3.1: Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Tasarımı.....	19
Şekil 3.2: Ana Gövde (Şasi).....	20
Şekil 3.3: İzolasyon plakası.....	21
Şekil 3.4: Kalıp Isıtma Tablası Tasarım Görseli.....	22
Şekil 3.5: Kalıp Isıtma Tablasının CNC Tezgahta İşlem Görme Anı.....	22
Şekil 3.6: Isıtma ve Soğutma Kanallı Kalıp.....	30
Şekil 3.7: Seramik Isıtıcı Kalıp.....	31
Şekil 3.8: Gözenekli Brülörlü Kalıp.....	32
Şekil 3.9: Dış İndüktörlü Kalıp.....	33
Şekil 3.10: Fişek Tipi Rezistanslı Kalıp.....	34
Şekil 3.11: Fişek Tipi Rezistans.....	35
Şekil 3.12: Isıtma Tablası Görseli.....	36
Şekil 3.13: Test Kalıbı Modeli Tasarımı ve Gerçek Görseli.....	38
Şekil 3.14: Sıcaklık Kontrol Ünitesi Panosunun İçi.....	39
Şekil 3.15: DT104 AX Auto-Tune PID Sıcaklık Kontrol Cihazı.....	39
Şekil 3.16: Elektrik Sayacı.....	40
Şekil 3.17: CEM DT-3891G Sıcaklık Kayıt Cihazı (Datalogger).....	41
Şekil 3.18: Datalogger Cihazının Yaptığı Kayıttan Grafikselsel Bir Örnek.....	41
Şekil 3.19: Datalogger Cihazının Yaptığı Kayıttan Rakamsal Verilerin Bulunduğu Kayıt Örneği.....	42
Şekil 3.20: Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi.....	43
Şekil 3.21: Termokuplların Buz Banyosunda Kalibrasyonu.....	44
Şekil 3.22: Termokuplların Kalibrasyonu ve Sıcaklık Kayıt Cihazında Okunan Veriler.....	45
Şekil 3.23: Test-1 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları.....	46
Şekil 3.24: Test-1 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi.....	47
Şekil 3.25: Test-1 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	48
Şekil 3.26: Test-2 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları.....	49
Şekil 3.27: Test-2 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi.....	49
Şekil 3.28: Test-2 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	51
Şekil 3.29: Test-3 için T1-T2-T3 Pozisyonları.....	52
Şekil 3.30: Test-3 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi.....	52
Şekil 3.31: Test-3 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	54
Şekil 3.32: Test-4 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları.....	55
Şekil 3.33: Test-4 için Termokuplların Ana Gövdeye Yerleşimi.....	55



Şekil 3.34: Test-4 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	57
Şekil 3.35: Test-5 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları.....	58
Şekil 3.36: Test-5 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi.....	59
Şekil 3.37: Test-5 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	60
Şekil 3.38: Test-6 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları.....	61
Şekil 3.39: Test-6 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi.....	61
Şekil 3.40: Test-6 Verilerine Ait Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	63
Şekil 3.41: Analiz Tipi Seçimi.....	64
Şekil 3.42: Modelin 3 Boyutlu Görüntüsü.....	65
Şekil 3.43: DIN 1.2316 malzeme özellikleri.....	65
Şekil 3.44: EN-AW 5083 malzeme özellikleri.....	66
Şekil 3.45: İzolasyon plakası malzeme özellikleri.....	66
Şekil 3.46: Katı Modelin Mesh Görüntüsü.....	67
Şekil 3.47: Deliklerin Mesh Görüntüsü.....	67
Şekil 3.48: Malzeme Temas Bölgelerinin Seçimi.....	67
Şekil 3.49: Başlangıç Sıcaklığı.....	68
Şekil 3.50: Çevre Koşulları ve Ortam Sıcaklığı.....	68
Şekil 3.51: Test-1 Deneysel Verilerinin Tanımlanması.....	69
Şekil 3.52: Test-2 Deneysel Verilerinin Tanımlanması.....	69
Şekil 3.53: Test-3 Deneysel Verilerinin Tanımlanması.....	70
Şekil 3.54: Test-4 Deneysel Verilerinin Tanımlanması.....	70
Şekil 3.55: Rezistans Gücünün Sisteme Atanması.....	71
Şekil 3.56: Kararlı Hal için Sistem Değişkenlerinin Tanımlanması.....	71
Şekil 3.57: Sistemde Tespit Edilen Maksimum-Minimum Sıcaklık Değerleri.....	72

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 2.1: Kararlı durum analizinin şematik gösterimi.....	17
Tablo 3.1: Elisto Thermostar HD 800 İzolasyon Plakası Teknik Özellikleri.....	21
Tablo 3.2: X38CrMo16 Malzemesinin Standartları.....	25
Tablo 3.3: X38CrMo16 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi.....	25
Tablo 3.4: X38CrMo16 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri.....	25
Tablo 3.5: X38CrMo16 Malzemesinin Isıl İşlem Bilgisi.....	26
Tablo 3.6: Cupral 8 Malzemesinin Standartları.....	27
Tablo 3.7: Cupral 8 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi.....	27
Tablo 3.8: Cupral 8 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri.....	27
Tablo 3.9: Cupral 8 Malzemesinin Mekanik Özellikleri.....	28
Tablo 3.10: Cupro B2 Malzemesinin Standartları.....	28
Tablo 3.11: Cupro B2 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi.....	28
Tablo 3.12: Cupro B2 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri.....	29
Tablo 3.13: Cupro B2 Malzemesinin Mekanik Özellikleri.....	29
Tablo 3.14: Fişek Tipi Rezistans Teknik Özellikleri.....	35
Tablo 3.15: Test-1'e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler.....	47
Tablo 3.16: Test-1 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri .....	48
Tablo 3.17: Test-2'ye Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler.....	50
Tablo 3.18: Test-2 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri .....	50
Tablo 3.19: Test-3'e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler.....	53
Tablo 3.20: Test-3 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri .....	53
Tablo 3.21: Test-4'e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler.....	56
Tablo 3.22: Test-4 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri .....	56
Tablo 3.23: Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması .....	57
Tablo 3.24: Test-5'e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler.....	59
Tablo 3.25: Test-5 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri.....	60
Tablo 3.26: Test-6'ya Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler .....	62
Tablo 3.27: Test-6 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri.....	62
Tablo 3.28: Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması.....	63

## SEMBOL LİSTESİ

- RHCM:** Rapid Heat Cycle Molding (Hızlı Isıl Çevrim Kalıbı)  
**ERHCM:** Electrical Rapid Heat Cycle Molding (Elektrikli Hızlı Isıl Çevrim Kalıbı)  
**% :** Yüzde  
**mm :** Milimetre  
**m:** Metre  
**g:** Gram  
**W:** Watt  
**K:** Kelvin  
**MPa:** Megapaskal  
**FEA:** Sonlu Elemanlar Analizi  
**CAD:** Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Yazılım)  
**CNC:** Computer Numeric Control (Bilgisayar Sayısal Kontrol)  
**AISI:** American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)  
**ASTM:** American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)  
**EN:** Avrupa Standartı  
**DIN:** Alman Standartlar Enstitüsü  
**HRc:** Hardness Rockwell C-scale (Rockwell C Ölçeği)  
**HB:** Hardness Brinell (Brinell Sertliği)

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Eylem Yılmaz Ulu'ya, deneysel sistemin montajı ve kurulumunda yardımlarını esirgemeyen Dentaş Kağıt A.Ş. makine-imalat teknikerlerine, Ansys ile ısı analiz konusunda bilgilerini çekinmeden paylaşan çalışma arkadaşım İlyas Kılıç'a, her zaman huzurlu bir çalışma ortamı ve manevi destek sağlayan annem Zübeyde Çakar'a ve çalışmam sırasında küçük veya büyük yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Geri dönüşümlü kalıplanmış selülozik bazlı koruyucu ambalaj sektörü dünyada ve ülkemizde gelişmeye devam etmektedir. Çoğunlukla yumurtaların korunması ve sevkiyatında tercih edilmesinin yanı sıra, ev aletleri, elektronik eşyalar gibi diğer endüstriyel ürünlerin muhafazası için de kullanılan geri dönüşümlü bu ambalaj türü, plastik ve köpük gibi geri dönüşümü yıllar alan ambalajların tahtını sarsmaya devam etmektedir. Bu sektördeki teknolojik gelişimin devam edebilmesi için, kazanılan bilgi ve birikimin yeni tasarım süreçleri ve araştırma modelleri ile desteklenmesi gerekmektedir.

Ambalaj sektöründeki (kağıt, plastik vb. sektörler) makinalar genellikle kalıpta kurutma yöntemiyle çalışmaktadır. Termoform kalıplı üretim yöntemi de kalıpta kurutma prensibi ile çalışmaktadır (Pulp-Machinery.com, 2016). Özellikle kalıpların veya kalıp elemanlarının yüzeyinin ısıtılması, çoğu imalat prosesinde geçerli genel bir prosedürdür. Kalıp yüzeyini ısıtmak için bir takım seçenekler mevcuttur. Örneğin, kalıp yüzeyinin içini veya dışını konveksiyonla ısıtmak için bir termal akışkan kullanılabilir. Diğer yöntemler arasında radyan ısıtıcılar, elektrik dirençli ısıtıcılar, fişek tipi rezistanslar, indüktif ısıtma elemanları varsayılabılır (Oppelt ve diğ. 2012).

Bu yüksek lisans tez kapsamında, fişek tipi rezistans entegre edilmiş kalıp ısıtma tablası modellenerek, kararlı hal durumunda (steady state) ısı dağılımı incelenecektir. Rezistanslı kalıp ısıtma tablasının termal simülasyonu için, Ansys programından faydalanılacaktır. Ortam şartlarından ötürü ısıtma tablasının korozif ortama dayanaklı, yüksek mukavemetli, ısı iletiminin yüksek özellikler barındırdığı malzemeden olması gerekmektedir. Isıtma tablası için farklı malzeme önerisi yapılacaktır. Isıtma tablasının yalıtımı için kullanılan izolasyon plakalarının kalınlıklarının belirlenmesi ve ısı analizine etkisi de irdelenecektir. 4 adet girişi bulunan hem K-tipi, hem de J-tipi termokupl kablolu bir sıcaklık ölçüm cihazı (datalogger) ile kalıp ısıtma tablası prototipinden sıcaklık ölçümü yapılarak veriler bilgisayara kaydedilecektir.

## 1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezde, kalıpta kurutma yöntemiyle çalışan bir sistemin ana unsurlarından olan rezistanslı kalıp ısıtma sistemi modellenerek, kararlı hal durumunda (steady state) ısı dağılımı incelenmiştir.

Tez konusunun seçilmesinin ana sebebi, termoform kalıpta kurutma sistemleri ile üretim yapan firmaların karşılaştığı kalite problemleridir. Rezistansla ısıtılan termoform kalıp kurutma sistemlerinde homojen ısı dağılımının olmaması sonucu, nemli ve bölgesel yanıkların olduğu ürünler üretilmektedir. Bu da fire oranlarını yükseltmektedir. Sağlıklı bir kurutmanın sağlanamaması ve çevrim sürelerinin uzaması ile verimlilik kayıpları yaşanabilmektedir.

Bu tezin temel amaçları; ısıtma tablasında homojen ısı dağılımı ve sıcaklık uyumunun sağlanması için fişek tipi rezistansların sayısının ve diziliminin etkilerini incelemek, yalıtım için kullanılan izolasyon plakasının kalınlık değişiminin tabladaki ısı dağılımına ve enerji tüketimine etkisini gözlemlemek. Isıtma tablası için farklı malzeme önerisi yapmak ve kıyaslamasını yapabilmektir.

Reel test ve gözlem sonuçları elde etmek için, rezistanslı ısıtma plakasından oluşan sistem tasarlanmış, imalatı yapılmış ve ardından montajı gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında rezistanslı ısıtma tablasının tasarımı ve üç boyutlu modellenmesi için Siemens Unigraphics (NX) programından faydalanılmıştır, tablada meydana gelen ısı dağılımı karakteristiği ve termal analiz özellikleri için sıcaklık veri ölçüm cihazı (datalogger) kullanılmıştır. Ayrıca simüle etmek için Ansys Workbench programından yararlanılmıştır. Kararlı hal (steady state) durumu için ortam değişkenleri ve parametreler belirlenmiştir. Isıtma tablasında kullanılacak olan malzemeler hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. Kalıp yüzeyi ısıtma yöntemleri, kalıbı ısıtmak için kullanılan materyal, deney ve yöntemler hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır.

## 1.2 Literatür Özeti

Tezin araştırmasında kullanılan yöntem ve materyaller ile ilgili farklı alanlarda araştırmalar mevcuttur. Son on yılda, geleneksel rezistanslı ısıtma elemanları kullanılarak yapılan kalıp ısıtma yöntemi hakkında çok az araştırma yapılmıştır (Oppelt ve diğ. 2012).

Yapılan bir çalışmada, hızlı bir kalıp yüzeyi ısıtması elde etmek için elektromanyetik indüksiyonla ısıtma sistemi geliştirilmiştir. Yassı çelik kalıp plakası üzerinde endüksiyonla ısıtma deneyleri için, hem dairesel bir bobin, hem de tek turlu dikdörtgen bir bobin düzgün bir şekilde tasarlanmıştır. Isıtma verimliliği karşılaştırması için, dikdörtgen bobin ile aynı uzunluktaki ikinci bir dairesel bobin ve çok turlu dikdörtgen bobin de kullanılmıştır. İndüksiyonla ısıtma işlemi sırasında kalıp plakası yüzey sıcaklık dağılımının, kızılötesi termal görüntü sistemi kullanılarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Simülasyon teknolojisinin, ANSYS'in hem termal, hem de elektromanyetik analiz modüllerinin entegrasyonu ile geliştirildiği belirtilmiştir. Bobin akımı, bobin ile plaka mesafesi ve ısıtma süresinin, hem deney, hem de simülasyonlar içinde çeşitlendirildiği aktarılmıştır. İndüksiyonla ısıtma simülasyonlarının deneylerle doğrulandığı anlatılmıştır. Simüle edilmiş sıcaklık dağılımlarının, ölçülen sonuçlarla makul bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Bobin akımı, bobin ile plaka mesafesi ve ısıtma süresi, ısıtma verimliliğini ve sıcaklık artışını en önemli şekilde etkileyen üç ana parametredir. Tek turlu bobinin kalıp plakası yüzeyi üzerinde homojen olmayan bir ısıtma sağladığı ve çok turlu bobinin daha iyi ısıtma verimliliği sağladığı, ısıtılan nesnenin sıcaklık dağılımının da daha fazla homojenlik sağladığı tespit edilmiştir (Chen ve diğ. 2004).

Bir diğer çalışmada, elektrikli hızlı ısıl çevrimli enjeksiyon kalıplama teknolojisi ve kalıbın yapısal tasarımı incelenmiştir. Kalıbın oyuk yüzeyinde ısıtma verimliliğini ve sıcaklık dağılımını etkileyen faktörler analiz edilmiştir. Oyuk plakada yer alan ısıtma çubuklarının yerleşimi optimize edilmiş ve ardından model formüle edilmiştir. Bununla birlikte, ısıtma çubuğu yerleşimine göre sıcaklık dağılımının homojenliği ve ısıtma verimliliği irdelenmiştir. TV paneli kalıp yapısı için en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Optimizasyon yöntemini kullanarak kalıp yüzeyindeki sıcaklık dağılımı homojenliğinin %37,38 oranında iyileştirildiği tespit edilmiştir. Sıcaklık farkı 46.1°C'den 32.6°C'ye düşmüştür. Isıtma verimliliğinde, optimum kalıp tasarımı sayesinde iyileşme sağlandığı ve çok iyi

enjeksiyon ürünleri elde edildiği belirtilmiştir. ERHCM (elektrikli hızlı ısıl çevrimli enjeksiyon kalıplama teknolojisi) teknolojisinin, geleneksel enjeksiyon kalıplama işleminde ortaya çıkan hataları tamamen ortadan kaldıracabileceği anlatılmıştır (Zao ve diğ. 2010).

Başka bir çalışmada, hızlı ısıl çevrimi gözlemek için, yeni elektrik ısıtmalı hızlı termal tepki, hareketli ve sabit kalıp çekirdeklerinde incelenmiştir. Bu yeni elektrikli ısıtma kalıbıyla, hızlı ısıl çevrim kalıbının (RHCM) işlem prensipleri tartışılmış ve sunulmuştur. Tepki yüzeyi metodolojisi (RSM), ısıtma elemanlarının yerleşimi, ısıtma verimliliği, sıcaklık homojenliği ve hareketli kalıp çekirdeğinin yapısal dayanımı arasında matematiksel ilişkiler geliştirmek için kullanılmıştır. İki bitişik ısıtma çubuğu arasındaki yarım mesafeyi içeren üç açıklayıcı değişken, ısıtma çubukları ve boşluk yüzeyi arasındaki mesafeyi, ısıtma çubuğunun çapını, ısıtma elemanlarının yerleşimini ve ölçüğünü tanımlamak için kullanılmıştır. Gerekli ısıtma süresi, maksimum boşluk yüzeyi sıcaklığı ve maksimum Von-Mises stresini içeren bağımlı değişkenleri, sırasıyla, ısıtma verimliliğini, homojen sıcaklık dağılımını ve hareketli kalıp çekirdeğinin yapısal dayanımını karakterize etmek için kullanılmıştır. Faktöriyel deneyler için, merkezi kompozit tasarım (CCD) yöntemi kullanılmıştır. Bağımlı değişkenlerin değerlerini elde etmek için, sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bağımlı değişkenler için, üç tahmin modeli, regresyon analizi ile oluşturulmuştur. Doğruluğunu kontrol etmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Bu tepki yüzeyi modelleri, elektrikli ısıtmalı hızlı termal tepki (RTR) kalıbının, optimum ısıtma sistemi tasarımı için etkili bir parçacık sürüsü algoritması ile arayüzlenmiştir. Geliştirilen optimum yöntem daha sonra, gerçek bir endüstriyel ürün için, elektrikle ısıtılan hareketli kalıp çekirdeğinin tasarımı için kullanılır. Makaledeki ısı transferi analiz sonuçlarına göre, boşluk yüzeyinin sıcaklık dağılımı homojenliği, optimum boşluk yapısı ve ısıtma çubuklarının yerleşimi ile büyük ölçüde iyileştirildiği belirtilmiştir (Wang ve diğ. 2010).

Bir diğer literatür araştırmasında bahsedilen hızlı ısı çevrimli kalıplama (RHCM), son yıllarda yeni geliştirilen bir enjeksiyon kalıplama teknolojisidir. Bu makalede, boşluk yüzeyinin hızlı bir şekilde ısıtılması ve soğutulması için yeni bir elektrikli ısıtma RHCM kalıbı geliştirilmiştir. Farklı ısıtma süresi ve soğutma süresi ile boşluk yüzey sıcaklığına etkilerini araştırmak için termal çevrim deneyleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, elektrikli ısıtma RHCM kalıbının ısıl çevrimi sırasında boşluk yüzeyinin en yüksek sıcaklığını ve en düşük sıcaklığını tahmin etmek



için regresyon analizi ile bir matematiksel model geliştirilmiştir. Doğrulama deneyleri, önerilen modelin, boşluk yüzey sıcaklığının doğru şekilde kontrolü için çok etkili olduğunu göstermiştir. Boşluk yüzeylerinin termal tepkisi ve sıcaklık dağılımının daha kapsamlı bir analizi için, termal çevrim prosesi sırasında elektrikli ısıtma RHCM kalıbının termal yanıtını simüle etmek için sayısal yöntem tabanlı sonlu eleman analizi (FEA) kullanılmıştır. Simüle edilen boşluk yüzey sıcaklığı yanıtı, deney sonuçları ile iyi bir uyum göstermiştir. Simülasyonlara dayanarak, fişek tipli rezistansların güç yoğunluğunun ve soğutma suyunun sıcaklığının, boşluk yüzeyinin termal yanıtı üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Son olarak, RHCM işleminin parçanın yüzey görünümü ve gerilme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, RHCM'deki doldurma aşaması sırasında yüksek boşluklu yüzey sıcaklığının, yüzey parlaklığını büyük ölçüde iyileştireceğini, kaynak hattı ve püskürtme işaretini tamamen ortadan kaldırarak yüzey görünümünü önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. RHCM işlemi, elyaf takviyeli plastikler için parça yüzeyindeki maruz kalan elyafları da ortadan kaldırabileceği belirtilmiştir. Çok parlak akrilonitrilbütadienstiren/polimetilmetakrilat (ABS/PMMA) alaşımı için, RHCM işlemi, parçanın kaynak işaretli veya işaretsiz gerilme direncini azalttığı belirtilmiştir. Polipropilen (PP)+%20 cam elyafı içeren elyaf takviyeli plastikler için RHCM işleminin, kaynak işareti olmayan parçanın gerilme mukavemetini azalttığını, ancak kaynak işaretli parçanın gerilme mukavemetini hafifçe artırdığı söylenmiştir (Wang ve diğ. 2013).

Başka bir çalışmada ise, hızlı ısı çevrimli kalıplamanın (RHCM), mükemmel görünümlü, püskürtme izi içermeyen plastik ürünler üretmek için geliştirilmiş bir enjeksiyon kalıplama teknolojisi olduğu belirtilmiştir. Kalıbı hızlı ısıtma ve soğutma, RHCM 'nin temel tekniği olduğu söylenmektedir. Uygulamada yaygın olarak kullanılmasına rağmen, düzenli hızlı kalıp ısıtma ve soğutma yöntemleri, hala bazı açık kusurlara sahiptir. Bu nedenle, yazarlar elektrikli ısıtma ve dairesel soğutma ile karakterize edilen yeni bir hızlı kalıp ısıtma ve soğutma yöntemi geliştirmiş ve bu çalışma ile ısıtma ve soğutma periyotlarındaki sıcaklık ve basınç tepkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuçlar, takım yüzey sıcaklığının, kısa bir tepki süresinden sonra ısıtma süresi ile neredeyse doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Isıtma gücü arttıkça veya ısıtıcıdan takım yüzeyine olan mesafe ne kadar küçük olursa, ısıtma hızının da o kadar hızlı olduğu belirtilmiştir. Hava kabarcıklarının çalışma akışkanına sokulması, çalışma hızını etkilemeden çalışma akışkanının basınç artışını önemli ölçüde

azaltabileceği belirtilmiştir. İncelenen akış hızı aralığında, soğutma hızının, önce akış hızı ile önemli ölçüde arttığı ve daha sonra bir zirveye ulaşırken, çalışma sıvısının çalışma basıncının da tüm aralıktaki akış hızı ile doğrusal olarak arttığı belirtilmiştir. Optimum akış hızı, Reynolds sayısı 6700'e karşılık gelen yaklaşık 6.0 L/dakikadır. Soğutma periyodundaki ısı transfer katsayısının, başlangıç aşamasında keskin bir şekilde arttığı ve daha sonra kademeli olarak azaldığı ve son olarak bir platoya ulaştığı belirtilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça, ısı transfer katsayısının da arttığı vurgulanmıştır. Özellikle, ısı transfer katsayısı ve Reynolds sayısı, çift logaritmik ölçekte doğrusal bir ilişki göstermiştir. Son olarak, takım yüzeyinin sıcaklık dalgalanma aralığını tahmin etmek ve kontrol etmek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu nedenle çalışmanın, yeni hızlı ısıtma ve soğutma yönteminin endüstriyel uygulamasına fayda sağlayabileceği belirtilmiştir (Wang ve diğ. 2018).

Bir diğer çalışmada ise, termal nanoimprint litografi süreçleri için ısıtma ve soğutma aracı olarak kullanılan, özel olarak tasarlanmış, geniş alanlı sıcak bir plakanın termal performansı üzerine sayısal bir çalışma yapılmıştır. 240x240x20 mm ölçülerine sahip ısıtma plakasında bir dizi fişek tipi rezistans ile soğutma kanalları mevcuttur. Yüksek kalıplama basıncına dayanması için paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Isıtma plakasının anormal termal davranışını incelemek ve hesaplama yapmak için ANSYS Fluent V15.0 analiz programı kullanılmıştır. Isıtma plakasının hem ısıtma, hem de soğutma fazlarındaki termal davranışını tahmin etmek için sayısal bir model kullanılmıştır. Nanoimprint ekipmanına ait geniş alanlı bir ısıtma plakasının termal tasarımını yapmak için, incelenecek model seçilmiştir. Isı boruları olan ve olmayan, doğrudan ve dolaylı soğutma yöntemlerini kullanarak bir soğutma modeli önerilmiştir. Ayrıca, küçük bir ısıtma plakası oluşturulmuş ve önerilen modelin geçerliliğini doğrulamak için deneysel ve hesaplama analizleri yapılmıştır. Paslanmaz çelikten (STS304) geniş alanlı bir ısıtma plakasının genişlemesi durumunda, ortaya çıkabilecek sorunları çözmek için fişek tipli rezistanslar ısı boruları yönünde sokulmuştur. Sonuç olarak, ısıtma hızı 40°C/dakika ve sıcaklık homojenliği, maksimum çalışma sıcaklığı olan 200°C'nin %1'inden azdır. Soğutma için, basınç düşünülduğünde ve uçlar için soğutucu madde olarak hava kullanıldığında, 20°C/dk'lık bir soğutma hızı ve maksimum sıcaklığa bağlı olarak 13.2°C'den az (%7'den az) termal performans elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla benzerlik göstermiştir (Park ve Lee 2019).

Yukarıdaki literatür özetleri incelendiğinde genel olarak plastik enjeksiyon kalıp sistemlerinde, ürün yüzeyindeki kalite problemlerinin (kaynak izi, püskürtme işaretleri vb.) giderilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, termoform kalıpta kurutma sisteminde homojen ısı dağılımı verimliliğini kontrol etmek ve sistemin optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Homojen ısı dağılımının sağlanması ile viyollerde (selülozik bazlı kağıt hamuru ürünleri) meydana gelen kalite problemlerinin (nemli ürün, yanık bölgelere sahip ürün vb.) önüne geçilebilecektir. Ayrıca verimlilik artışı sağlanacaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Metodu

Kalıplanmış elyaf ürünleri olarak da adlandırılan kalıplanmış kağıt hamuru ürünleri (viyol), şu anda esas olarak üretilen ürünlerin ambalajlanması veya gıda kapları, servis tepsi gibi gıda ile ilgili taşıyıcılar olarak kullanılmaktadır (Didone ve diğ. 2017). Form (geometri) ve estetik sınırlamalar nedeniyle, kalıplanmış kağıt hamuru ürünleri yıllarca yumurta kutusu pazarıyla sınırlandırılmıştır. Ancak, sürdürülebilir nitelikleri nedeniyle talep artmaktadır (Wever ve Twede 2007).

Ağaç liflerinden yapılmış olan, esasen selüloz bazlı olan kalıplanmış kağıt hamuru ürünleri genel olarak tamamen yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir. Bu nitelikler, hükümet düzenlemeleri ve müşteri talepleri nedeniyle petrol bazlı ambalaj formlarına alternatifleri değerlendirmek isteyen şirketler ile ambalaj endüstrisinde giderek daha fazla benimsenmesini sağlamıştır (Didone ve diğ. 2017).

#### 2.1.1 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması

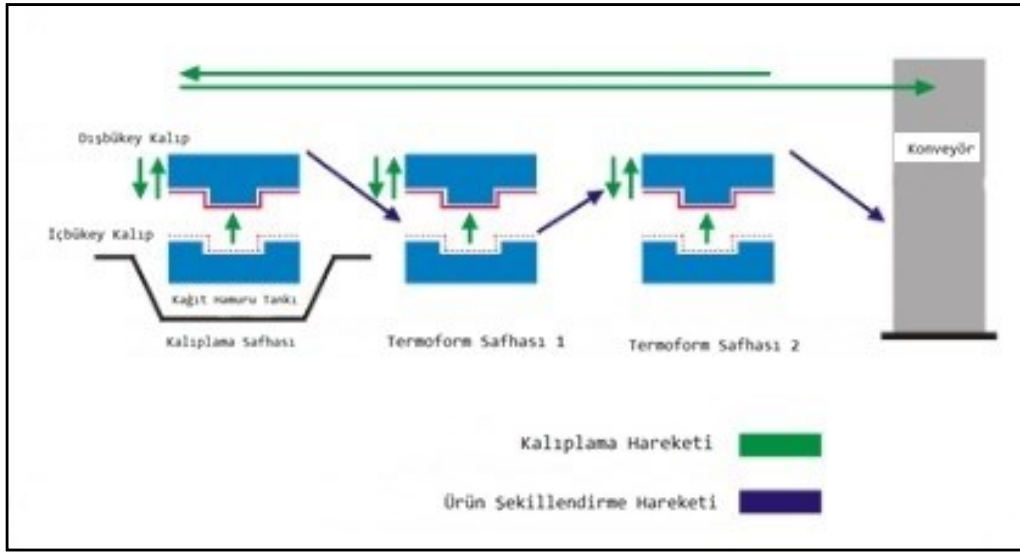
Kalıplanmış selülozik bazlı kağıt hamuru ürünü üretim yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Imfa.org, 2020) :

**1. Kalın Duvarlı:** Açık kalıp kullanılarak üretilip fırında kurutulur. Tipik duvar kalınlığı 5 mm ile 10 mm arasındadır. Kalıpla temas eden yüzey nispeten düzdür, diğer taraf çok pürüzlüdür. Hammadde tipik olarak geri dönüştürülmüş kağıtla karıştırılmış Kraft kağıttır. Genellikle kırılman olmayan ağır malzemeler (örneğin, mobilya ve araç parçaları) için destek ambalajı olarak kullanılırlar.

**2. Transfer Kalıplı:** Bu kategorideki ürünler 3 mm ile 5 mm arasında daha ince duvarlara sahiptir. Hem şekillendirme kalıbı, hem de transfer kalıbı kullanılarak üretilirler. Sonuç olarak, her iki tarafta nispeten pürüzsüz yüzeylere ve daha iyi boyutsal doğruluğa sahip bir ürün üretilir. Şekillendirilmiş ürün ısıtılmış bir fırında

kurutulur. Yaygın olarak kullanılan hammadde geri dönüştürülmüş gazetedir. Tipik örnekler yumurta kutuları ve elektronik ekipman ambalajlarıdır.

**3. Termoform (İnce duvarlı):** İlk oluşturulan ürün, preslendiği, yoğunlaştırıldığı ve kurutulduğu ısıtılmış kalıplarda tutulur. Fırında kurutmaya gerek yoktur. Bu proses sayesinde boyutsal doğruluğa sahip, pürüzsüz, sert yüzeyli, ince duvar kalınlığına ( 2 mm'den 4 mm'ye kadar) sahip ürünler üretilir. Sonuç, ısıyla şekillendirilmiş plastik parçaların görünümüne benzemektedir.



Şekil 2.1 Termoform Kağıt Hamuru Kalıplama Makinası Üretim Prosesi (TPM-USA, 2016)

**4. Özel İşlem Uygulanmış :** Bu tip kalıplanmış kağıt hamuru ürünü, temel üretim prosedüründen genellikle farklı ya da ek olarak bir çeşit ikincil işleme tabi tutulan üründür. Bu, ilk üç türden herhangi biri için geçerli olabilir. İkincil uygulamada kaplama, baskı, sıcak presleme, kalıp kesme, düzeltme veya bulamaç katkı maddeleri kullanılarak üretilebilir. Kullanımları birçok özel uygulama içindir (Wikipedia.org, 2020).

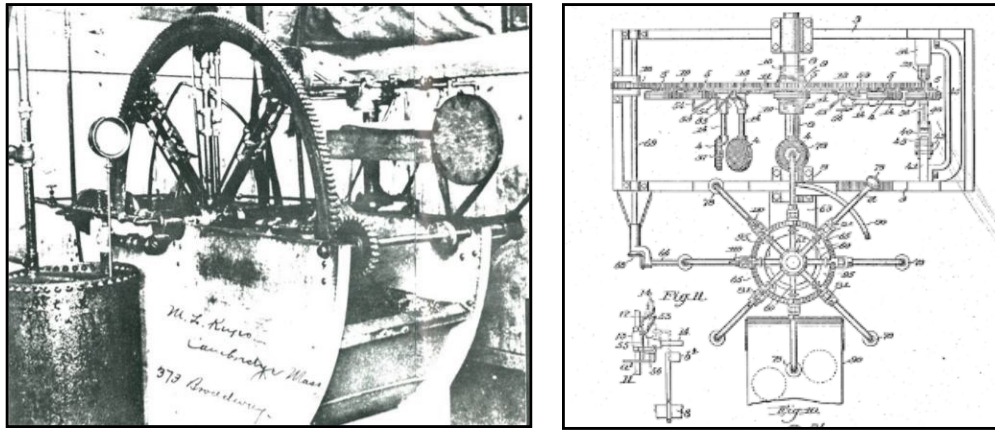
#### 2.1.2 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünlerinin Tarihsel Gelişimi ve Uygulama Örnekleri

1800'lerin ortalarında, gazete ve kitapların kitlesel dağılımı ile, kağıtla ilgili ürünlerin fiyatları düştü ve böylece yeni uygulamalar ortaya çıktı. Kağıt hamurundan

kalıplanmış ürünler yapmak için bir yöntemin ilk görünümü 1890'a kadar uzanmaktadır (Keyes 1890).

Kalıplanmış selülozik bazlı kağıt hamuru ürünleri yapmak için ilk patent 1903 yılında Cambridge, Massachusetts 'ten Martin L. Keyes tarafından tescil edildi. Hamur haline getirilmiş fiberlerin kalıp ve vakum yardımıyla tabak şeklinde form verildiği, günde 50.000 tabak üretme kapasitesine sahip bir makine icat etmesiyle başlamıştır.

Aşağıda bu makine ve ona ait patent resmi görülebilir (Keyes 2012).



Şekil 2.2 İlk Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Makinesi (Keyes 2012)

Tabak üretimi ile 1903'te başlayan kalıplanmış selülozik ürün üretimi, 1920'li yıllarda yumurta ambalajı (yumurta viyolü) üretimi ile yaygınlaşmaya başlamıştır (Sarıkaya 2019).

Senaryo 1980'lerin sonunda değişti. O yıllarda tüketiciler satın aldıkları ürünlerin çevresel etkilerine ilgi duymaya başladılar, böylece kalıplanmış selülozik bazlı kağıt hamuru endüstrisi yeni ve yenilikçi çözümler geliştirmeye başladı (Didone ve diğ. 2007).

Genel olarak, bu ürünler aşağıda gösterildiği gibi üç çeşit pazarla ilgilidir.



**Şekil 2.3** Kalıplanmış Selozik Bazlı Kağıt Hamuru Ürünü Kullanılan 3 Ana Market (Didone ve diğ. 2017)

Kalıplanmış selülozik bazlı kağıt hamuru ürünü ayrıca nakliye sırasında bir ürünün korunması için yastıklama malzemesi olarak kullanılır. Yüksek mukavemeti, dayanıklılığı ve düşük maliyeti ile bu malzeme ahşap ve plastiklerin yerini alabilir (Didone ve diğ. 2007).

### 2.1.3 Kalıplanmış Kağıt Hamuru Ürünü Üretim Prosesi

Kalıplanmış selülozik bazlı kağıt hamuru ürününün üretim yöntemi, ilk önce pulper adı verilen karıştırıcıda doğal fiberlerin çözünmesi/ayrışması ile başlar. Su-fiber çözeltisi haline gelen fiberler kalıplama ünitesine nakledilir. Kalıplama ünitesinde su-fiber çözeltisine daldırılan kalıp vakum yardımı ile fiberleri üzerine çeker ve istenilen form oluşturulur. Ardından form verilmiş fiberler kalıptan alınarak kurutulur ve istenilen form bu şekilde elde edilmiş olur (Sarıkaya 2019).

Termoform kağıt hamuru ürünlerinin üretim aşamaları, açıklama amacıyla aşağıda listelenmektedir:

**1. Karıştırma:** Hammadde suya batırılır ve istenen hamur kıvamına ulaşılan kadar karıştırılır. İstenilen özellikleri elde etmek için kağıt endüstrisinde kullanılan bir takım katkı maddeleri ilave edilir (Hubbe 2007).



Şekil 2.4 Geri Dönüşüm Hammaddesi (S-Packaging.com, 2020)

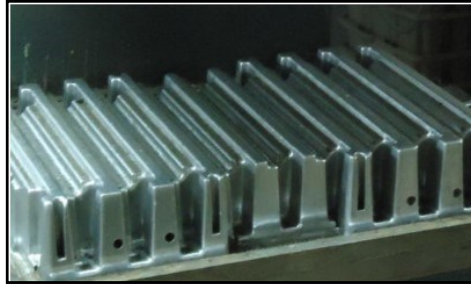
**2. Şekillendirme:** Üzerinde kalıbın formuna göre şekillendirilmiş tel ve hamuru kalıp yüzeyine çekmek için vakum delikleri bulunmaktadır. Vakumla fiberlerin kalıba tutunması gözenekli tel örgü sayesinde olmaktadır. Bu işlemle kalıptaki ürün formu ıslak halde oluşmaktadır.



Şekil 2.5 Telli Form Verme Kalıbı (S-Packaging.com, 2020)



3. **Presleme ve Kurutma:** Islak haldeki ürün ısıtılan kalıba taşınır. Ürün sıkıştırılır ve bir kalıbın iki eşleşmiş yarısı ile tamamen kurutulur. Yüzey nispeten pürüzsüz hale gelir ve iyi bir boyutsal doğruluk elde edilir. Presleme aynı zamanda ürünün mekanik özelliklerini geliştirerek daha verimli depolama ve nakliye için istifleme ve yerleştirmeye yardımcı olur. Lifler arasında iyi bir bağ oluşturmak için basınç gereklidir. Bu aşama sırasında, parça preslenirken vakum uygulanabilir, böylece fazla nem uzaklaştırılır ve ürünün z yönlü mukavemetinde ciddi bir azalma olarak tanımlanan delaminasyon gibi problemler önlenir (Lucisano ve Martinez 2001).



Şekil 2.6 Presleme kalıbı (S-Packaging.com, 2020)

4. **Düzeltilme ve Kalite Kontrol:** Çapak yapan kenarlar kesilir ve tüm hurdalar veya reddedilen ürünler hamur karışımına geri gönderilir ve tekrar kullanılır. Üretilen ürünler, özel işlemlere tabi tutulabilir. Parçanın en son kalite kontrolü yapılır.



Şekil 2.7 Trimleme Safhası (S-Packaging.com, 2020)



Şekil 2.8 Son Ürün ve Kalite Kontrolü (S-Packaging.com, 2020)

## 2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

### 2.2.1 ANSYS ile Analiz

Sonlu Elemanlar Yöntemini (FEM) kullanarak mühendislik problemlerinin çözümlerinin oluşturulması için ya Sonlu Elemanlar Metodu formülasyonuna dayalı bir bilgisayar programının geliştirilmesi ya da ANSYS gibi ticari olarak temin edilebilen genel amaçlı bir Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) programının kullanılması gerekir. ANSYS programı, çok çeşitli mühendislik disiplinlerinde kullanılabilen güçlü, çok amaçlı bir analiz aracıdır. Her alanda tam bir çalışma sunar ve olanakları geniştir. Havacılık alanındaki birçok şirket, gerekli testleri yapmak için bu programa güvenmektedir (Jimenez 2013).

Fiziksel bir sistemin FEA modelini oluşturmak için ANSYS'i kullanmadan önce, mühendislik muhakemesi ve gözlemlerine dayanarak aşağıdaki sorular cevaplanmalıdır:

- Bu analizin amaçları nelerdir?
- Tüm fiziksel sistem modellenmeli mi, yoksa sadece bir kısmı mı?
- Modele ne kadar detay dahil edilmelidir?
- Sonlu Elemanlar Mesh'i ne kadar hassasiyete sahip olmalıdır?

Bu tür soruları yanıtlarken, hesaplama girdileri sonuçların doğruluğuyla dengelenmelidir. Bu nedenle, ANSYS sonlu elemanlar programı aşağıdakileri göz önünde bulundurarak doğru ve verimli bir şekilde kullanılabilir:

- Problemin türü
- Zamana bağlılık
- Doğrusal olmama durumu
- Modelleme idealizasyonu/ Sadeleştirme

### 2.2.2 Termal Analiz Türleri

ANSYS iki tip termal analizi destekler:

1. Kararlı Durum (Steady State) Termal Analizi, kararlı durum yükleme koşulları altında sıcaklık dağılımını ve diğer termal miktarları belirler. Kararlı durum yükleme koşulu, belirli bir süre boyunca değişen ısı depolama etkilerinin göz ardı edilebildiği bir durumdur.

2. Geçici Termal Analiz (Zamana Bağlı), bir süre boyunca değişen koşullar altında sıcaklık dağılımını ve diğer termal miktarları belirler.

3. Birleştirilmiş Alan Analizi, mühendisliğin iki veya daha fazla disiplini (alanı) arasındaki etkileşimi (bağlantıyı) dikkate alan bir analizdir. Örneğin bir piezoelektrik analiz, yapısal ve elektrik alanlar arasındaki etkileşimi ele alır: Uygulanan yer değiştirmelerden kaynaklanan voltaj dağılımını veya tam tersini çözer. Birleştirilmiş alan analizinin diğer örnekleri termal-stres analizi, termal-elektrik analizi ve akışkan-yapı analizidir (Jimenez 2013).

#### 2.2.2.1 Kararlı Hal (Steady State) Termal Analizi

Kararlı durum termal analizi, kararlı termal yüklerin bir sistem veya bileşen üzerindeki etkilerini hesaplar. Mühendisler/Analistler, başlangıç koşullarının oluşturulmasına yardımcı olmak için geçici bir termal analiz yapmadan önce genellikle kararlı durum analizi yaparlar. Kararlı durum analizi, geçici bir termal analizin son adımı olabilir; tüm geçici etkiler azaldıktan sonra gerçekleştirilir. Ayrıca, zaman içinde değişmeyen termal yüklerin neden olduğu, bir cisimdeki sıcaklıkları, termal

gradyanları, ısı akış hızlarını ve ısı akışlarını belirlemek için sabit durumlu bir termal analiz kullanılabilir. Bu yükler aşağıdakileri içerir:

- Taşınım
- Işınım
- Isı akış hızları
- Isı akıları (birim alan başına ısı akışı)
- Isı üretim oranları (birim hacim başına ısı akışı)
- Sabit sıcaklık sınırları

Kararlı durumlu bir termal analiz, sabit malzeme özelliklerine sahip doğrusal veya sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerine sahip doğrusal olmayan olabilir. Çoğu malzemenin termal özellikleri sıcaklığa göre değişir, bu nedenle analiz genellikle doğrusal değildir. Radyasyon etkilerinin dahil edilmesi de analizi, doğrusal olmayan bir analiz yapar.

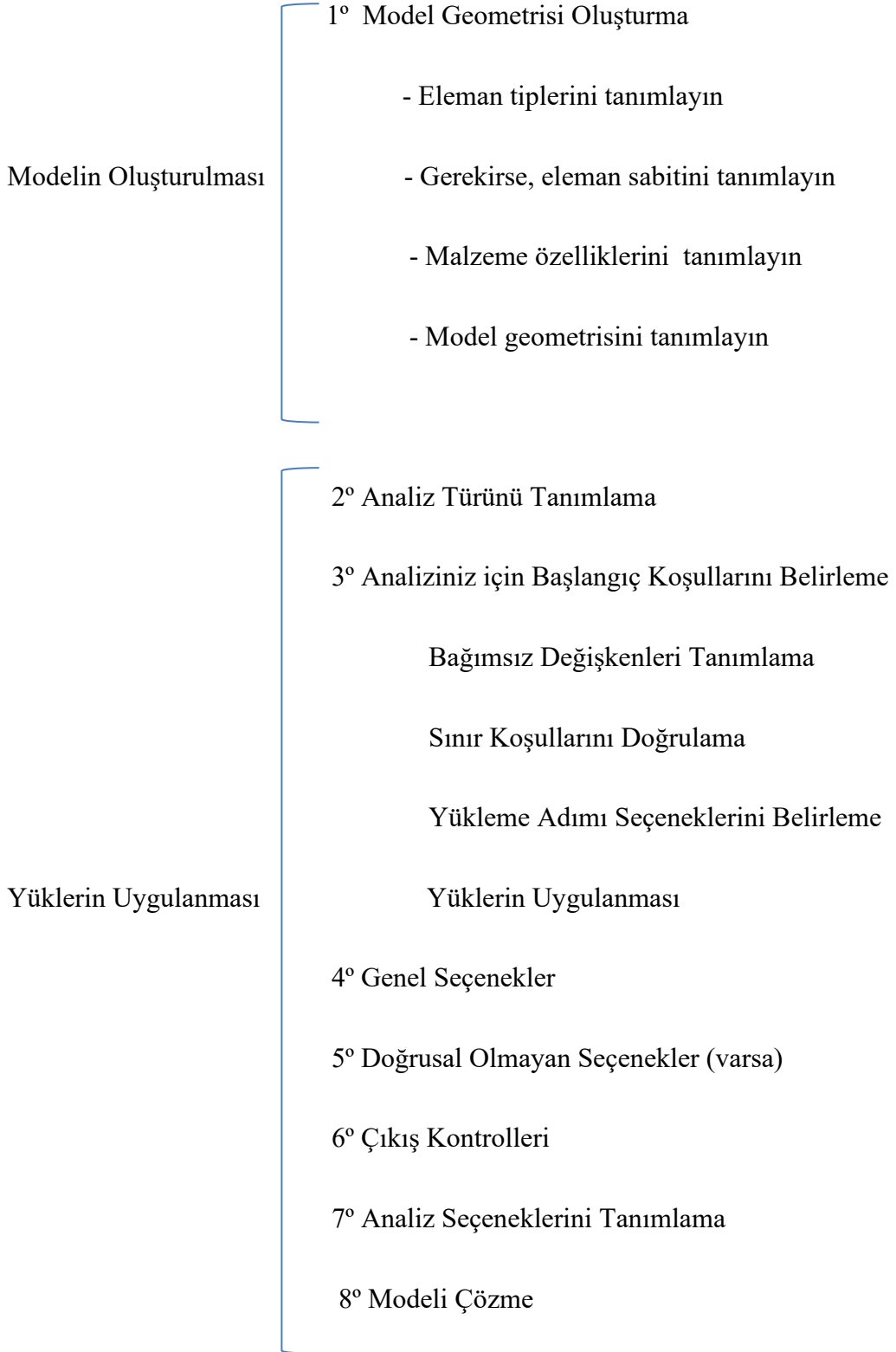
### **Yöntem**

Herhangi bir hesaplama yazılımı aracılığıyla termal analiz yapma prosedürü, bu durumda, ANSYS, üç ana görevi içerir:

- Modeli oluşturun.
- Yükleri uygulayın ve çözümü elde edin.
- Sonuçları gözden geçirin.

Aşağıda gerçekleştirilmesi gereken adımlara yönelik genel bir bakış ortaya konmaktadır:

**Tablo 2.1** Kararlı Durum Analizinin Şematik Gösterimi (Jimenez 2013)



Sonuçların İncelenmesi

9° Analiz Sonuçlarını Gözden Geçirme

10° Sonuçlarda Okuma

Komut (lar): **SET**

11° Sonucu Gözden Geçirme

Komut (lar): **PLESOL, PLETAB, PLNSOL**

#### 2.2.2.2 Geçici Termal Analiz (Zamana Bağlı Analiz)

ANSYS ile yapılan analiz şu durumlarda zamana bağlı olmalıdır:

- Katı cisim zamanla değişen yüklere maruz kalır.
- Katı cisim başlangıçta belirlenmiş bir sıcaklık dağılımına sahiptir.
- Cisim değişim fazı

Geçici termal analiz (zamana bağlı analiz) zaman içinde değişen sıcaklıkları ve diğer termal miktarları belirler. Mühendisler genellikle geçici bir termal analizin termal stres değerlendirmeleri için yapısal analizlere girdi olarak hesapladığı sıcaklıkları kullanırlar. Birçok ısı transferi uygulaması-ısı işlem problemleri, nozullar, motor blokları, boru sistemleri, basınçlı kaplar, vb. geçici termal analizleri içerir.

Geçici bir termal analiz temel olarak sabit durumlu bir termal analizle aynı prosedürleri takip eder. Temel fark, geçici bir analizde en çok uygulanan yüklerin zaman fonksiyonlarıdır (Jimenez 2013).

### 3. DENEYSEL SİSTEM VE YÖNTEM

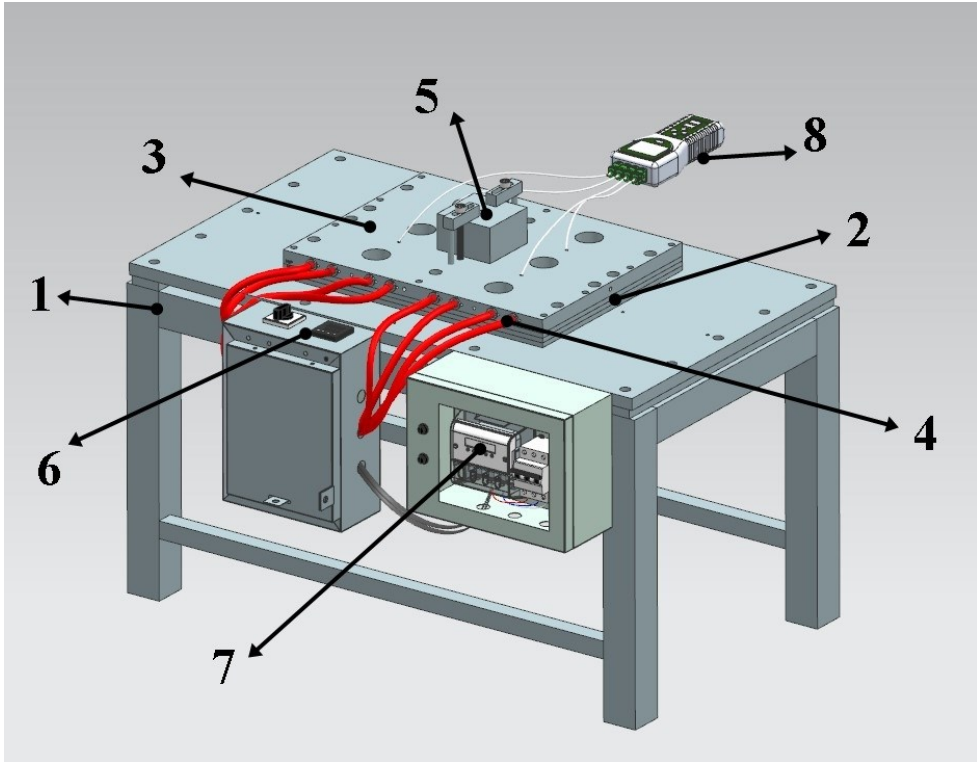
Yüksek lisans tezi kapsamında rezistanslı kalıp ısıtma sistemi oluşturularak, kararlı rejim (steady state) durumunda ısı dağılımı incelenmiştir.

Yüksek lisans tez projesinin temel aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Rezistanslı kalıp ısıtma sistemi tasarımı, imalatı ve montajı
- Sıcaklık kayıt cihazı (datalogger) ile sıcaklık ölçüm verilerinin kayıt altına alınması
- Ansys Workbench ile kararlı durum (steady state) termal analiz

#### 3.1.1 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Tasarımı

Termoform kalıpta kurutma sistemi incelenerek, buna uygun olarak rezistanslı kalıp ısıtma sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımı için, Siemens NX12 (Unigraphics) CAD programından yararlanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.1’de rezistanslı kalıp ısıtma sistemi tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Tasarımı

### 3.1.2 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi İmalatı

Yukarıda Şekil 3.1'de gösterilen rezistanslı kalıp ısıtma sisteminin bölümleri aşağıdaki gibidir;

1. Ana Gövde (Şasi)
2. İzolasyon Plakası
3. Kalıp Isıtma Tablası
4. Fişek Tipi Rezistans
5. Test Kalıbı Modeli
6. Sıcaklık Kontrol Ünitesi
7. Elektrik Sayacı
8. Veri İzleme ve Kayıt (Datalogger)

#### 3.1.2.1 Ana Gövde (Şasi)

Ana Gövde(Şasi), üzerinde 950x550x20 mm boyutunda Alüminyum tabla, izolasyon plakaları, fişek tipi rezistanslar monte edilmiş ısıtma tablası, test kalıbı modeli, sıcaklık kontrol ünitesi ve elektrik panosunu taşıyabilecek özellikte tasarlanmıştır. Profil parçaların kaynaklı imalat ile birleştirilmesi ile şasi oluşturulmuştur. Aşağıda Şekil 3.2'de Ana Gövde (Şasi) gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Ana Gövde (Şasi)



### 3.1.2.2 İzolasyon Plakası

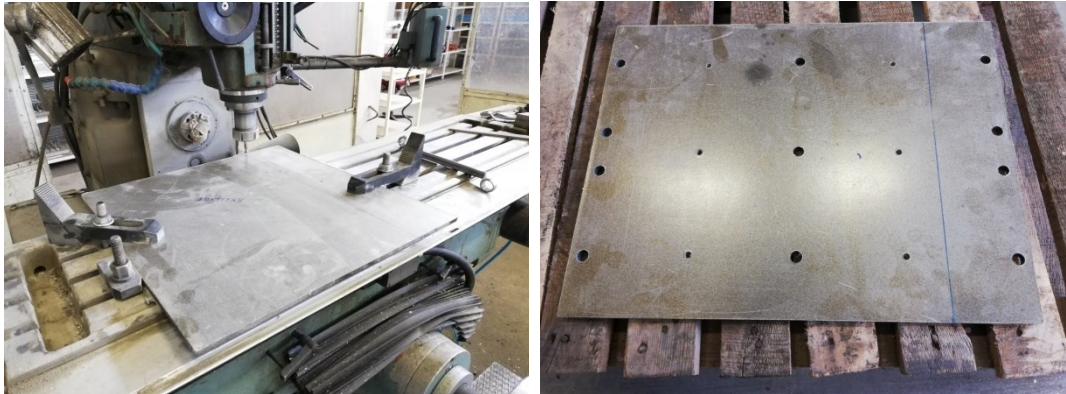
İzolasyon plakaları, thermoform kalıpta kurutma sistemlerinin yalıtımının sağlanması ve ısı kayıplarının engellenmesi için hayati öneme sahiptir. Sistemin etkili şekilde yalıtımının sağlanması ile enerji kayıpları azalır ve ayrıca makina parçalarının sıcaktan etkilenmesi önlenir. Bu sebeple seçilen izolasyon plakasının mekanik ve ısıl izolasyon özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Thermoform kalıpta kurutma sistemleri, yüksek sıcaklık ve basınç içeren çalışma koşullarına sahip olduğu için seçilen izolasyon plakasının düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet özelliklerini taşıması gerekmektedir.

Sistem şartları gözönünde bulundurularak, aşağıdaki özelliklere sahip izolasyon plakası seçilmiştir:

**Tablo 3.1** Elisto Thermostar HD 800 İzolasyon Plakası Teknik Özellikleri (Matweb.com, 2020)

Maksimum Çalışma Sıcaklığı	Termal İletkenlik	Basınç Dayanımı (23°C)	Basınç Dayanımı (200°C)
800°C	0.290 W/m <sup>2</sup> K	400 MPa	200 MPa

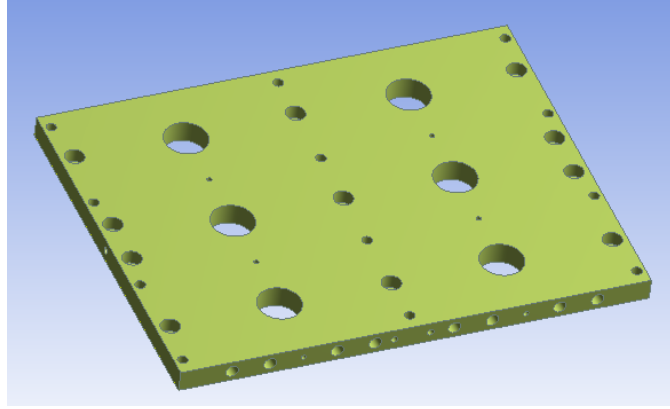
İzolasyon plakasının et kalınlığı standart olarak 8 mm'dir. Isıtma tablasının boyutları referans alınarak, 490x375x8 mm ölçülerinde 3 Adet izolasyon plakası hazırlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.3'te izolasyon plakaları gösterilmektedir.



**Şekil 3.3** İzolasyon plakası

### 3.1.2.3 Kalıp Isıtma Tablası

490x375x23 mm boyutlarında ısıtma tablası talaşlı imalat yöntemi ile imal edilmiştir. Isıtma tablasında, 13 mm çapında 8 Adet rezistans deliği mevcuttur. Aşağıda Şekil 3.4'te kalıp ısıtma tablasının tasarım görseli yer almaktadır.



Şekil 3.4 Kalıp Isıtma Tablası Tasarım Görseli

Aşağıda Şekil 3.5'de kalıp ısıtma tablasının CNC tezgahında işlem görme anı yer almaktadır.



Şekil 3.5 Kalıp Isıtma Tablasının CNC Tezgahta İşlem Görme Anı

### 3.1.2.3.1 Malzeme Seçim Kriterleri

Termoform kalıpta kurutma sistemi aşağıdaki koşulları içermektedir;

- Yüksek pres kuvveti ( $\cong$  3 ton pres kuvveti),
- Yüksek sıcaklık değerleri ( $\cong$  200°C-350°C),
- Korozif bir ortam

Seçilen malzemenin yukarıda bahsedilen koşullara karşı üstün özellik göstermesi gerekmektedir. Ayrıca rezistans ile ısıtılan bir sistem olmasından dolayı yüksek ısıl iletkenlik kabiliyetine sahip olması gerekmektedir.

Kalıp ısıtma tablası malzeme seçiminde aşağıdaki kriterleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir;

- Korozyon Direnci

Korozyon, bir metal veya alaşım ile çevresindeki ortam arasındaki elektrokimyasal reaksiyonun yıkıcı sonucudur (Jones 1996). Korozyonun hızı, ortam koşullarına göre değişir. Aktif bir korozif ortamın olduğu her yerde meydana gelebilir. Bununla birlikte, korozyonun biçimleri, korozyon sürecini etkileyen faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Korozyonun şekli, çukurlaşma ve çatlak gibi daha genel veya hidrojen gevrekleşmesi ve gerilme korozyonu çatlama gibi daha spesifik olabilir (Fontana 1986).

Başlıca korozyon türleri aşağıdaki gibidir (Safuiddin 2006):

- Atmosferik Korozyon
- Galvanik Korozyon
- Çatlak Korozyonu
- Çukurcuk(Pitting) Korozyonu
- Mikrobiyolojik Korozyon
- Mukavemet

Mukavemet en önemli malzeme özelliklerinden biridir ve diğer özellikler de buna bağlı olarak değişir. Malzemenin iç yapısında kalıcı bir değişim veya kırılma oluşturan herhangi bir gerilme sınırı mukavemet olarak tanımlanır. Cisimlerin uygulanan dış kuvvetlere gösterdiği tepkiye mekanik davranış denir. Sürekli artan kuvvet altında önce şekil değiştirme başlar. Yük bir sınırı aşarsa kırılma meydana gelir (Aktaş 2016).

- Isı Transfer Özelliği

Malzemelerin termal fiziksel özellikleri, mühendislik malzemelerinin önemli karakteristik parametrelerindedir. Isı iletkenlik katsayısı genellikle metallerde yüksek, seramik ve plastiklerde düşüktür (Wiley 2002).

- Kararlılık

Malzemenin kararlılığı, doğrudan sıcaklığa, sıcaklık dalgalanmasına ve bu sıcaklıkta uzun süre kalıp kalmamasına bağlıdır. Malzemenin kararlı çalışmasını en çabuk sıcaklık ve dalgalanmaları bozabilir. Mukavemeti etkiler, sürünmeye ve iç yapı değişikliklerine sebep olur (Fındık 2009).

- Elde Edilebilirlik

Malzemenin kolay veya zor bulunması elde edilebilirlik açısından önemli bir kriterdir. Malzeme kolay bulunamıyorsa tasarımını yapmak bir anlam ifade etmeyecektir. Malzemenin tek bir imalat yöntemi ile elde edilmesi dezavantajdır. Seçilen malzemenin nerelerden temin edilebildiğine dikkat edilmelidir. Sadece yurtdışından temin edilebiliyorsa risk teşkil etmektedir (Fındık 2009).

- İşlenebilirlik

Talaşlı imalat sektöründeki ana problemlerden birisi “işlenebilirlik”tir. Bir üretim sürecinde işlenebilirlik, kesici takımın iş parçasını kesebilme ve iş parçasının da kesilebilme yeteneklerinin ölçüsüdür (Çini 2010).

- Maliyet

Temel olarak mekanik vb. özelliklere göre seçimi yaptıktan sonra, son kararı verebilmek için en önemli adım “maliyet” olacaktır. Performans analizi yapıldıktan sonra; yani performans kriterleri belirlendikten sonra bu analiz sonuçlarını karşılayacak olan parçanın üretilmesi için gerekli maliyet ve harcamalar neler olacaktır; bunların da belirlenmesi gerekmektedir. Donanımın bir parçasının ilk maliyeti, hammadde, üretim ve taşıma maliyetlerini de kapsar (Fındık 2009).

### 3.1.2.3.2 Kalıp Isıtma Tablası Malzemesi

Isıtma tablası malzemesi olarak, X38CrMo16 (1.2316) kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. DIN 1.2316 paslanmaz çeliği, iyi aşınma ve korozyon direncine, iyi mekanik özelliklere sahip önsertleştirilmiş bir plastik kalıp çeliğidir. Parlatılabilirliği iyidir ve manyetiktir.

#### **X38CrMo16 (1.2316) Paslanmaz Plastik Kalıp Çeliği Özellikleri**

**Tablo 3.2** X38CrMo16 Malzemesinin Standartları (Kalitemetalürji.com, 2020)

Malzemenin Standartları		
DIN	AISI / ASTM	EN
1.2316	420	X38CrMo16

**Tablo 3.3** X38CrMo16 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (Kalitemetalürji.com, 2020)

Malzemenin Kimyasal Bileşimi (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Ni
0.33-0.45	1.00	1.50	0.03	0.03	15.50-17.50	0.80-1.30	-	-	1.00

**Tablo 3.4** X38CrMo16 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (Kalitemetalürji.com, 2020)

Malzemenin Fiziksel Özellikleri		
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K*10-6)	Isı İletkenliği (20°C) (W/mK)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
10,3-11,6	19,6	7,85

**Tablo 3.5** X38CrMo16 Malzemesinin Isıl İşlem Bilgisi (Kalitemetalürji.com, 2020)

Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı (°C)	Yumuşatma Tavlama Sıcaklığı (°C)	Gerilim Giderme Sıcaklığı (°C)	Sertleştirme		Meneviş Sıcaklığı (°C)	
			Ostenitleme Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HRc)		
850-1100	700-750	600-650	1020	Hava	50-52	200
				Yağ	50-52	300
			400			
			500			

### 3.1.2.3.3 Kalıp Isıtma Tablası İçin Malzeme Önerileri

Ürün geliştirme ve tasarımında malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır. Pazardaki ürünlerin başarısı ve rekabeti için de hayati öneme sahiptir, Çünkü verimlilik ve alıcı ihtiyaçlarının karşılanması gerekir. Ayrıca yanlış malzeme seçimi montajın başarısız olmasına veya hayal kırıklığına uğramasına neden olabilir ve ürünlerin verimliliğini, performansını önemli ölçüde düşürerek, üretkenliği, karlılığı olumsuz etkileyebilir (Kumar ve diğ. 2014). Tasarımın ihtiyaçlarını en iyi karşılayan, maksimum performans ve minimum maliyet veren malzemelerin seçilmesi optimum ürün tasarımının hedefidir (Shanian ve Savadogo 2005).

Kalıp ısıtma tablası için seçilen X38CrMo16 (1.2316) kalite paslanmaz çelik malzemeye ek olarak yukarıdaki kalıpta kurutma sistem koşulları ve malzeme seçim kriterleri dikkate alınarak alternatif malzemeler belirlenmiştir.

Seçilen alternatif malzemeler; Cupral 8 Alüminyum Bronzu ve Cupro B2 Berilyumlu Bakır Alaşımı'dır.

### Cupral 8 Alüminyum Bronzu Özellikleri

Alüminyum bronzları %14'e kadar alüminyum içeren bakır esaslı alaşım ailesidir. Diğer alaşımların sunamadığı mekanik ve kimyasal özellikleri alüminyum bronzları sunar. Bu özellikler alüminyum bronzlarına bir çok üstünlükler sağlar. Sertlikleri 40-42 RC'ye kadar çıkan cinsleri vardır. Makina, kalıp ekipmanı ve saç, plastik kalıp malzemesi olarak bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Alüminyum bronzunun başlıca avantajları ; üstün mukavemet, üstün korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilme, yüksek yorulma dayanımı, oksidasyon dayanımıdır.

**Tablo 3.6** Cupral 8 Malzemesinin Standartları (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Standartları	
Cupral 8 Alüminyum Bronzu	Kodu
	CuAl14Fe4Mn2Co

**Tablo 3.7** Cupral 8 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Kimyasal Bileşimi (%)					
Al	Fe	Mn	Co	Cu	Diğer
13.8	4	2.2	1	Kalan	1

**Tablo 3.8** Cupral 8 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Fiziksel Özellikleri		
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K*10-6)	Isı İletkenliği (20 °C) (W/mK)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
15	33	7

**Tablo 3.9** Cupral 8 Malzemesinin Mekanik Özellikleri (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Mekanik Özellikleri					
Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (kN/mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (20°C) (kN/mm <sup>2</sup> )	Uzama (L=5D) (%)	Basma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
360-400	550-700	500-600	120	1	1580

### **Cupro B2 Berilyumlu Bakır Alaşımı Özellikleri**

Bakırın içerisine ilave edilen alaşım elementleri bakır kafesinde çözünerek veya gerektiğinde yeni fazlar meydana getirerek mekanik özellikleri artırır. Bunlardan örneğin Cr, Zr, Be ise alaşımın ayrıca çökeltme yoluyla sertleştirilebilmesini sağlar. Çökeltme sertleşmesi veya benzer adıyla yaşlandırma yöntemi kullanılarak iletkenlik ve mekanik özellikleri birlikte yükseltilebilir. Sert bakır alaşımları da bu sertleştirme mekanizması kullanılarak geliştirilen ve çok geniş kullanım alanı bulan alaşımlardır. Cupro B2, sertliği en yüksek bakır alaşımıdır. Çelik sertliğine yakın bir sertlikte kullanılır.

**Tablo 3.10** Cupro B2 Malzemesinin Standartları (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Standartları		
Cupro B2 Berilyumlu Bakır Alaşımı	Kodu	DIN
	CuBe2	17672

**Tablo 3.11** Cupro B2 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Kimyasal Bileşimi (%)				
Be	Co	Ni	Cu	Diğer
2	0.5	0.5	Kalan	0.5



**Tablo 3.12** Cupro B2 Malzemesinin Fiziksel Özellikleri (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Fiziksel Özellikleri		
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K*10-6)	Isı İletkenliği (20 °C) (W/mK)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
17	106	8.3

**Tablo 3.13** Cupro B2 Malzemesinin Mekanik Özellikleri (Saglammetal.com, 2020)

Malzemenin Mekanik Özellikleri				
Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (kN/mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (20°C) (kN/mm <sup>2</sup> )	Uzama (L=5D) (%)
340-390	1100-1300	1000	128	4-5

#### 3.1.2.4 Kalıp Isıtma Yöntemi

Kalıpların ve kalıp elemanlarının yüzeyini ısıtma, çoğu imalat prosesinde geçerli genel bir prosedürdür. Kalıp yüzeyini ısıtmak için bir takım seçenekler mevcuttur. Örneğin, kalıp yüzeyinin içini veya dışını konveksiyonla ısıtmak için bir termal akışkan kullanılabilir. Diğer yöntemler arasında radyan ısıtıcılar, elektrik dirençli ısıtıcılar mesela fişek tipi rezistanslar, indüktif ısıtma elemanları varsayılabilir. Belirli bir uygulama için bir ısıtma tekniğinin seçimi, birkaç anahtar parametreye tabi olabilir:

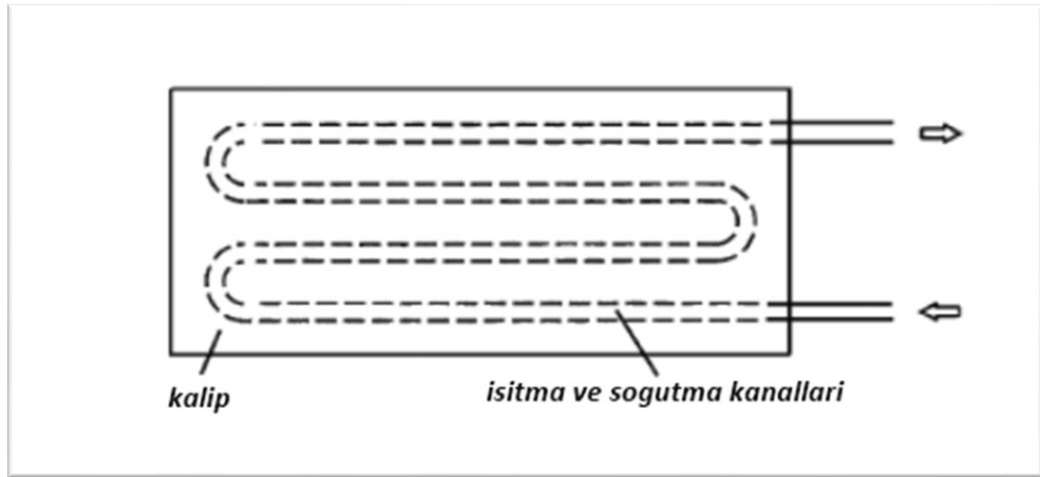
- **Isıtma süresi:** Isıtma için uygun zaman, örneğin çevrim süresi ile sınırlı olabilir.
- **Homojen ısı dağılımı:** Kalıp yüzeyindeki en soğuk ve en sıcak nokta arasındaki sıcaklık farkını en aza indirmek gerekebilir.
- **Hedef sıcaklık:** Ulaşılabilecek maksimum sıcaklık her ısıtma yöntemi için farklıdır.
- **Yüzey şekli:** Üç boyutlu bir kalıp yüzeyinin düz bir yüzeyden eşit şekilde ısıtılması daha zordur. Bu nedenle, bazı ısıtma yöntemleri karmaşık kalıp geometrileri için uygun değildir.

- Enerji talebi: Gerekli olan enerji miktarının üretim maliyetleri ve üretilen ürünün karbon ayakizi üzerinde etkisi vardır.
- Maliyetler: Kalıp ısıtma ile ilgili maliyetler, ısıtma sisteminin yatırım maliyetlerini, bakım maliyetlerini ve devam eden enerji maliyetlerini içerir.

○ Isıtma Yöntemleri

• Isıtma ve Soğutma Kanalları

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi kalıpta ısıtma ve soğutma kanalları, plastik kalıplı üretim yöntemlerinden en basit ve en yaygın kullanılan ısıtma ve soğutma döküm kalıpları metodudur (Mennig 2008).



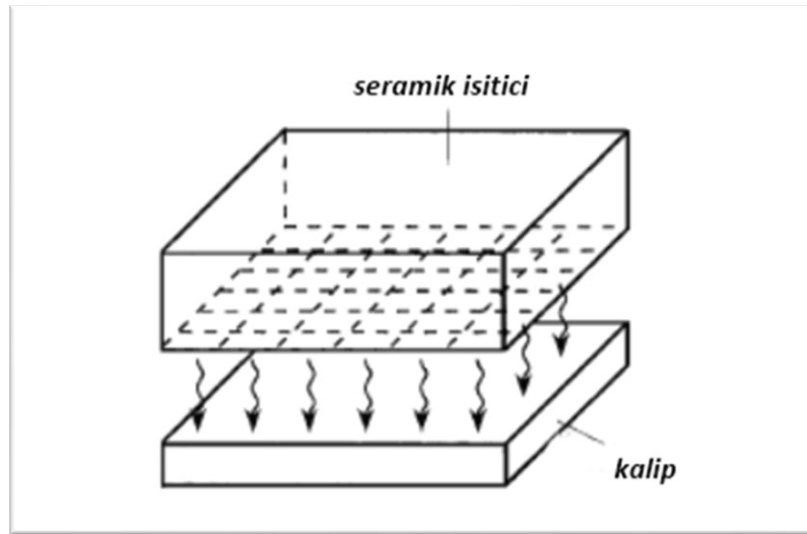
Şekil 3.6 Isıtma ve Soğutma Kanallı Kalıp (Oppelt ve diğ. 2012)

Çoğu durumda ısı transferi için, su (200°C'ye kadar) veya termal akışkan (400°C'ye kadar), minimum maliyetle kalıpta kolayca delinebilen kanallardan geçirilir. Kalıp yüzeyindeki sıcaklık dağılımı kanalların düzeninden etkilenir. Isıtma ve soğutma kanallarının üretimi için özel üretim teknikleri gereklidir. Uyumlu kanallar, delinmiş kanallara göre birçok avantaj sunar (Michaeli ve Schönfeld 2006). Gelişmiş sıcaklık dağılımı sağlamanın yanı sıra, kanalları üretmek için kullanılan yöntem ile daha büyük bir ısı transfer yüzey alanı elde edilir. Diğer yandan dezavantajlar, üretim yönteminin daha karmaşık olması, delinmiş kanallara sahip kalıplara kıyasla maliyetlerin artması, tıkanma riskinin daha yüksek olması ve sarmal kanallardaki basınç düşüşünün daha yüksek olmasını içerir. Isıtma ve soğutma kanallarının genel avantajları, her bir forma uygunluğunun yanı sıra, hem sıcaklık

kontrolü hem de çoklu kalıplar için tek bir su veya termal akışkanlı ısıtıcı kullanma seçeneğini içerir. Sadece yüzey ısıtma gerekli olsa bile, kalıbın büyük bir kısmının ısıtılması, boru sisteminde ısı kaybı olması ve karmaşık üç boyutlu şekillerde ayarlamaların pahalı olması dezavantajına sahiptir.

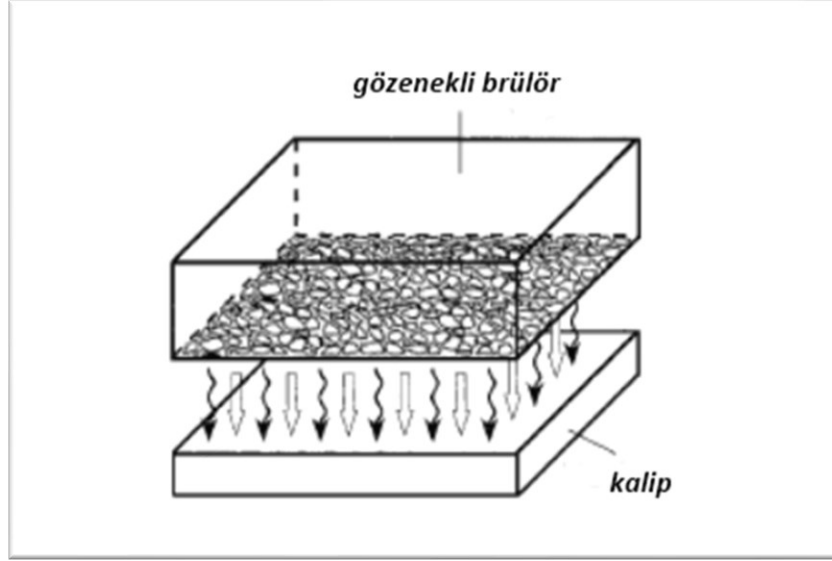
- **Kızılötesi Isıtıcılar**

Bir kızılötesi ısıtıcı, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi kızılötesi lambalardan veya seramik plakalardan oluşabilir.



Şekil 3.7 Seramik Isıtıcılı Kalıp (Oppelt ve diğ. 2012)

Elektrikle ısıtılan plakalar, kalıbın yüzeyini ısıtan kızılötesi radyasyon yayar; Bu ısıtıcı türü, örneğin kurutma sistemlerinde kullanılır, ancak bunlar ayrıca kalıp yüzeyini ısıtma için de uygundur. Seramik kızılötesi ısıtıcıların sıcaklığı 900°C'ye kadar çıkabilir. Diğer radyant ısıtıcı tipleri, termal çıktılarının büyük bir bölümünü kızılötesi radyasyon formunda serbest bırakan brülörleri içerir. Gözenekli bir seramik yapının içinde alevsiz yanmanın (örneğin doğal gazın) gerçekleştiği gözenekli brülörler, radyan brülörlere bir örnektir (Trimis ve Durst 1996). Gözenekli brülörler, iyi yanma özelliklerini (düşük NOx emisyonları dahil), radyasyon ve baca gazı akımı (Şekil 3.8) yoluyla düzgün ısı dağılımı ile birleştirir.

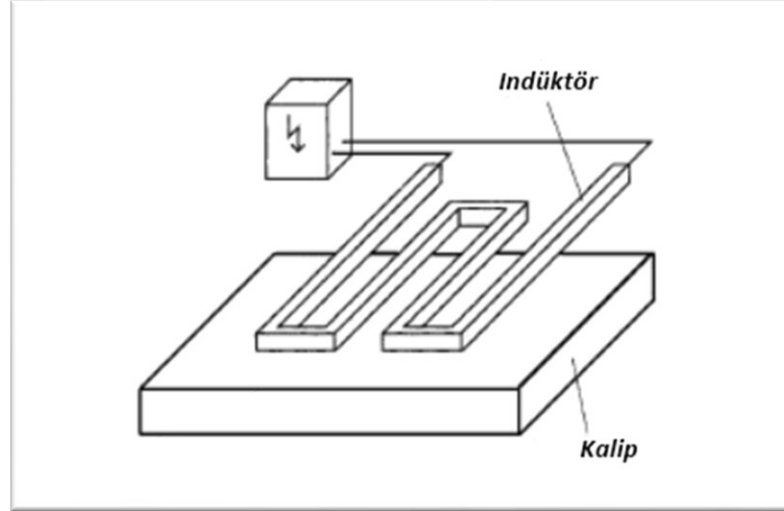


Şekil 3.8 Gözenekli Brülörlü Kalıp (Oppelt ve diğ. 2012)

Brülörün ısı dağıtma yüzeyi hemen hemen her şekilde tasarlanabilir ve bu nedenle ısıtılacak yüzeye uyarlanabilir. Diğer şeylerin yanı sıra, gözenekli brülörler, önısıtmalı döküm kanallarını 1100 ila 1200°C sıcaklığa, kalıcı kalıpları 350°C'ye ve çelik levhaları 250 ila 350°C'ye ısıtmak için kullanılır. Hem elektrikli kızılötesi ısıtıcılar, hem de gazla çalışan radyan brülörler kalıp yüzeyini ısıtmak için kullanılabilir. Karmaşık kalıp geometrisi durumunda, eşit bir sıcaklık dağılımı sağlama avantajı vardır. Kalıp ısıtması için radyasyon kullanmanın en büyük dezavantajı, genellikle çelikten yapılan kalıp yüzeyinin düşük emilim katsayısıdır (Bürkle ve diğ. 2007).

- **Endüktif Isıtma**

Bir indüktörü kalıbın içine (iç indüktör) veya yüzeyinin üstüne yerleştirmek (dış indüktör, bakınız Şekil 3.9) kalıbın en üst katmanında türbülanslı bir akış oluşturur.

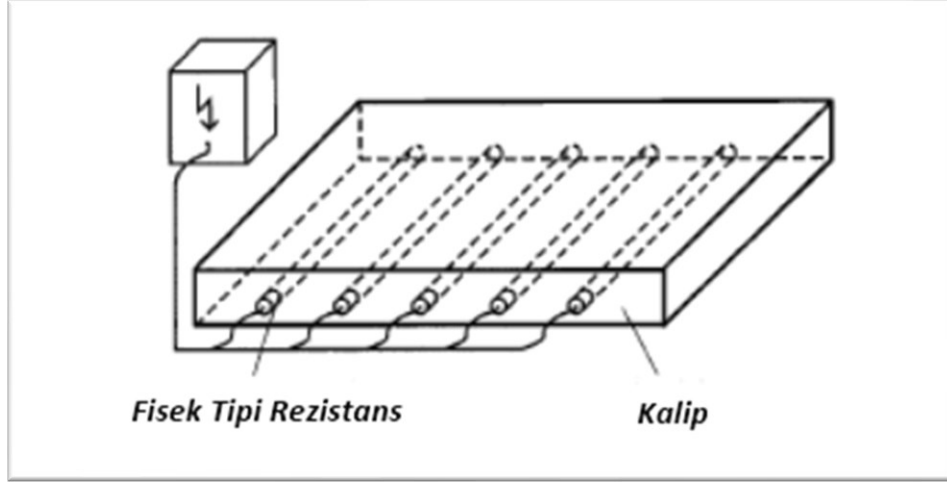


**Şekil 3.9** Dış İndüktörlü Kalıp (Oppelt ve diğ. 2012)

Endüktif ısı üretimi, özellikle dövme endüstrisinde ve metal sertleştirme için kullanılır (Börgerding 1997).  $30.000 \text{ W/cm}^2$ 'ye varan yüksek ısı enerjisi transfer oranları sayesinde, kısa bir sürede  $1300^\circ\text{C}$ 'den yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Endüktif ısıtma özellikle geniş formatlı üç boyutlu geometriler için uygundur (Mennig 2008). Kalıbın içindeki doğrudan ısı üretimi, atmosferdekine göre nispeten daha düşük ısı kayıplarına neden olur. Bunun sonucunda, nispeten düşük enerji maliyetleri ile hızlı ısıtma elde edilir (Favennec ve diğ. 2003). Endüktif ısıtmanın bir dezavantajı, endüksiyon ekipmanının yüksek maliyetidir (Burr ve diğ. 2007).

- **Fişek Tipli Rezistanslı Isıtma**

Fişek tipi rezistanslar günümüzde bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kalıpların ve preslerin ısıtılmasında, su, yağ ve korozif likitlerin ısıtılmasında tercih edilen yüksek kalitede rezistans tipidir.



**Şekil 3.10** Fişek Tipi Rezistanslı Kalıp (Oppelt ve diğ. 2012)

Fişek rezistans, yüksek wattlı fişek rezistanslar, elektrikli ısıtma gerektiren küçük alanlarda ve kalıplarda yüksek wattlarda kullanılarak güçlü ısıtma oluştururlar, böylece ağır şartlar gerektiren çalışma koşullarında mükemmel ısı sağlarlar.

Özel yapım teknolojisi sayesinde, bu tip fişek rezistanslar ısıtma elemanlarının en gelişmiş modelidir. Rezistans telinin tümü, fişek rezistansın ekseninde bulunan seramik taşın etrafında eşit hadde aralıkları ile sarılarak magnezyum oksit tozu ile dış boru kılıfından izole edilip kalibre edilerek üretilir. Rezistans teli ile boru kılıfı arasındaki MgO tozunun inceliğinden dolayı hızlı ve verimli ısı oluşur ve bu sayede daha az enerji ile daha çok ısı elde edilir.

Rezistanslı ısıtıcıları kullanırken dikkat edilmesi gereken bir takım durumlar vardır. Bunlar şu şekildedir: Nemli ortamlarda kullanılan veya uzun süre kullanılmayan rezistanslar tekrar kullanılmak istendiğinde kısa aralıklarla ısıtılarak alıştırmalıdır. Daha verimli çalışabilmek için rezistansın yüzeyi yağ, kireç v.s. yabancı maddelerden arındırılmalıdır. Enerji uçlarının sıvı ile teması engellenmelidir. Eğer sıvıya temas edecek ise, izoleli tip fişek rezistans tercih edilmelidir. Kalıp içerisinde çalıştırılmak üzere tasarlanmış rezistanslar kalıp dışında kullanılmamalıdır. Rezistansın yüzey yükünü (W/cm) hafifletmek için mümkün olan en çok sayıda rezistans kullanılmalıdır. Kalıplarda birden fazla rezistans kullanıldığında, iki rezistans arası mesafe en az rezistansın çapına eşit olmalıdır. Genel kural olarak rezistansların birbirlerine rezistansın çap ölçüsünden daha yakın yerleştirilmesi tavsiye edilmez. Rezistansın takılacağı yuvanın deliği çok düzgün ve pürüzsüz olmalı, mümkün ise raybalama yapılmalıdır. Rezistans deliğe mümkün olduğunca sıkı oturmalıdır. Rezistans delikten çıkarılırken deliğe zarar vermemek için dikkatli

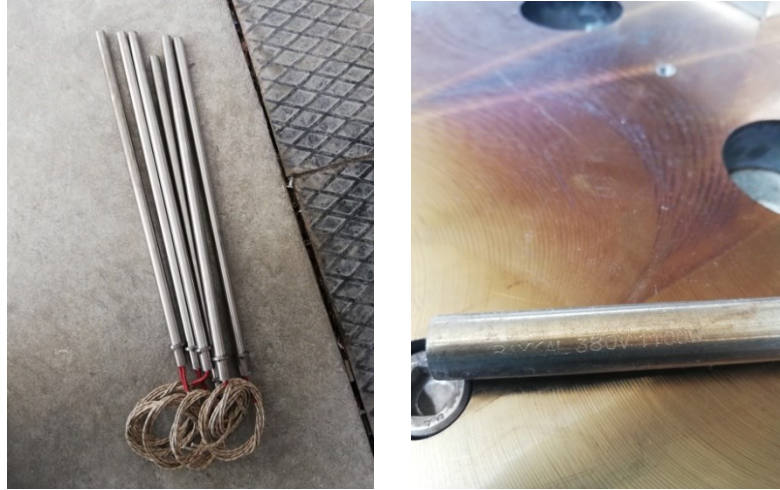
olunmalı, deliğe yabancı cisim sokulmamalıdır. Kablo çıkışları fiziksel darbelerden, zedelenmelerden, aşırı ısıdan, nemden ve aşırı gerilmelerden v.s. korunmalıdır. Rezistansın ömrünü uzatabilmek ve istenen ısı değerlerinde kullanabilmek için uygun ısı kontrolü yapılmalıdır. Kullanılacak termokuplun algılayıcı ucu rezistans yüzeyine mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilmelidir. Rezistans soğumadan değiştirme işlemi yapılmamalıdır.

Kalıpta ısıtma test düzeneği için de, thermoform viyol üretim makinalarında kullanılan fişek tipli rezistans tercih edilmiştir.

Rezistanslı kalıp ısıtma sisteminde aşağıdaki teknik özelliklere sahip 8 adet Baykal marka fişek tipi rezistans kullanılmıştır.

**Tablo 3.14** Fişek Tipi Rezistans Teknik Özellikleri (Baykalrezistans.com, 2020)

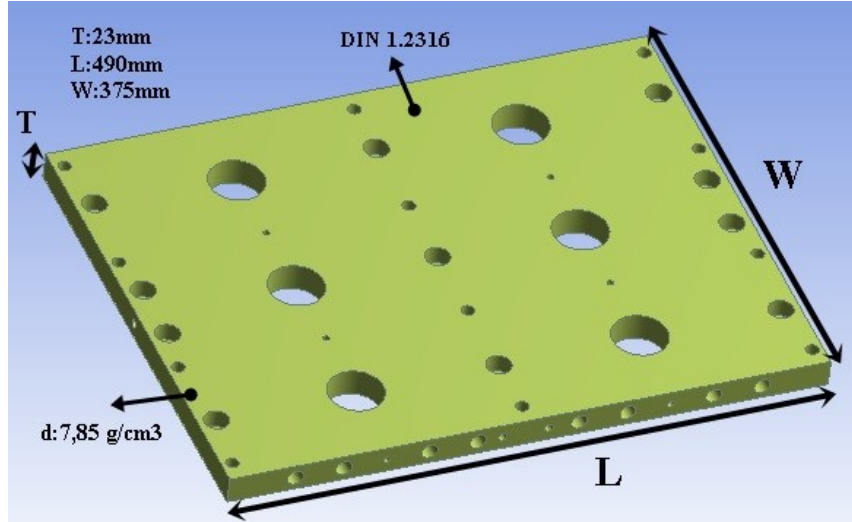
Fişek Tipi Rezistans Teknik Özellikleri			
Çap (D) mm	Boy (L) mm	Volt (V)	Watt (W)
½'' (12,7 mm)	375	380	1100



**Şekil 3.11** Fişek Tipi Rezistans

### 3.1.2.4.1 Gerekli Isının Hesaplanması

490x375x23 mm boyutlarındaki bir ısıtma tablasını ısıtmak için gerekli rezistansın sahip olması gereken gücü hesaplamak gerekmektedir. Gerekli ısının hesaplanması için öncelikle ısıtılacak olan kütlenin ağırlığı bulunur.



Şekil 3.12 Isıtma Tablası Görseli

m : kütle (kg)

T : yükseklik = 23 mm= 2,3 cm

W : genişlik = 375 mm= 37,5 cm

L : uzunluk =490 mm= 49 cm

d : yoğunluk = 7,85 g/cm<sup>3</sup>

m = d x T x W x L = 7,85 x 2,3 x 37,5 x 49 = 33176 g  $\cong$  33 kg

Ağırlık bulunduktan sonra, eldeki veriler aşağıdaki formüle yerleştirerek kütleyi ısıtmak için gerekli güç (W) hesaplanır.

$$W = \frac{m \times C_p \times \Delta T}{0,8604 \times t}, \text{ watt} \quad (\text{Engineering ToolBox, 2011}) \quad (3.1)$$

1 watt = 0,8604 kcal/h

t: tablanın ısınması için geçen süre

t = 1 h (saat)



m : kütle = 33 kg

$C_p$  : özgül ısı = 500 J/kg.K = 0,1194 cal/g.°C

T1= Başlangıç sıcaklığı = 25°C

T2= İstenen sıcaklık = 200°C

$\Delta T$  : Başlangıç sıcaklığı ile istenen sıcaklık arasındaki fark

$\Delta T = 200 - 25 = 175^\circ\text{C}$

$$W = \frac{33 \times 0,1194 \times 180}{0,8604 \times 1} \cong 800 \text{ Watt}$$

Gerekli gücü hesaplarken olası ısı kayıplarının da göz önünde bulundurulması gerekir. Buna göre;

- % 30-60 izole edilmemiş banyo için
- % 20-40 izole edilmiş banyo için
- % 30-40 izole edilmemiş ufak kütleler için
- % 15-30 izole edilmiş ufak kütleler için
- % 35-60 izole edilmemiş ufak kütleler için
- % 25-40 izole edilmiş büyük kütleler için güce ilave edilmelidir

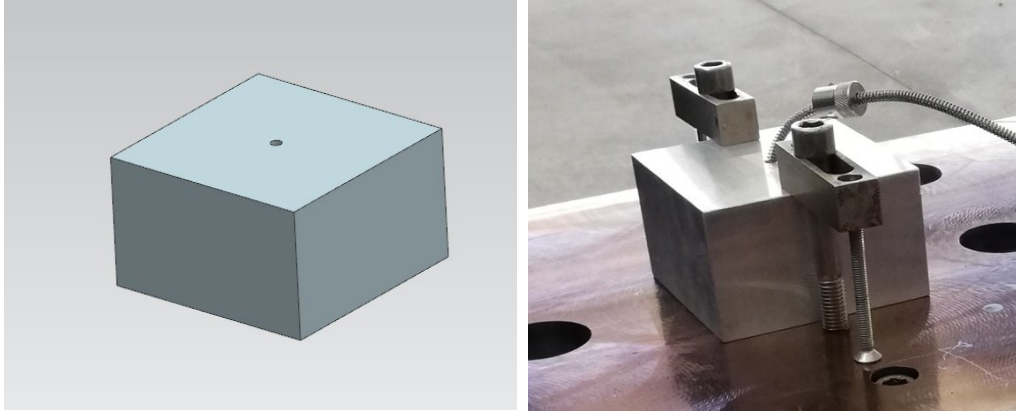
(Isiformrezistans.com, 2020).

Sistemimiz izole edilmiş büyük kütle olarak göz önüne alındığında %25-40 aralığı baz alınmalıdır. Bu referans değerlerine göre 800 Watt 'ın %25-40 aralığı 1000-1120 watt aralığı olmaktadır. Bu sebeple sistem için 1100 Watt'lık rezistans uygun görülmüştür.

### 3.1.2.5 Test Kalıbı Modeli

Test kalıbı modeli için 100x100x60 mm boyutlarında parça seçilmiştir. Kalıp imalatında kullanılan malzeme, Alüminyum (EN-AW 5083) olduğu için, test kalıbı modeli de aynı malzemeden seçilmiştir. Modelin en üstünde M6 dış çapında ve 15 mm derinlikte delik mevcuttur. Bu delikten PT 100 sabitlenerek sıcaklık kontrol cihazı ekranında belirlenen ve set edilen değere sistemin ulaşması hedeflenir.

Aşağıda Şekil 3.13'de test kalıbı modelinin tasarımı ve gerçek görseli gösterilmektedir.



**Şekil 3.13** Test Kalıbı Modeli Tasarımı ve Gerçek Görşeli

### 3.1.2.6 Sıcaklık Kontrol Ünitesi

Test kalıbı modelini ısıtmak için, DIN 1.2316 paslanmaz çelik malzemeden imal edilen bir ısıtma tablası ve 8 Adet fişek rezistans entegre edilmiş bir ısıtma sistemi hazırlanmıştır. DT104 AX Auto-Tune PID sıcaklık kontrol cihazı ve buna bağlı PT100 sıcaklık sensörü ile sistem sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol edilmiş ve set edilen değere sabitlenmiştir. PT100 sıcaklık sensörü, Şekil 3.13'de test kalıbı modelinin üst bölgesinde gösterilen şekilde pozisyonlanmıştır. Sıcaklık kontrol cihazı, 200°C'ye set edilmiştir.

Sıcaklık kontrol ünitesi panosu üzerinde sıcaklık kontrol cihazı ve on-off butonu bulunmaktadır. Panonun içerisinde elektrik sigortası ve Solid State Relay (Ssr Röle) bulunmaktadır. Ssr Röleler, klasik röle ve kontaktörle aynı işi yaparlar. Güç devrelerinin anahtarlanmasında kullanılırlar. Özellikle rezistansın olduğu sürekli tetiklemelerin olduğu alanlarda kullanılması tavsiye edilir.

Aşağıda Şekil 3.14'de sıcaklık kontrol ünitesi panosunun içi gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Sıcaklık Kontrol Ünitesi Panosunun İçi

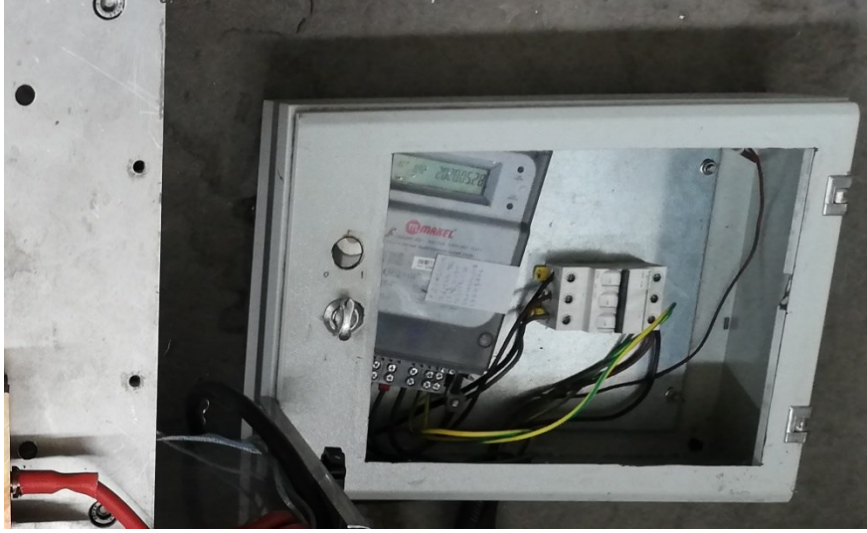
Aşağıda Şekil 3.15’de DT104 AX Auto-Tune PID sıcaklık kontrol cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.15 DT104 AX Auto-Tune PID Sıcaklık Kontrol Cihazı

### 3.1.2.7 Elektrik Sayacı

Makel marka elektrik sayacı sisteme eklenerek tüketilen elektrik miktarları da gözlemlenebilmektedir. Farklı izolasyon plakası kalınlıklarında sistemde tüketilen enerji miktarları da karşılaştırılabilecektir. Aşağıda Şekil 3.16'da kullanılan elektrik sayacının görseli yer almaktadır.



Şekil 3.16 Elektrik Sayacı

### 3.1.2.8 Veri İzleme ve Kayıt ( Datalogger)

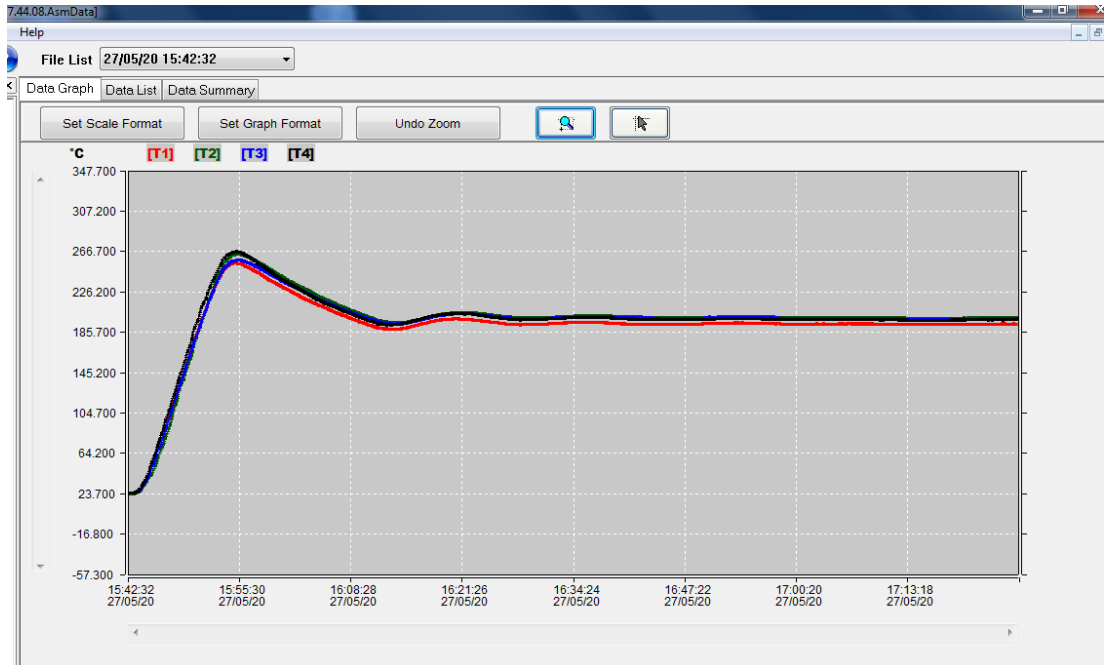
Farklı noktalara yerleştirilen termokupllar ile sıcaklık ölçümünün yapılması ve sıcaklık dağılımının homojen olup olmadığının tespiti amacıyla datalogger cihazı temin edilmiştir. Bu cihaz ile sıcaklık verileri izlenebilmekte ve kayıt edilebilmektedir.

CEM DT-3891G sıcaklık kayıt cihazı, 4 adete kadar K tipi veya J tipi termokupl bağlanabilen, kanal başına 18.000 adet kayıt yapabilen bir datalogger çeşididir. Sistemde K tipi termokupl kullanılmaktadır. K tipi sıcaklık ölçüm aralığı -200°C ile 1372°C aralığındadır. Datalogger cihazının yanında gelen bilgisayar programı ile 4 farklı kanalın kaydetmiş olduğu veriler ayrıntılı olarak incelenip, raporlanabilmektedir.

Aşağıda Şekil 3.17'de CEM DT-3891G sıcaklık kayıt cihazı (datalogger) gösterilmektedir.



Şekil 3.17 CEM DT-3891G Sıcaklık Kayıt Cihazı (Datalogger)



Şekil 3.18 Datalogger Cihazının Yaptığı Kayıttan Grafikselsel Bir Örnek

File List 27/05/20 15:42:32						
Data Graph Data List Data Summary						
No.	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	
1	27/05/20 15:42:32	24.00	23.80	24.10	24.10	
2	27/05/20 15:42:33	24.00	23.80	24.10	24.10	
3	27/05/20 15:42:34	24.00	23.80	24.10	24.10	
4	27/05/20 15:42:35	24.00	23.80	24.10	24.10	
5	27/05/20 15:42:36	24.00	23.80	24.10	24.10	
6	27/05/20 15:42:37	24.20	23.80	24.10	24.20	
7	27/05/20 15:42:38	24.20	23.80	24.10	24.30	
8	27/05/20 15:42:39	24.10	23.80	24.10	24.10	
9	27/05/20 15:42:40	24.10	23.80	24.10	24.10	
10	27/05/20 15:42:41	24.10	23.80	24.10	24.10	
11	27/05/20 15:42:42	24.10	23.80	24.20	24.10	
12	27/05/20 15:42:43	24.10	23.80	24.10	24.10	
13	27/05/20 15:42:44	24.10	23.80	24.10	24.10	
14	27/05/20 15:42:45	24.10	23.80	24.20	24.10	
15	27/05/20 15:42:46	24.10	23.80	24.10	24.10	
16	27/05/20 15:42:47	24.10	23.90	24.20	24.10	
17	27/05/20 15:42:48	24.10	23.80	24.20	24.10	
18	27/05/20 15:42:49	24.10	23.80	24.20	24.20	
19	27/05/20 15:42:50	24.00	23.90	24.20	24.00	
20	27/05/20 15:42:51	24.00	23.90	24.20	24.00	
21	27/05/20 15:42:52	24.00	23.90	24.20	24.00	
22	27/05/20 15:42:53	23.90	23.90	24.20	24.00	
23	27/05/20 15:42:54	23.90	23.80	24.10	24.00	
24	27/05/20 15:42:55	23.90	23.80	24.10	24.00	
25	27/05/20 15:42:56	24.10	23.80	24.10	24.10	
26	27/05/20 15:42:57	24.10	23.80	24.10	24.10	
27	27/05/20 15:42:58	24.10	23.80	24.10	24.10	
28	27/05/20 15:42:59	24.10	23.70	24.10	24.10	
29	27/05/20 15:43:00	24.10	23.80	24.10	24.10	
30	27/05/20 15:43:01	24.10	23.80	24.10	24.10	
31	27/05/20 15:43:02	24.10	23.80	24.10	24.10	
32	27/05/20 15:43:03	24.10	23.80	24.10	24.10	
33	27/05/20 15:43:04	24.10	23.80	24.10	24.10	
34	27/05/20 15:43:05	24.20	23.80	24.10	24.10	
35	27/05/20 15:43:06	24.20	23.80	24.10	24.10	

Şekil 3.19 Datalogger Cihazının Yaptığı Kayıttan Rakamsal Verilerin Bulunduğu Kayıt Örneği

### 3.1.3 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi Montajı

Rezistanslı kalıp ısıtma sistemi bileşenleri, ana gövde (şasi), izolasyon plakası, kalıp ısıtma tablası, fişek tipi rezistanslar, test kalıbı modeli, sıcaklık kontrol ünitesi, elektrik sayacı ve datalogger ile birlikte montajlanmış hali aşağıda Şekil 3.20'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Rezistanslı Kalıp Isıtma Sistemi

## 3.2 Deneysel Analiz

### 3.2.1 Termokupl Kalibrasyonu

Termokupl sıcaklık ölçen termoelektrik bir sensördür. En sık kullanılan tipler J, K, T ve E tipleridir. CEM DT-3891G sıcaklık kayıt cihazının yanında 4 Adet K tipi termokupl mevcuttur. Bu termokupllar ile ölçüme başlamadan önce kalibrasyonunun ve kontrolünün yapılması gerekmektedir.

Bir aletin kalibrasyonunun yapılması için üç ana neden vardır:

1. Ölçü aleti tarafından alınan ölçüm değerlerinin, diğer ölçüm değerleri ile tutarlılığının sağlanması,
2. Ölçü aletinin, ölçüm değerlerinin doğruluğunun tespiti,
3. Ölçü aletinin ölçüm güvenilirliğini sağlamak.

İki farklı alaşımdaki metalin uçlarının kaynatılması sonucunda oluşan bağlantı (junction) noktası, sıcaklığa orantılı olarak küçük bir gerilim sinyali üretir ve bu tür sıcaklık sensörleri, ısılıçift-termokupl olarak adlandırılır.

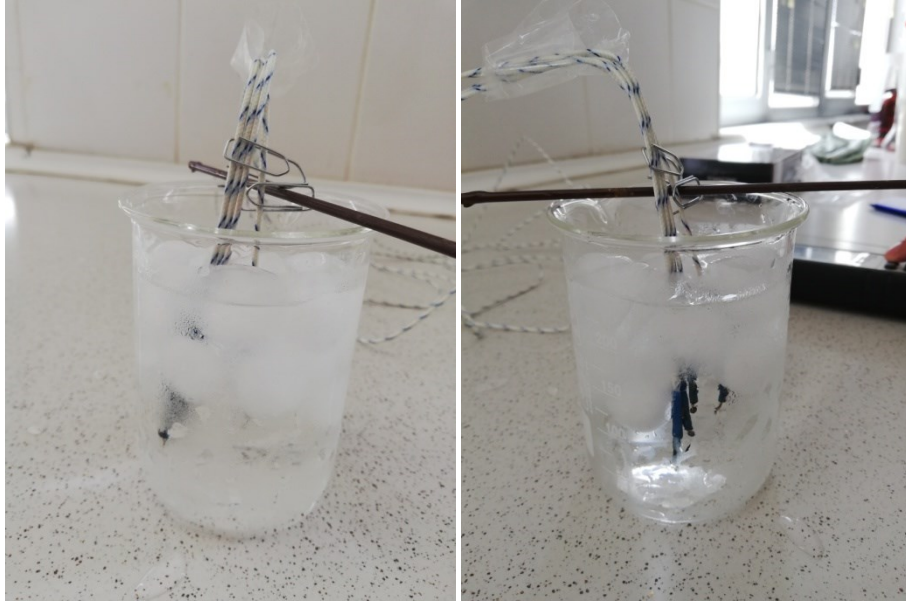
Isılıçift ile sıcaklık ölçümlerinde, referans bağlantı ucu (referans junction) kompanzasyonu, ölçüm doğruluğu için önemli bir etkidir. Harici referans



bağlantı uçları ile buz banyosu kullanılarak, referans bağlantı ucu ölçümü gerçekleştirilebilir, ısı çift uçları genellikle sıcaklık göstergesine doğrudan bağlıdır, bu durumda ortam sıcaklığından dolayı,  $0^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde meydana gelen sapmaların, otomatik olarak kompanzasyonu yapılır. Termometrelerin, geçerli kalibrasyon süresi içindeki performansını kontrol etmek, ve performanslarını kayıt altına almak için, buz banyosu, yada suyun üçlü noktası kullanılır (Netes.com, 2020).

$T_1-T_2$  termokupl çifti arasında kalibrasyon sonrası sıcaklık farkı  $0,1^{\circ}\text{C}$  iken,  $T_3-T_4$  termokupl çiftleri arasında kalibrasyon sonrası sıcaklık farkı  $0^{\circ}\text{C}$ 'dir.  $0,1^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkı bu sistem için göz ardı edilebilir.

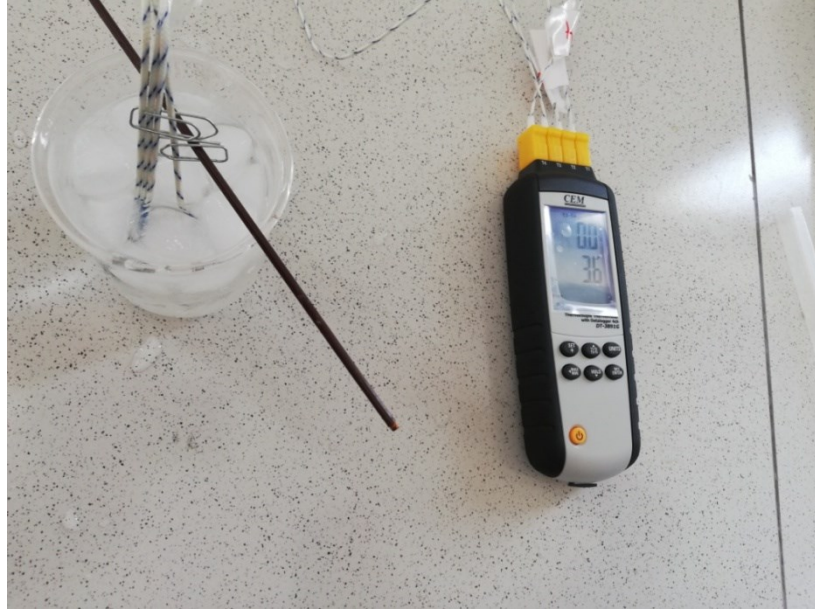
Aşağıda Şekil 3.21'de buz banyosuna konulan ve kalibrasyonu yapılan termokupullar gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Termokupulların Buz Banyosunda Kalibrasyonu

Aşağıda Şekil 3.22'de kalibre edildikten sonra, sıcaklık kayıt cihazında okunan veriler gösterilmektedir. Su-buz karışımı sıcaklığı  $3,6^{\circ}\text{C}$  ve termokupl çifti arasındaki sıcaklık farkı  $0^{\circ}\text{C}$ 'dir.





**Şekil 3.22** Termokuplların Kalibrasyonu ve Sıcaklık Kayıt Cihazında Okunan Veriler

### 3.2.2 Sıcaklık Ölçümleri

Rezistanslı kalıp ısıtma sisteminde test kalıbı modelini (EN-AW 5083) ısıtmak için DT104 AX Auto-Tune PID sıcaklık kontrol cihazı ve buna bağlı PT100 sıcaklık sensörü ile sistem sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol edilmiş ve set edilen değere sabitlenmiştir. Sıcaklık kontrol cihazı, 200°C'ye set edilmiştir.

Datalogger cihazına bağlı olan K tipi 4 adet termokupl, ısıtma tablası (DIN 1.2316) üzerinde farklı yerlerde sabitlenerek ölçümler yapılmıştır. Her bir ölçüm için sistemin tükettiği elektrik enerjisi de hesaplanmıştır. Sistem sıcaklığı 200°C'de denge durumuna gelene kadar ölçümler devam etmiştir. Zamana bağlı olarak sistemdeki sıcaklık değişimleri kayıt altına alınmıştır. Yapılan ölçümler datalogger hafızasına kaydedilmiştir ve ardından bilgisayara veri aktarımı sağlanmıştır.

### 3.2.2.1 Deneysel Veriler

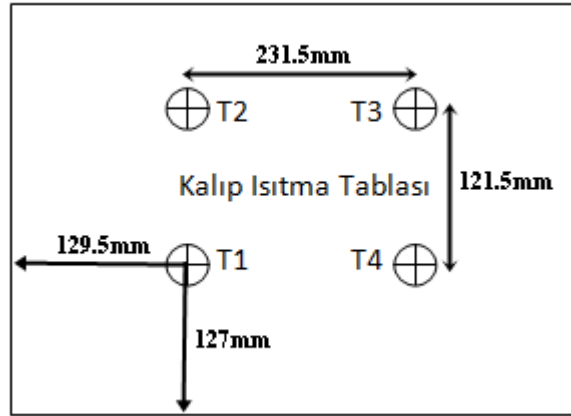
Kalıpta kurutma deney sisteminde, 24 mm kalınlığında (3 adet x 8 mm) izolasyon plakası optimum yalıtım için tercih edilmiştir.

Deneysel sistemin diğer özellikleri aşağıdaki gibidir:

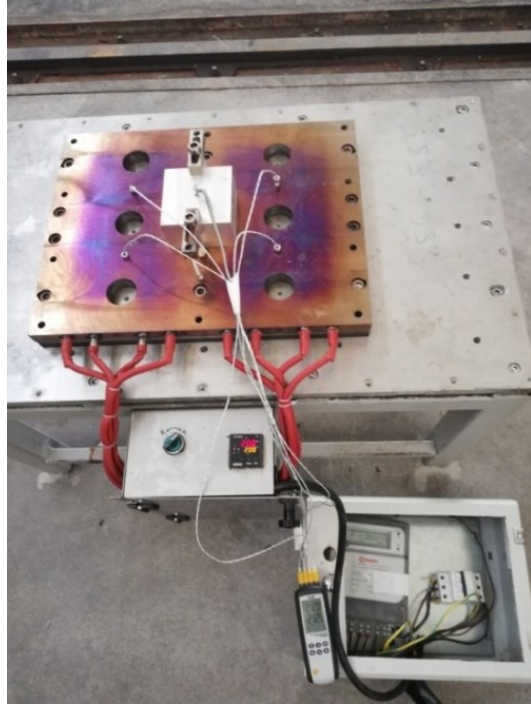
- 4 noktadan sıcaklık ölçümü (T1-T2-T3-T4)
- Sıcaklık set değeri : 200°C
- Isıtma tablası ebatları: 490x375x23 mm
- Rezistans gücü: 380 V-1100 W
- Datalogger veri örnekleme oranı : 1 sn

- **TEST-1**

Aşağıdaki Şekil 3.23’de gösterildiği gibi K tipi 4 adet termokupl ısıtma tablası üzerine yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.23 Test-1 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları



**Şekil 3.24** Test-1 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi

Tablo 3.15’de Test-1’e ait zamana bağlı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 20 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

**Tablo 3.15** Test-1’e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

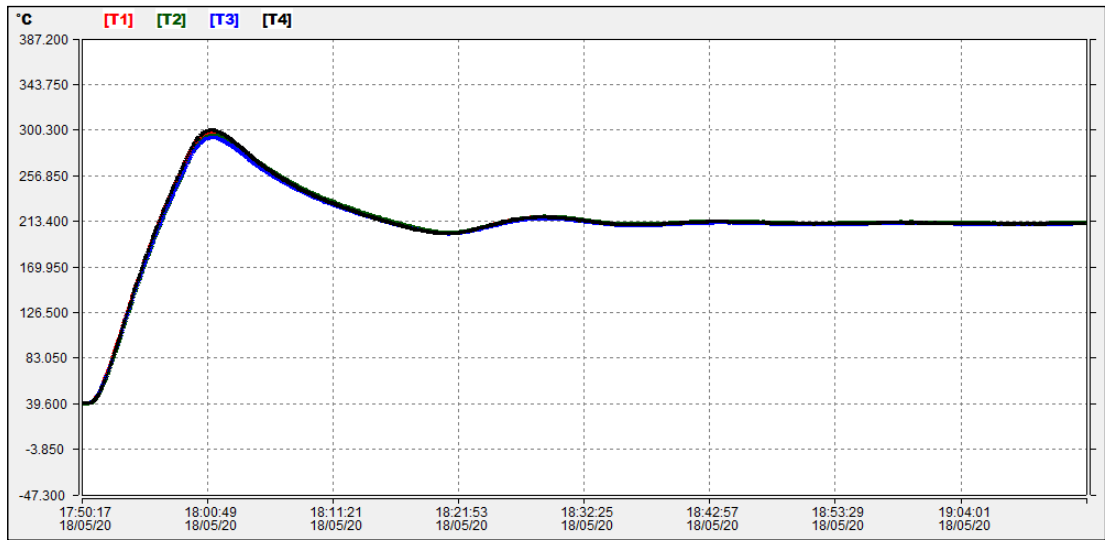
Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
0	39.70	39.90	40.20	40.20
5	167.80	161.80	163.90	167.40
10	293.80	289.70	288.50	295.50
15	268.20	268.70	264.70	268.20
20	235.80	237.10	234.20	235.20
25	215.40	216.70	214.60	214.90
30	202.50	203.30	202.00	202.10
35	211.70	211.90	210.50	211.50
40	217.20	217.30	215.60	216.90
45	211.00	211.40	209.70	210.60
50	211.90	212.30	210.70	211.50
55	213.10	213.50	211.70	212.70
60	211.50	211.90	210.30	211.20
65	211.70	212.20	210.60	211.40
70	212.30	212.80	211.30	212.00
75	211.60	212.10	210.60	211.20
80	211.30	211.70	210.30	210.80

Tablo 3.16’da Test-1’e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.16** Test-1 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
Maksimum	293.80	289.70	288.50	295.50
Minimum	39.70	39.90	40.20	40.20
Ortalama	166.75	164.8	164.35	167.85

Aşağıda Şekil 3.25’de Test-1 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.



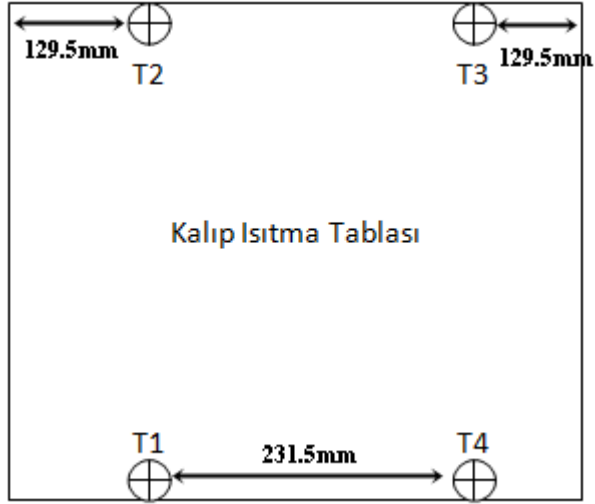
**Şekil 3.25** Test-1 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

Termokupllar ısıtma tablasına yerleştirildiğinde tespit edilen başlangıç sıcaklığı ortalama yaklaşık 40°C’dir. Fişek tipi rezistanslar ile 10 dakika içerisinde maksimum sıcaklığa ulaşılmıştır. 80 dakikalık deneysel ölçüm sonucunda elde edilen maksimum sıcaklık değeri T4 noktasındaki 295.5°C’dir. PID sıcaklık kontrol ünitesi 200°C’ye set edilmiştir. Termokupllardan ölçülen verilerin yüksek olmasının nedeni rezistans çekirdek sıcaklığının 200°C’den yüksek sıcaklığa ulaşmasıdır. Fişek tipi rezistanslarda maksimum yüzey sıcaklığı 750°C dolaylarıdır.

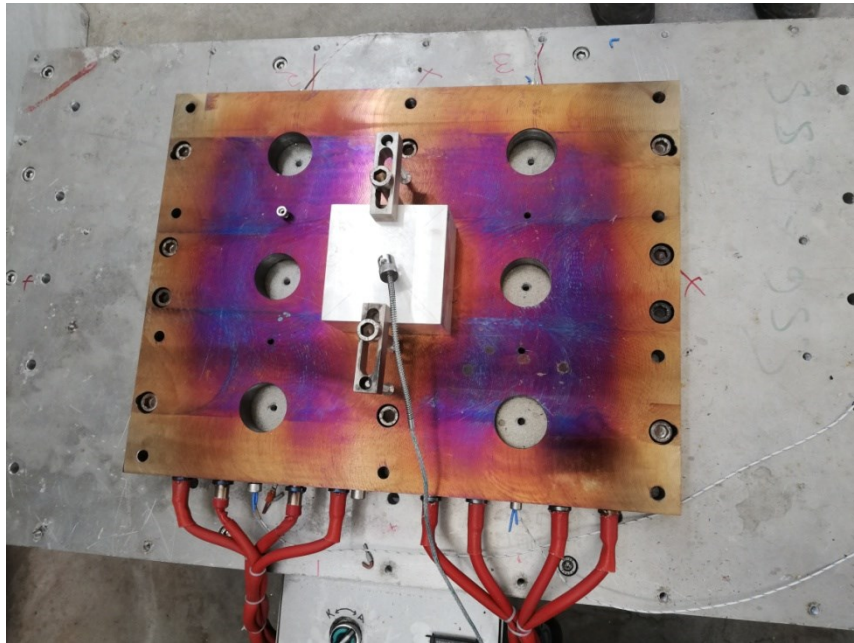
Sistem yaklaşık 45-60 dakika aralığında denge sıcaklığına ulaşmaktadır. Denge halinde termokupllardaki sıcaklık farkı yaklaşık 2°C’dir. T1-T2-T3-T4 termokupllarından denge halinde iken ölçülen ortalama sıcaklık değeri 210-212°C aralığındadır.

- **TEST-2**

Aşağıdaki Şekil 3.26’da gösterildiği gibi K tipi 4 adet termokupl, ısıtma tablasına yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.26 Test-2 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları



Şekil 3.27 Test-2 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi

Tablo 3.17’de Test-2’ye ait zamana bağlı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 20 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

**Tablo 3.17** Test-2'ye Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

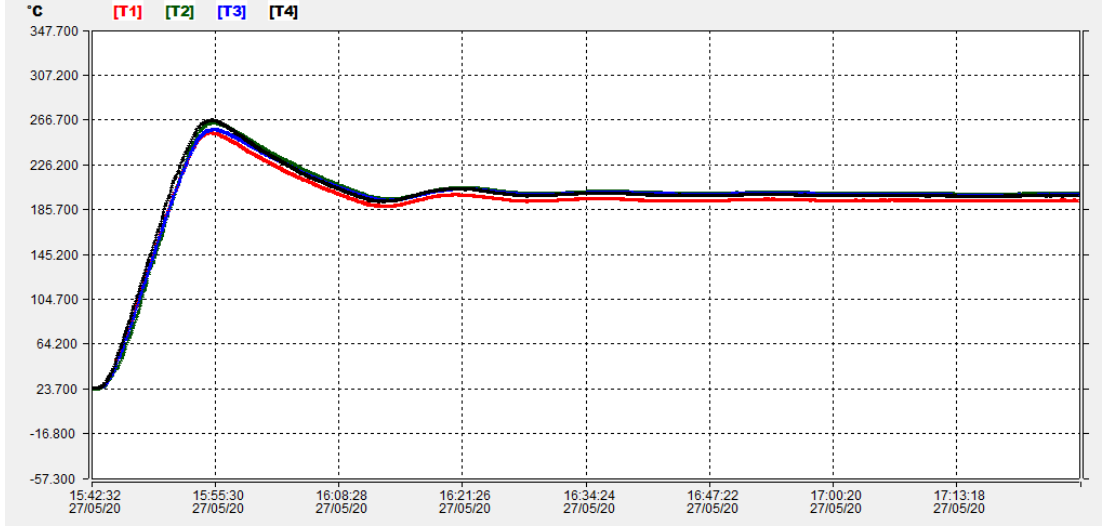
Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
0	24.00	23.80	24.10	24.10
5	106.40	95.30	105.20	113.10
10	228.40	232.00	228.00	238.90
15	246.30	256.70	251.30	255.80
20	222.10	231.60	228.40	229.00
25	202.90	211.20	208.80	207.80
30	189.00	196.10	194.70	193.40
35	195.50	200.80	199.90	201.00
40	198.30	205.30	204.10	203.90
45	193.60	200.60	199.70	198.70
50	194.80	201.00	200.20	199.70
55	195.30	202.20	201.30	200.30
60	193.80	200.80	200.00	198.80
65	193.60	200.30	199.60	198.50
70	194.80	201.20	200.40	199.50
75	194.40	200.90	200.10	198.90
80	193.90	200.40	199.60	198.40

Tablo 3.18'de Test-2'ye ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.18** Test-2 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
Maksimum	246.30	256.70	251.30	255.80
Minimum	24.00	23.80	24.10	24.10
Ortalama	135.15	140.25	137.70	139.95

Aşağıda Şekil 3.28'de Test-2 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.

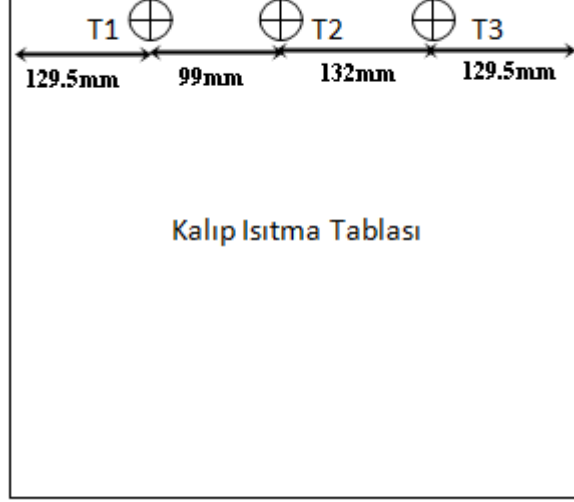


Şekil 3.28 Test-2 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

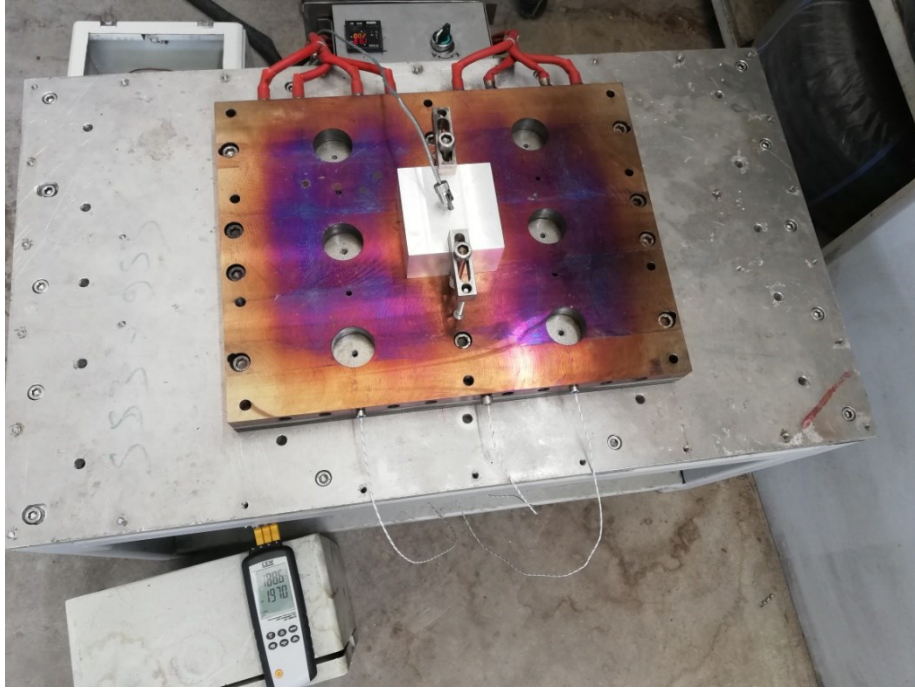
Termokupllar ısıtma tablasına yerleştirildiğinde tespit edilen başlangıç sıcaklığı yaklaşık ortalama  $24^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sistemde termokuplların yerleştirildiği 4 bölgenin sıcaklık ölçümleri dikkate alındığında 15 dakika içerisinde maksimum sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. Sıcaklık kayıt cihazında 2 nolu bölgede ölçülen maksimum sıcaklık  $256.7^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sistem 45-60 dakika arasında dengeye ulaşmaktadır. Sistem denge halinde iken problardan okunan yaklaşık ortalama sıcaklık değerleri T1'de  $195^{\circ}\text{C}$  iken, T2-T3-T4'de  $200^{\circ}\text{C}$  dolaylarıdır.

- **TEST-3**

Aşağıdaki Şekil 3.29’da gösterildiği gibi K tipi 3 adet termokupl, ısıtma tablasına yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.29 Test-3 için T1-T2-T3 Pozisyonları



Şekil 3.30 Test-3 için Termokuplların Isıtma Tablasına Yerleşimi



Tablo 3.19'da Test-3'e ait zamana bağılı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 20 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

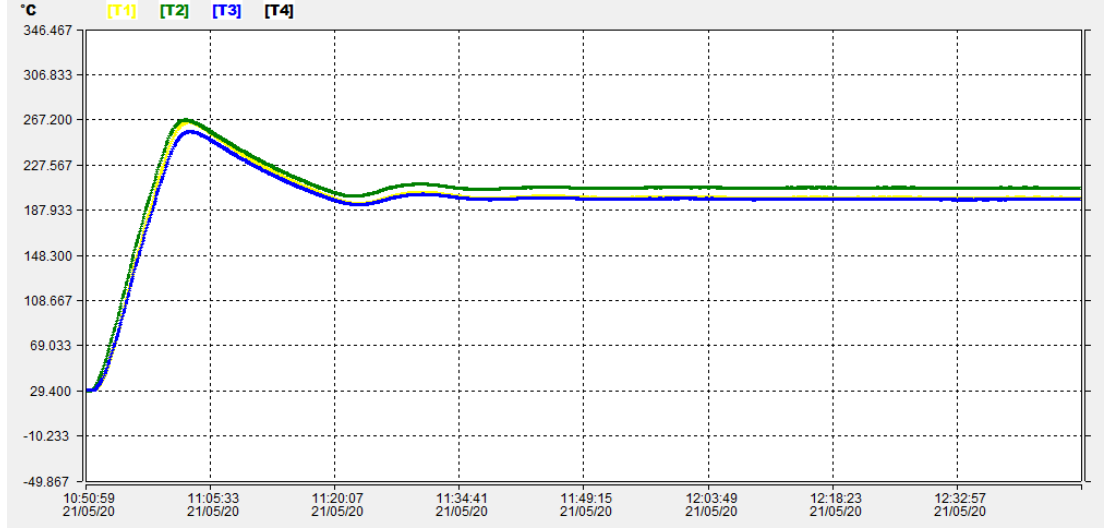
**Tablo 3.19** Test-3'e Ait Zamana Bağılı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)
0	29.60	29.40	29.70
5	115.90	129.90	113.80
10	246.90	255.30	237.90
15	254.00	255.20	247.90
20	229.60	233.30	226.00
25	210.50	215.30	208.50
30	195.90	201.50	194.80
35	198.20	206.00	196.90
40	203.40	210.60	201.80
45	198.90	206.30	197.80
50	199.10	207.30	197.90
55	199.90	207.90	198.50
60	198.90	207.00	197.60
65	199.10	207.60	197.90
70	199.30	207.90	198.20
75	199.00	207.30	197.40
80	198.60	207.30	197.50

**Tablo 3.20** Test-3 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)
Maksimum	254.00	255.20	247.90
Minimum	29.60	29.40	29.70
Ortalama	141.80	142.30	138.8

Aşağıda Şekil 3.31'de Test-3 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.

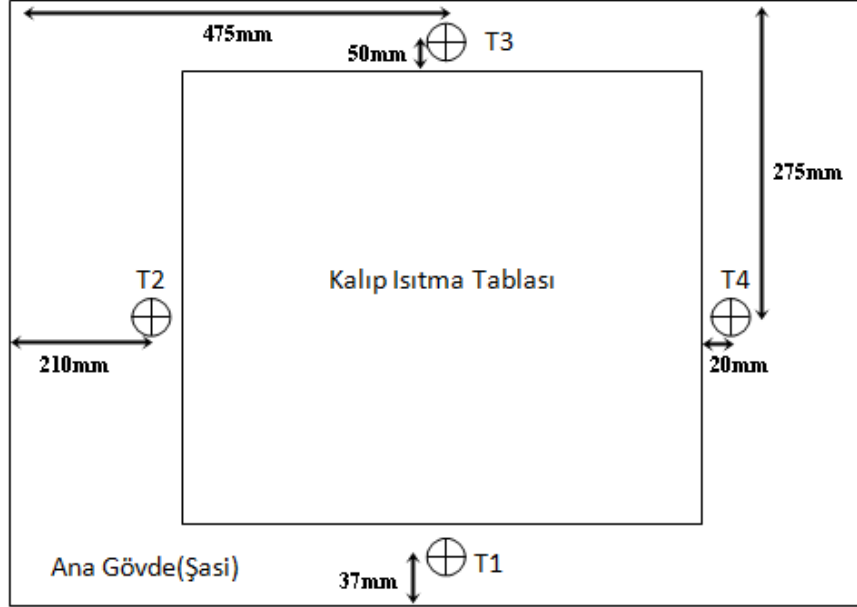


Şekil 3.31 Test-3 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

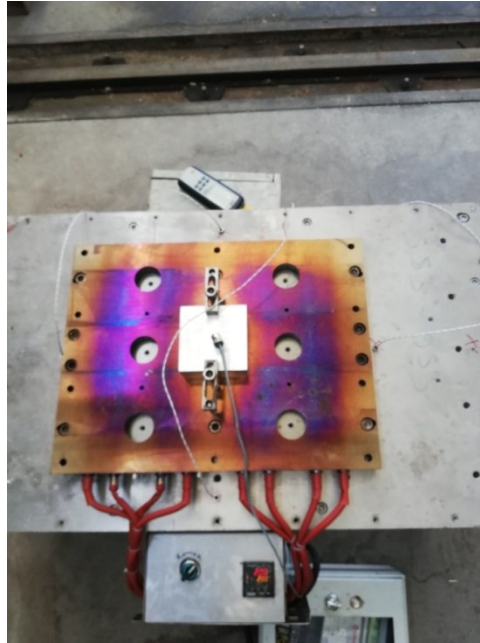
3 adet termokupl tablanın kenar bölgesine pozisyonlandırılmıştır. Termokupllar ısıtma tablasına yerleştirildiğinde tespit edilen başlangıç sıcaklığı yaklaşık ortalama 29°C'dir. Sistemde termokuplların yerleştirildiği 3 bölgenin sıcaklık ölçümleri dikkate alındığında 15 dakika içerisinde maksimum sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. Sıcaklık kayıt cihazında 2 nolu bölgede ölçülen maksimum sıcaklık 255.2°C'dir. Sistem yaklaşık 45-60 dakika içerisinde denge haline ulaşmaktadır. T1 ve T3 termokupllarından sistem denge halinde iken okunan sıcaklık değeri yaklaşık 199°C iken, T2 termokuplundan okunan sıcaklık değeri yaklaşık 207°C ölçülmüştür. Yaklaşık 8°C sıcaklık farkı bulunmaktadır.

- **TEST-4**

Aşağıdaki Şekil 3.32’de gösterildiği gibi K tipi 4 adet termokupl, ana gövdeye(şasi) yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.32 Test-4 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları



Şekil 3.33 Test-4 için Termokuplların Ana Gövdeye Yerleşimi

Tablo 3.21’de Test-4’e ait zamana bağlı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 45 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

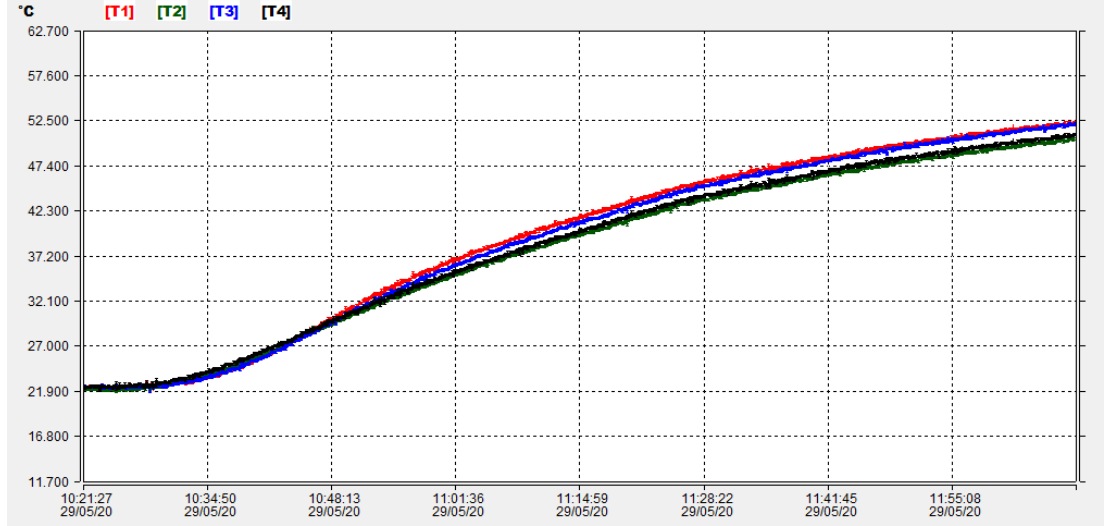
**Tablo 3.21** Test-4'e Ait Zamana Bağılı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
0	22.30	22.20	22.40	22.30
5	22.60	22.10	22.30	22.70
10	22.80	22.80	22.70	23.10
15	24.00	24.40	24.10	24.70
20	26.30	26.30	25.90	26.80
25	29.00	28.60	28.60	28.90
30	31.90	30.80	31.30	31.20
35	34.30	33.00	33.90	33.20
40	36.80	35.10	36.20	35.30
45	38.60	36.70	37.90	37.10
50	40.50	38.40	39.80	38.90
55	42.20	40.00	41.40	40.50
60	43.60	41.60	43.10	42.00
65	45.10	43.10	44.60	43.50
70	46.30	44.20	45.80	44.70
75	47.30	45.30	46.90	45.70
80	48.40	46.40	48.00	46.80
85	49.30	47.20	48.90	47.80
90	50.10	48.00	49.70	48.50
95	50.70	48.80	50.50	49.30
100	51.50	49.50	51.20	50.10
105	52.20	50.20	51.90	50.80

**Tablo 3.22** Test-4 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
Maksimum	52.20	50.20	51.90	50.80
Minimum	22.30	22.10	22.30	22.30
Ortalama	37.25	36.15	37.10	36.55

Aşağıda Şekil 3.34'de Test-4 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.34 Test-4 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

Test-4 aşamasında alüminyum plakaya yerleştirilen 4 adet termokupldan ölçülen başlangıç sıcaklık değerleri yaklaşık 22°C'dir. Sistem 1 saat 45 dakika ölçüm sonucunda henüz ısıl dengeye ulaşma aşamasındadır. Tablada ölçülen maksimum sıcaklık değeri 52.20°C'dir. Isıtma tablasının arkasında kullanılan 3 adet 8mm kalınlığında plaka (24 mm) sistem için ideal kabul edilmiştir.

- **Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması**

Tablo 3.23 Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması

Deney Adı	Ölçüm Süresi (h)	Toplam Tüketim (kWh)	Ortalama Saatlik Tüketim (kW)
Test-1	1,333	2,05	1,54
Test-2	1,666	2,52	1,51
Test-3	1,833	2,62	1,43
Test-4	1,750	2,65	1,51

Yukarıda Tablo 3.23'de 24 mm kalınlıkta izolasyon plakasına sahip bir test düzeneğinde gerçekleştirilen 4 farklı testin enerji tüketim verileri yer almaktadır. Bu tüketim verileri incelendiğinde ortalama saatlik elektrik tüketimi yaklaşık olarak 1,5 kW'dır.

- **Yalıtımın Elektrik Tüketimine etkisi**

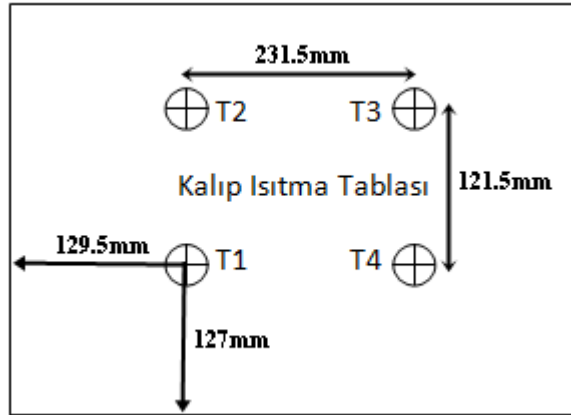
Kalıpta kurutma deney sisteminde yalıtımın enerji tüketimine etkisini gözlemleyebilmek için ısıtma tablasının arkasında 1 adet izolasyon plakası (8 mm) kullanılarak testler yapılmıştır.

DeneySEL sistemin diğer özellikleri aşağıdaki gibidir:

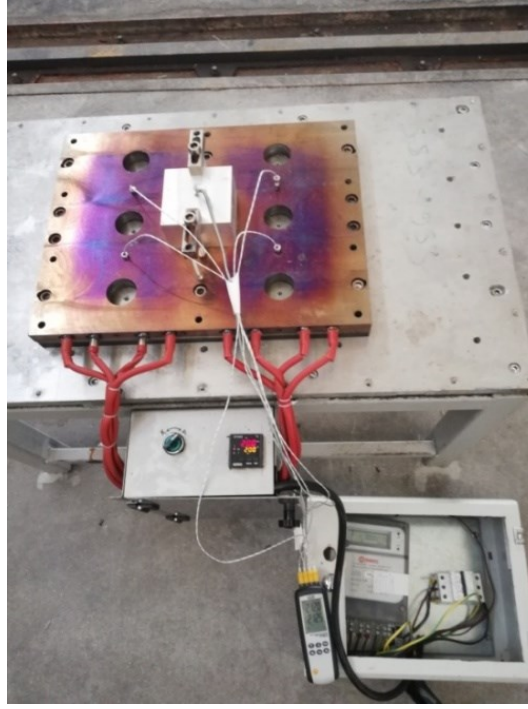
- 4 noktadan sıcaklık ölçümü (T1-T2-T3-T4)
- Sıcaklık set değeri : 200°C
- Isıtma tablası ebatları: 490x375x23 mm
- Rezistans gücü: 380 V-1100 W
- Datalogger veri örnekleme oranı : 1 sn

- **TEST-5**

Aşağıdaki Şekil 3.35’de gösterildiği gibi K tipi 4 adet termokupl ısıtma tablası üzerine yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.35 Test-5 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları



**Şekil 3.36** Test-5 için Termokuppların Isıtma Tablasına Yerleşimi

Tablo 3.24’de Test-5’e ait zamana bağlı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 20 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

**Tablo 3.24** Test-5’e Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

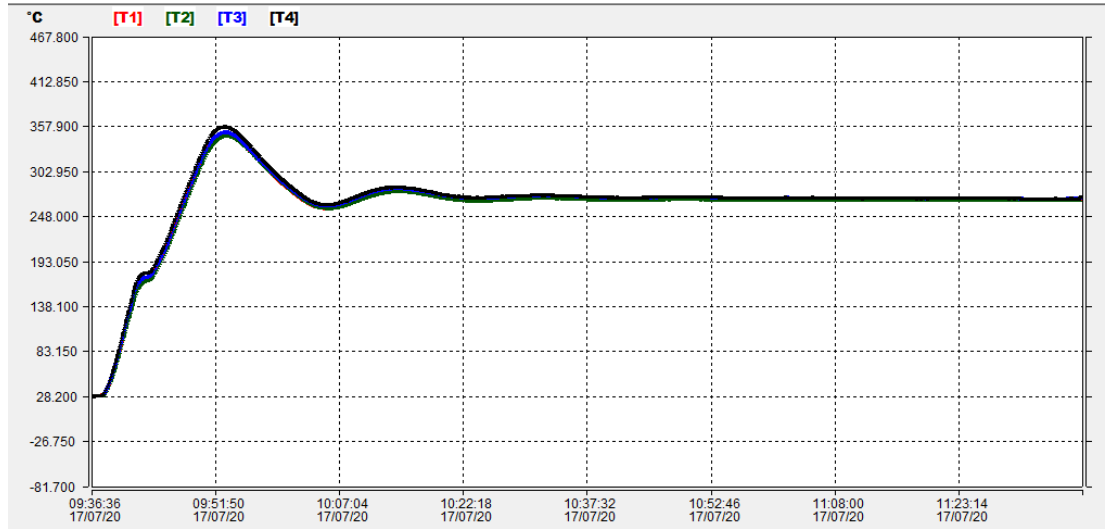
Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
0	29.00	28.60	28.70	28.60
5	139.70	133.80	142.50	148.00
10	229.20	223.40	230.20	236.90
15	341.60	336.80	342.90	350.10
20	323.80	323.40	325.40	329.50
25	276.20	277.40	279.20	280.80
30	258.90	258.60	262.10	263.40
35	276.10	274.70	279.00	280.70
40	277.60	276.80	280.30	281.40
45	268.90	268.30	271.80	272.40
50	268.60	267.70	271.40	271.90
55	271.20	270.30	273.80	274.20
60	270.20	269.00	272.30	272.70
65	268.80	267.80	271.00	271.10
70	269.70	268.60	271.70	271.80
75	270.00	268.90	271.80	271.90
80	269.00	268.00	270.80	270.80

Tablo 3.25’de Test-5’e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.25** Test-5 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
Maksimum	341.60	336.80	342.90	350.10
Minimum	29.00	28.60	28.70	28.60
Ortalama	185.30	182.70	185.80	189.35

Aşağıda Şekil 3.37’de Test-5 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.



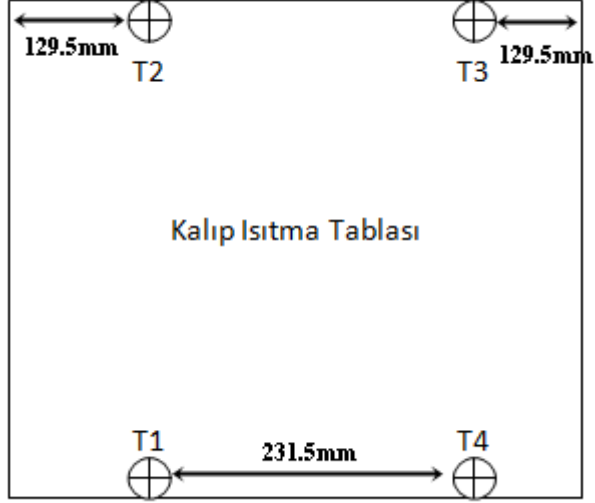
**Şekil 3.37** Test-5 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

4 adet termokupl tablanın orta bölgesine pozisyonlandırılmıştır. Termokupllar ısıtma tablasına yerleştirildiğinde tespit edilen başlangıç sıcaklığı yaklaşık ortalama 29°C’dir. Sistemde termokuplların yerleştirildiği 4 bölgenin sıcaklık ölçümleri dikkate alındığında 15 dakika içerisinde maksimum sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. Sistemde ölçülen maksimum sıcaklık yaklaşık 350.1°C ile T4 termokupla aittir. Sistem 45-60 dakika aralığında denge sıcaklığına ulaşmaktadır. Sistem denge sıcaklığına ulaştığında ortalama sıcaklık değeri yaklaşık 268°C-272°C aralığındadır.

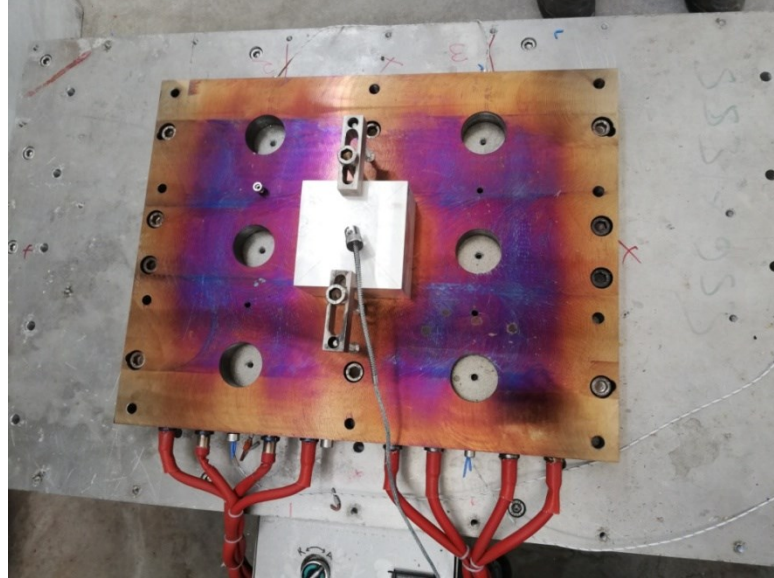


- **TEST-6**

Aşağıdaki Şekil 3.38’de gösterildiği gibi K tipi 4 adet termokupl, ısıtma tablasına yerleştirilmiştir ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.38 Test-6 için T1-T2-T3-T4 Pozisyonları



Şekil 3.39 Test-6 için Termokupulların Isıtma Tablasına Yerleşimi

Tablo 3.26’da Test-6’ya ait zamana bağlı olarak elde edilen deneysel veriler yer almaktadır. Bu veriler, 1 saat 20 dakikalık bir ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

**Tablo 3.26** Test-6'ya Ait Zamana Bağlı Olarak Elde Edilen Deneysel Veriler

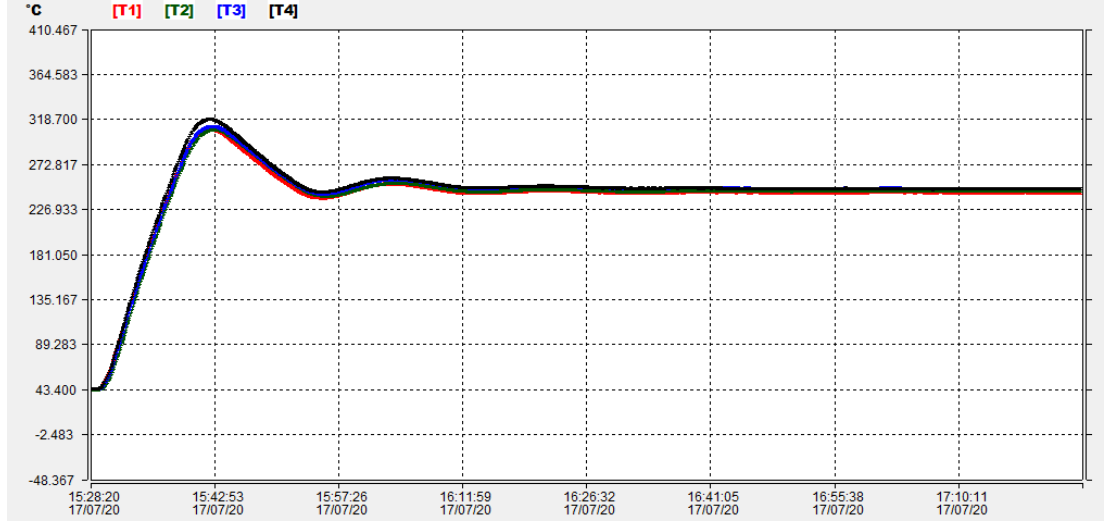
Ölçüm Süresi (Dakika)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
0	43.80	43.50	44.00	43.80
5	139.30	129.60	135.80	142.70
10	260.40	253.80	259.50	269.20
15	306.50	307.80	310.30	316.40
20	273.10	277.70	278.50	281.30
25	243.00	247.00	248.20	249.70
30	243.50	243.60	247.30	249.40
35	252.90	253.40	257.20	258.70
40	247.80	250.10	253.50	253.50
45	243.30	245.00	248.50	248.80
50	244.90	246.10	249.60	250.10
55	245.50	247.20	250.30	250.40
60	244.40	245.80	248.80	248.90
65	243.60	245.00	248.10	248.30
70	244.50	245.80	248.90	248.80
75	244.60	245.70	248.60	248.40
80	244.10	245.50	248.30	248.00

Tablo 3.27'de Test-6'ya ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.27** Test-6 Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Sıcaklık Değerleri	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
Maksimum	306.50	307.80	310.30	316.40
Minimum	43.80	43.50	44.00	43.80
Ortalama	175.15	175.65	177.15	180.10

Aşağıda Şekil 3.40'da Test-6 verilerine ait sıcaklık zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.40 Test-6 Verilerine Ait Sıcaklık - Zaman Grafiği

4 adet termokupl tablanın kenar bölgesine pozisyonlandırılmıştır. Termokupllar ısıtma tablasına yerleştirildiğinde tespit edilen başlangıç sıcaklığı yaklaşık ortalama 43.5°C'dir. Sistemde termokuplların yerleştirildiği 4 bölgenin sıcaklık ölçümleri dikkate alındığında 15 dakika içerisinde maksimum sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. Sistemde ölçülen maksimum sıcaklık yaklaşık 316.4°C ile T4 termokupla aittir.

Sistem 45-60 dakika aralığında denge sıcaklığına ulaşmaktadır. Sistem denge halinde iken ölçülen ortalama sıcaklık değerleri yaklaşık 245°C-250°C aralığındadır. T1 ile T4 problarından okunan maksimum sıcaklık değerleri kıyaslandığında yaklaşık 10°C sıcaklık farkı bulunmaktadır.

- **Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması**

Tablo 3.28 Elektrik Tüketim Verilerinin Karşılaştırılması

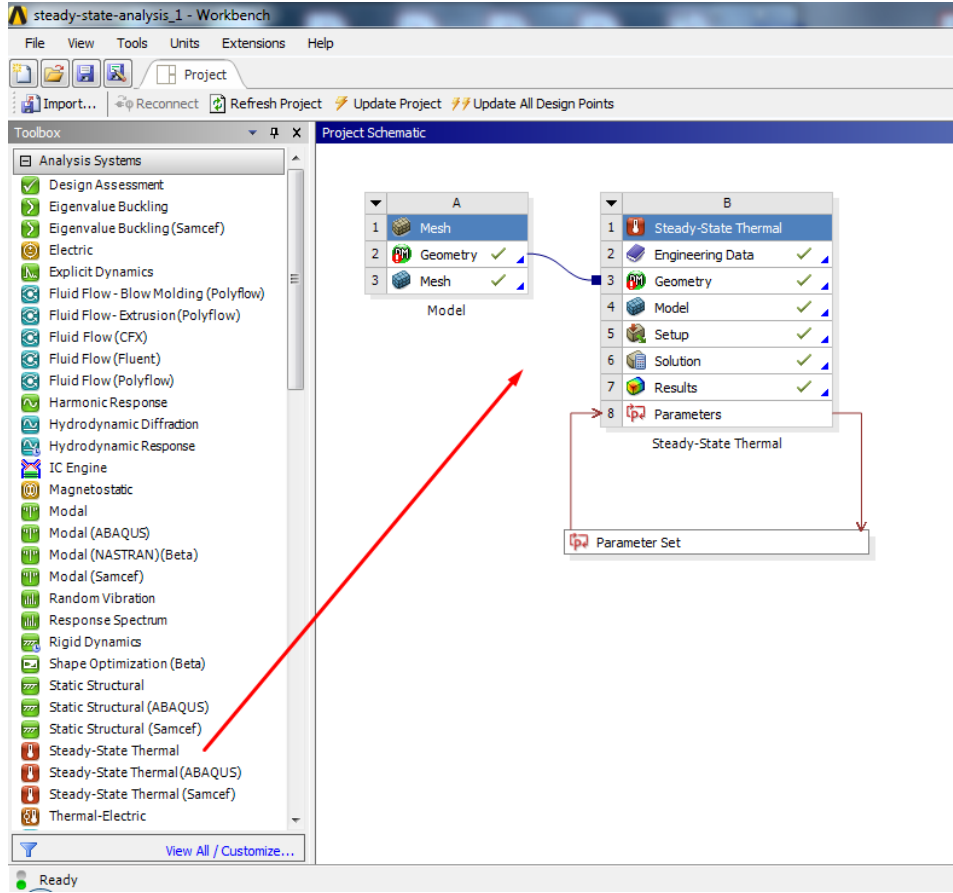
Deney Adı	Ölçüm Süresi (h)	Toplam Tüketim (kWh)	Ortalama Saatlik Tüketim (kW)
Test-5	2	4,393	2,2
Test-6	1,92	3,979	2,07

Yukarıda Tablo 3.28'de 8 mm kalınlıkta izolasyon plakasına sahip bir test düzeneğinde gerçekleştirilen 2 farklı testin enerji tüketim verileri yer almaktadır. Bu tüketim verileri incelendiğinde, ortalama saatlik elektrik tüketimi 2,07-2,2 kW aralığındadır.

### 3.3 Simülasyon Analizi

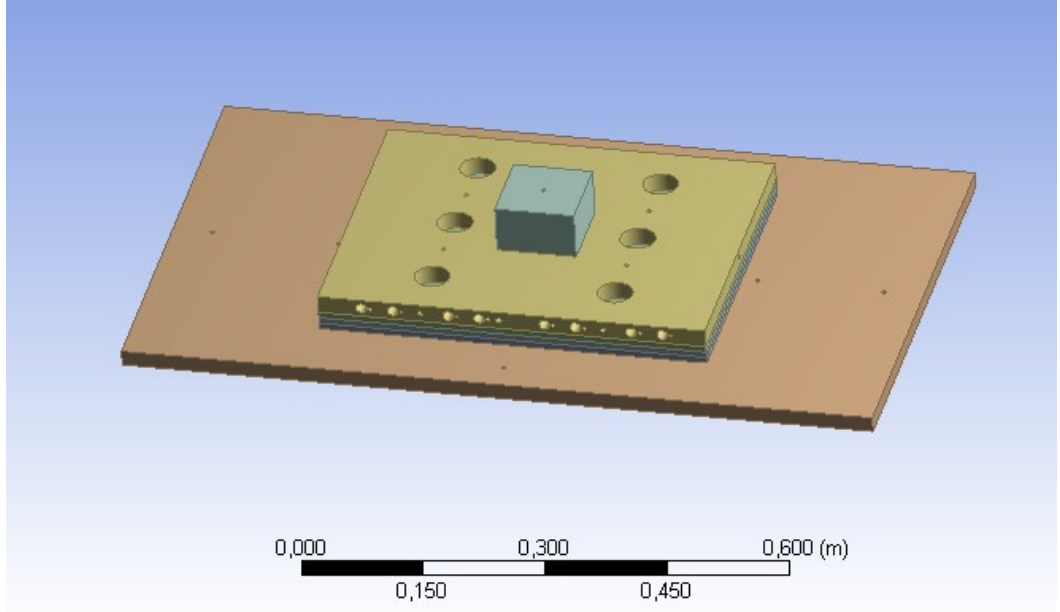
Siemens Unigraphics NX programı ile üç boyutlu tasarımı yapılan kalıpta kurutma test düzeneği nde 3 farklı tipte malzeme kullanılmıştır. Bunlar ana gövde ve test modelinde kullanılan EN-AW 5083 (Alüminyum), ısıtma tablasında kullanılan DIN 1.2316 paslanmaz çelik, yalıtım için kullanılan Mika izolasyon plakasıdır.

Sistemin kararlı halini simüle edebilmek için Ansys Workbench programı başlatılır ve steady-state ısı analiz kısmı seçilir.



Şekil 3.41 Analiz Tipi Seçimi

Siemens Unigraphics NX ile çizdiğimiz tasarım kayıtlı noktasından çağrılır. Aşağıda modelin 3 boyutlu görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.42 Modelin 3 Boyutlu Görüntüsü

Malzeme özellikleri girmek için Engineering Data klasörüne giriş yapılır ve seçilen malzemelere ait karakteristik özellikler her biri için ayrı ayrı olarak tanımlanır.

DIN 1.2316 için malzeme özellikleri aşağıda Şekil 3.43'deki gibi tanımlanmıştır.

Properties of Outline Row 3: 1.2316			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
8	Isotropic Elasticity		
18	Tensile Yield Strength	8,55E+08	Pa
19	Compressive Yield Strength	2,05E+08	Pa
20	Tensile Ultimate Strength	1,02E+09	Pa
21	Compressive Ultimate Strength	0	Pa
22	Isotropic Thermal Conductivity	19,6	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
23	Specific Heat	460	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
24	Isotropic Relative Permeability	1	
25	Isotropic Resistivity	7,7E-07	ohm m

Şekil 3.43 DIN 1.2316 malzeme özellikleri

EN-AW 5083 için malzeme özellikleri aşağıda Şekil 3.44'deki gibidir.

Properties of Outline Row 9: EN-AW 5083 3					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	2660	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Alternating Stress R-Ratio	Tabular		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Tensile Yield Strength	2,28E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	Tensile Ultimate Strength	3,17E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	Isotropic Thermal Conductivity	205	W m <sup>-1</sup> ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	Specific Heat	900	J kg <sup>-1</sup> ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	Isotropic Relative Permeability	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Şekil 3.44 EN-AW 5083 malzeme özellikleri

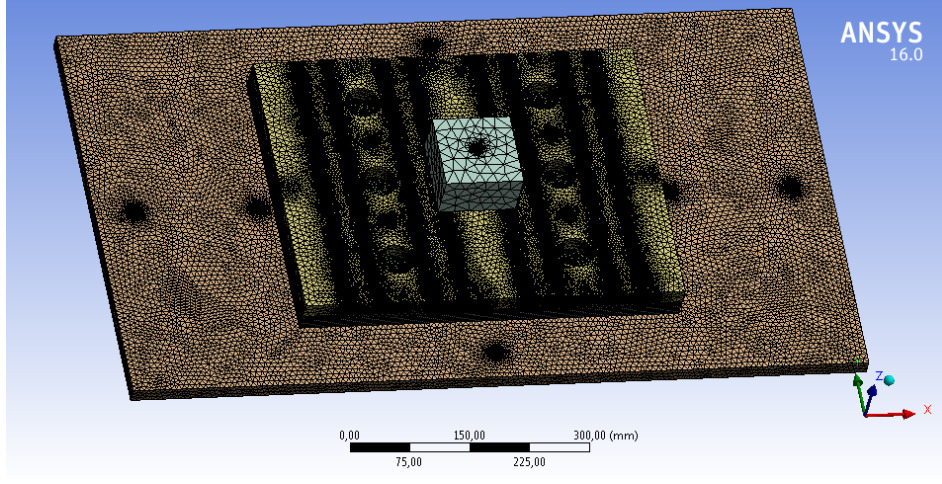
Yalıtım için kullanılan izolasyon plakasının malzeme özellikleri aşağıda Şekil 3.45'deki gibidir.

Properties of Outline Row 10: Mica 9					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	30	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Thermal Conductivity	0,29	W m <sup>-1</sup> ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Specific Heat	500	J kg <sup>-1</sup> ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

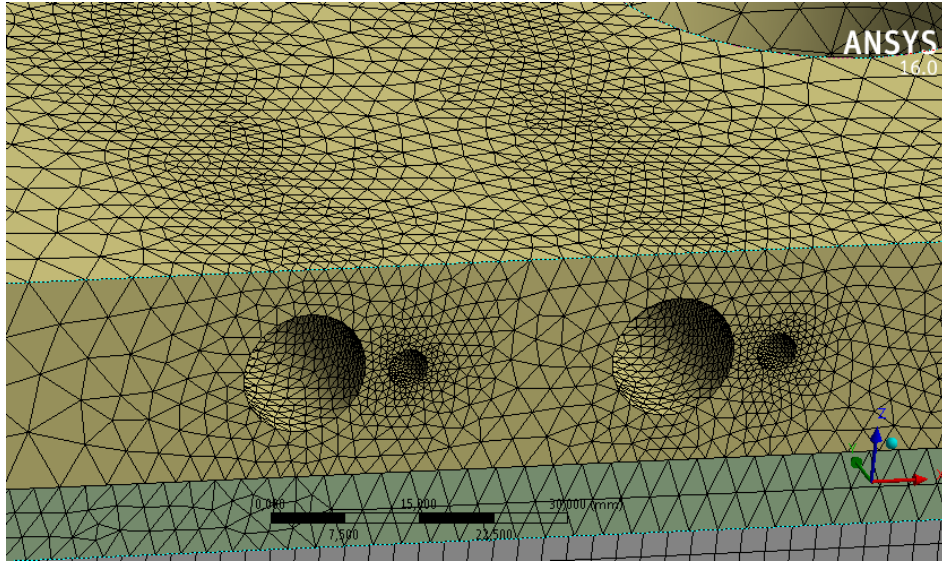
Şekil 3.45 İzolasyon plakası malzeme özellikleri

Malzeme özellikleri belirlendikten sonra katı model sonlu elemanlara ayrılır yani mesh atılır. Deliklerin olduğu bölgeler hassas çözümleme için daha çok sonlu elemanlara ayrılır.

Aşağıda Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de katı modele ait mesh görüntüsü gösterilmektedir.

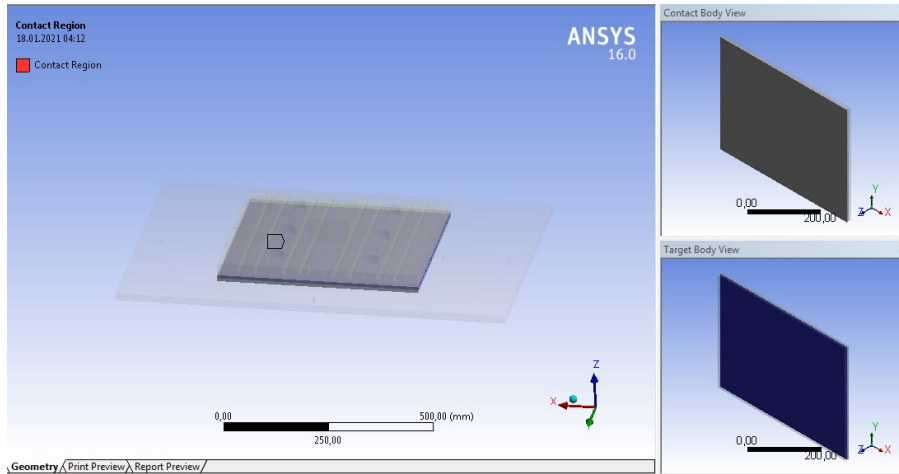


Şekil 3.46 Katı Modelin Mesh Görüntüsü



Şekil 3.47 Deliklerin Mesh Görüntüsü

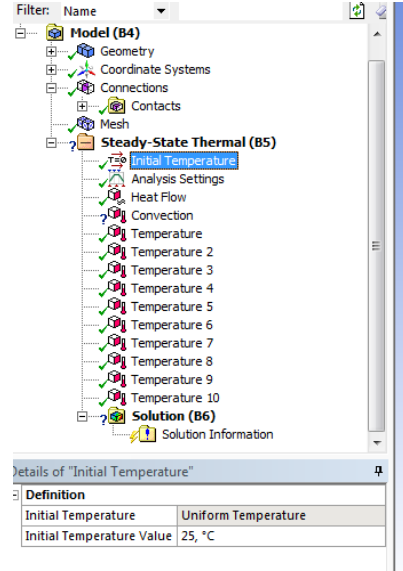
Birbiri ile temasta olan her bir sistem malzemesi için temas bölgeleri otomatik olarak seçilir.



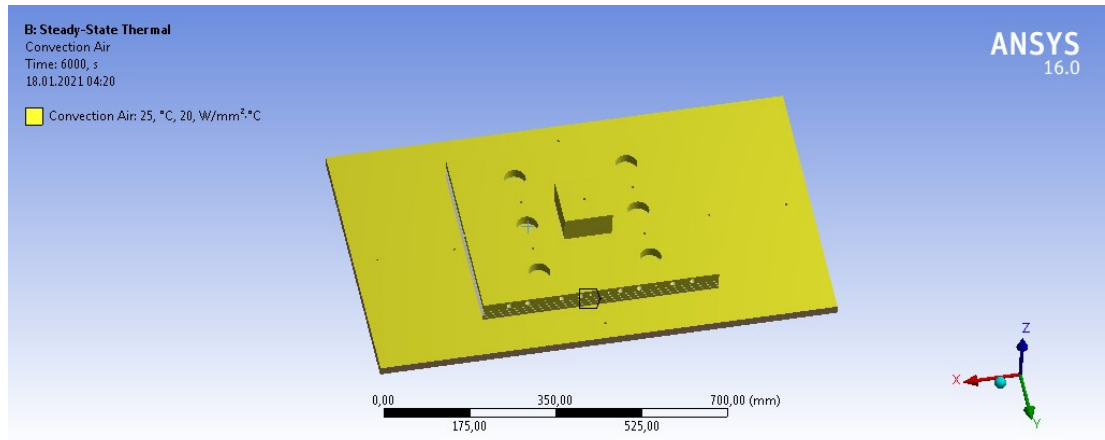
Şekil 3.48 Malzeme Temas Bölgelerinin Seçimi



Çevre koşulları ve sınır şartları için test düzeneğinde hava ile teması olan bölgelere durgun hava taşınımı özellikleri tanımlanmıştır. Başlangıç sıcaklığı ve ortam sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir.



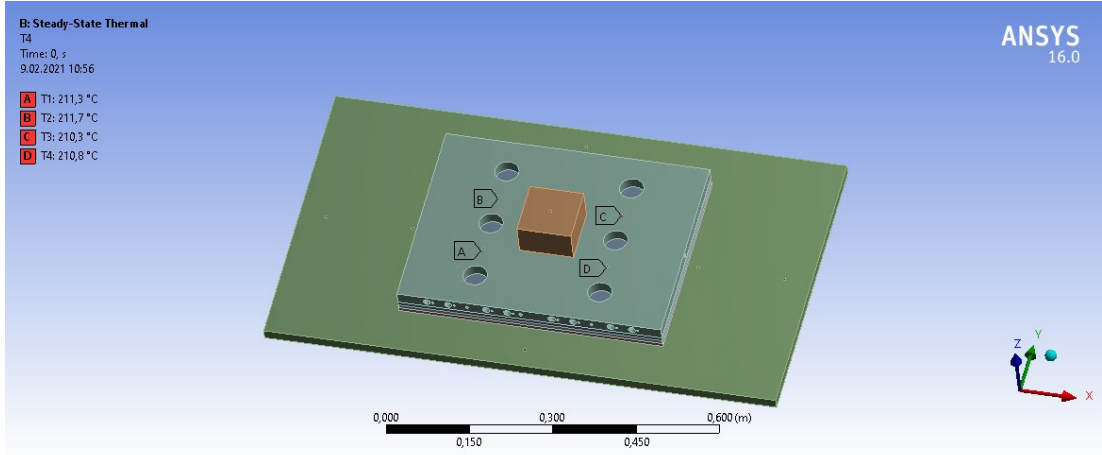
Şekil 3.49 Başlangıç Sıcaklığı



Şekil 3.50 Çevre Koşulları ve Ortam Sıcaklığı

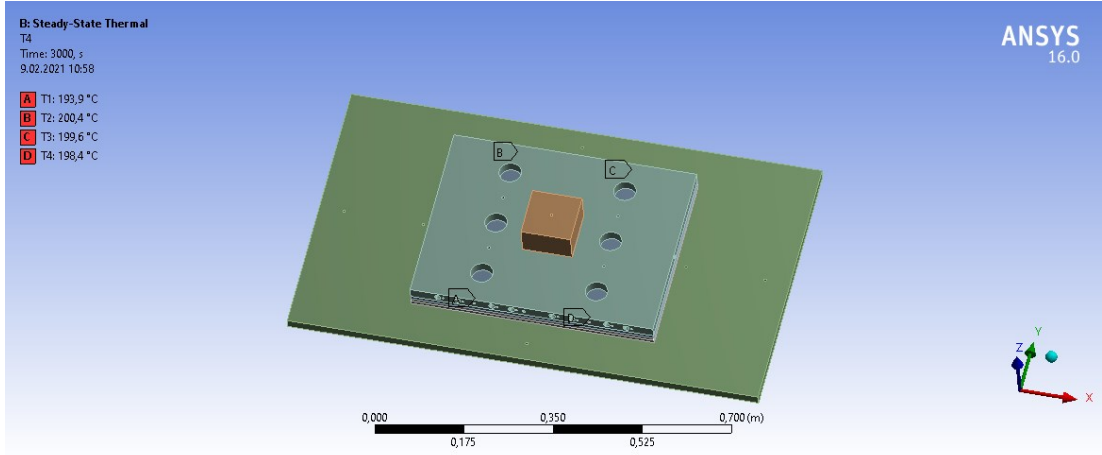
DeneySEL analiz sonucu elde edilen ve zamana bağlı olarak değişen sıcaklık verilerinin ortalama değerleri sırasıyla sistemde tanımlanır. 80 dakika sonunda deneySEL analiz sonucu elde edilen Test-1, Test-2, Test-3, Test-4 sıcaklık verileri programda ayrı ayrı atanır.





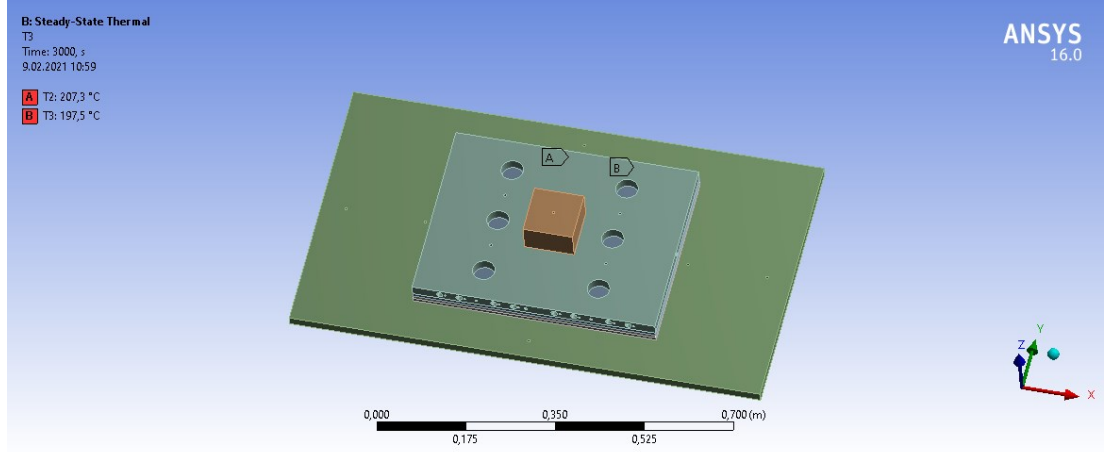
**Şekil 3.51** Test-1 Deneysel Verilerinin Tanımlanması

Şekil 3.51’de 80 dakikalık deneysel ölçüm sonucunda Test-1’e ait sıcaklık değerleri atanmıştır. 80 dakika sonunda termokupplardan okunan sıcaklık değerleri sırasıyla T1:211.3°C, T2:211.7°C, T3:210.3°C, T4:210.8°C’dir. Termokuppların yerleştirildiği noktalar A-B-C-D ile gösterilmektedir.



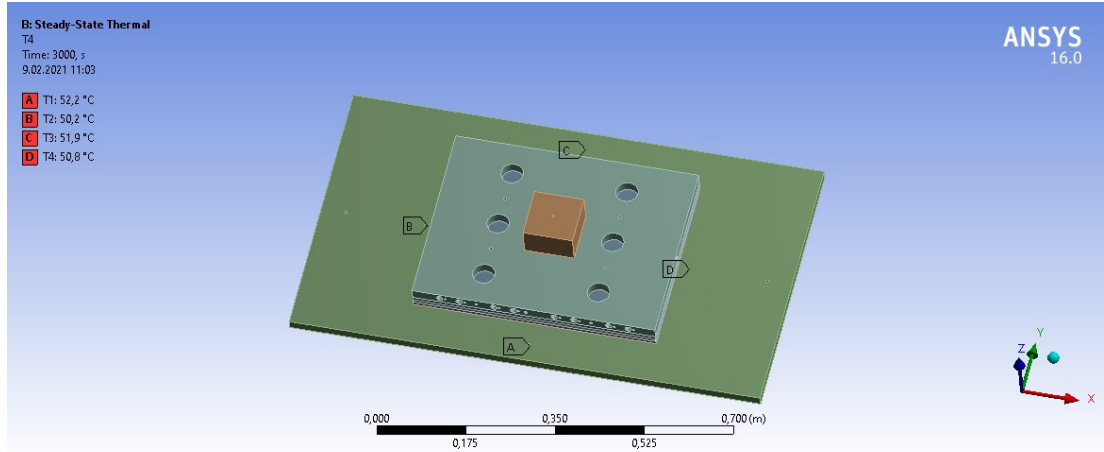
**Şekil 3.52** Test-2 Deneysel Verilerinin Tanımlanması

Şekil 3.52’de 80 dakikalık deneysel ölçüm sonucunda Test-2’ye ait sıcaklık değerleri atanmıştır. 80 dakika sonunda termokupplardan okunan sıcaklık değerleri sırasıyla T1:193.9°C, T2:200.4°C, T3:199.6°C, T4:198.4°C’dir. Termokuppların yerleştirildiği noktalar A-B-C-D ile gösterilmektedir.



**Şekil 3.53** Test-3 Deneysel Verilerinin Tanımlanması

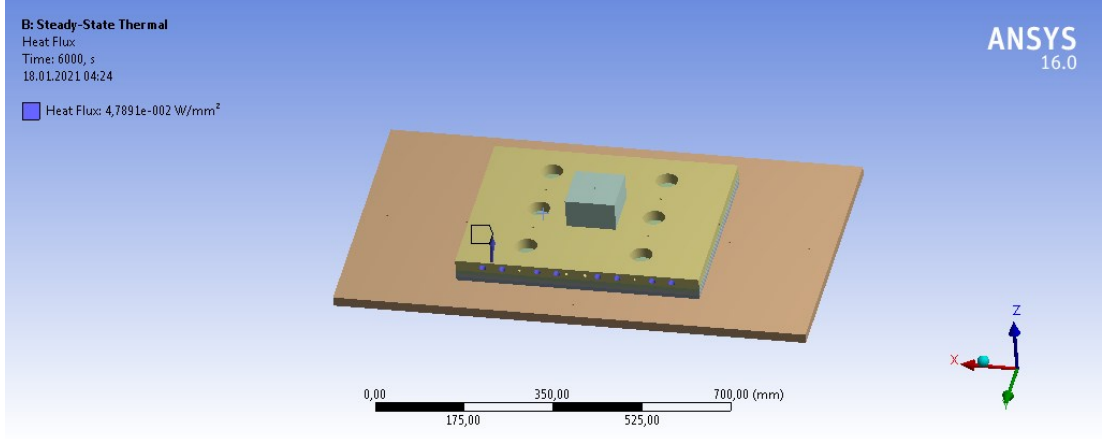
Şekil 3.53’de 80 dakikalık deneysel ölçüm sonucunda Test-3’e ait sıcaklık değerleri atanmıştır. Termokuplların yerleştirildiği noktalar A ve B ile gösterilmektedir. 80 dakika sonunda termokupllardan okunan sıcaklık değerleri sırasıyla T2:207.3°C, T3:197.5°C’dir.



**Şekil 3.54** Test-4 Deneysel Verilerinin Tanımlanması

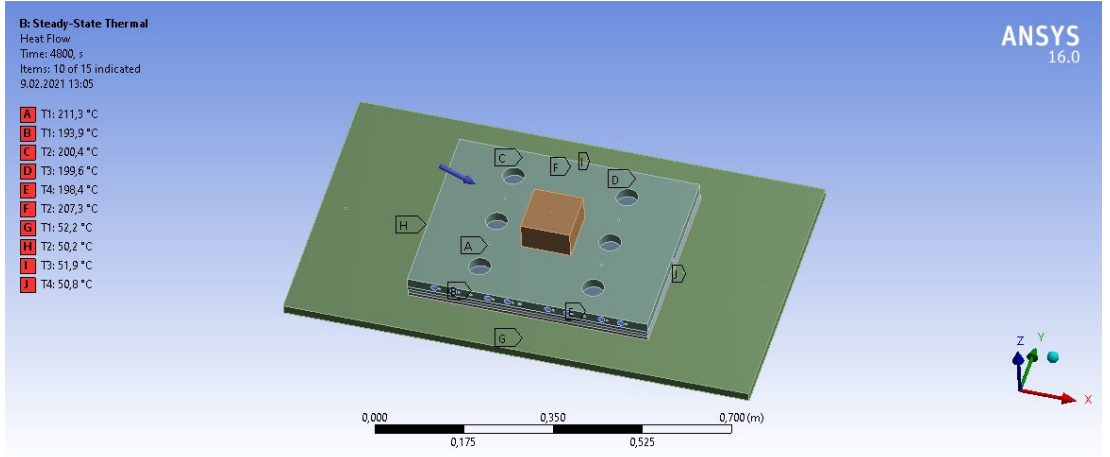
Şekil 3.54’de 80 dakikalık deneysel ölçüm sonucunda Test-4’e ait sıcaklık değerleri atanmıştır. Ana gövde şahsi üzerinde termokuplların yerleştirildiği noktalar A-B-C-D ile gösterilmektedir. 1 saat 45 dakikalık ölçüm sonunda termokupllardan okunan sıcaklık değerleri sırasıyla T1:52.2°C, T2:50.2°C, T3:51.9°C, T4:50.8°C ‘dir.

Elektriksel ısı üretim kaynağı olan fişek tipi rezistanların 1100 W olan güç değeri 8 adet rezistans deliği için tanımlanır.



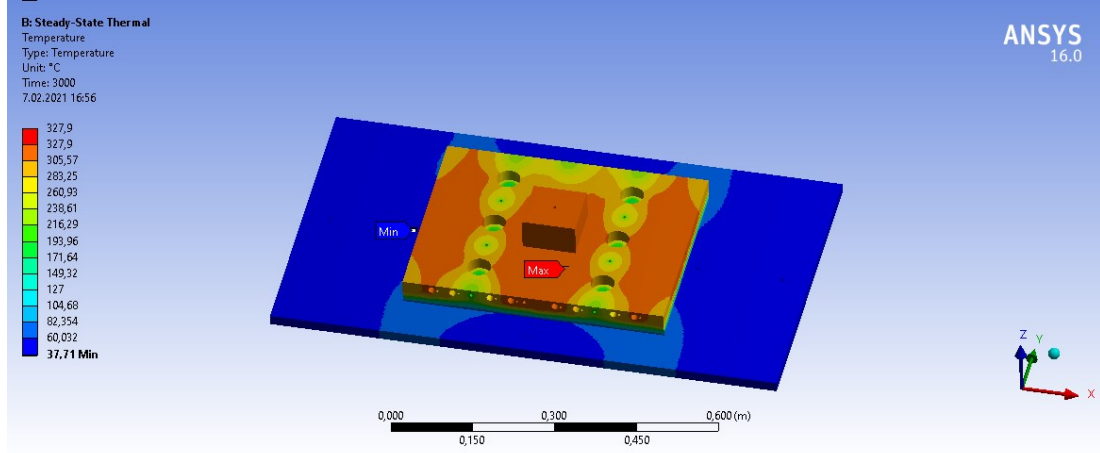
Şekil 3.55 Rezistans Gücünün Sisteme Atanması

Aşağıda Şekil 3.56'da kararlı hal için sistem değişkenlerinin tanımlanması gösterilmektedir. 4 farklı test sonucunda elde edilen ortalama sıcaklık değerleri, ortam sıcaklığı, elektriksel güç değerleri atanmıştır.



Şekil 3.56 Kararlı Hal için Sistem Değişkenlerinin Tanımlanması

Kararlı hal durumunda sistemde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık dereceleri ve sıcaklık dağılımları aşağıda Şekil 3.57’de gösterilmektedir. Isıtma tablasında kırmızı renkli bölgede maksimum sıcaklık ve ana gövde üzerinde yer alan alüminyum plakada ölçülen minimum sıcaklık gösterilmektedir.



Şekil 3.57 Sistemde Tespit Edilen Maksimum-Minimum Sıcaklık Değerleri

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Termoform kalıpta kurutma sistemine sahip makinalar ile endüstriyel üretim yapan firmalar, üretim esnasında sıklıkla kalite problemleri yaşamaktadır. Bunun ana sebeplerinden birisi de kalıp ısıtma esnasında karşılaşılan homojen olmayan ısı dağılımıdır. Kurutma için çevrim sürelerinin uzaması, fire oranlarının artması firmalar için verimlilik kaybı ve ekstra maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada termoform kalıpta kurutma test düzeneğinde sıcaklık kayıt cihazı ile birbirinden farklı deneysel testler yapılmıştır ve veriler kaydedilmiştir. Farklı bölgelerden sıcaklık ölçümleri yapılarak sistemin ısıl karakteristiği ortaya çıkarılmıştır. Sistem için rezistans özellikleri ve izolasyon plakası kalınlıklarının tespiti yapılmıştır. Kalıp ısıtma tablası için farklı malzemeler önerilmiştir. Farklı kalınlıkta izolasyon plakası kullanıldığı durum için enerji tüketimleri kıyaslanmıştır. Deneysel veriler ışığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Deneysel testler sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen sıcaklık değerleri incelendiğinde 15 dakika sonunda problarda maksimum sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Bu da hızlı bir şekilde tablanın ısıtılabilmesini ortaya koymaktadır.
- Deneysel test verilerine göre yaklaşık 45-60 dakika aralığında sistemin denge haline ulaştığı gözlenmiştir.
- Tablanın ortasına ve kenarlarına yerleştirilen termokupl ölçüm verileri incelendiğinde, tablanın orta bölgesi ve kenar bölgeleri arasında yaklaşık 10°C sıcaklık farkı olduğu tespit edilmiştir. Sistem denge halinde iken sıcaklık farklarının bu şekilde yüksek olması ve homojen sıcaklık dağılımının olmaması, kurutulmaya çalışılan üründe nemli bölgelerin kalmasına sebep olabilecektir. Kenarları kurutmak için çevrim süresinin uzatılması ile de orta bölgelerde yanıklar oluşabilecektir.
- Sistemde kullanılan 24 mm kalınlığındaki izolasyon plakası sistem için uygun olduğu kabul edilmiştir. İzolasyon plakalarının altında yer alan alüminyum plakaya yerleştirilen termokupllarda ortalama 37°C sıcaklık tespit edilmiştir. Bu sıcaklık değeri makine ekipmanları için herhangi bir sorun yaratmayacaktır.
- Farklı izolasyon plakası kalınlıklarına göre tüketilen elektrik enerjileri kıyaslandığında, yalıtımın yetersiz olduğu durumlarda rezistanslar sistemi dengeye getirmek için daha fazla güç tüketmeye çalıştığı ve bu sebeple daha fazla enerji

tüketimi meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu da sistemdeki yalıtımın önemini ortaya koymaktadır.

- Tek bir izolasyon plakası ( 8 mm) kullanıldığında ortalama saatlik elektrik tüketimi 2,07-2,2 kw arası olurken, 3 adet izolasyon plakası (24 mm) kullanıldığında ortalama saatlik tüketim 1,43-1,54 kw arasında gerçekleşmiştir.
- Deneysel verilerden faydalanılarak, Ansys programında kararlı hal durumunda termal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu sıcaklık dağılımı incelendiğinde orta bölgeler ile kenar bölgelerde sıcaklık farklarının olduğu görülmektedir. Bu da deneysel verileri doğrulamaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bilgi ve gözleme dayanarak ileride benzer bir çalışma için aşağıdaki uygulamaların yapılması bilimsel açıdan katkı sağlayacaktır;

- Fişek tipi rezistans dışında farklı bir kalıp ısıtma yöntemi ile deneysel ölçümün gerçekleştirilmesi,
- Ansys Workbench programında zamana bağlı geçici hal termal analizinin yapılması ve sıcaklık dağılımının incelenmesi,
- Farklı ısıtma tablası malzemeleri ile test düzeneğinin kurulması ve sıcaklık ölçümlerinin yapılması.

## 5. KAYNAKLAR

“TPM-USA, LLC [online]”, 2016. [http://www.pulp-machinery.com/tpm\\_machinery.html](http://www.pulp-machinery.com/tpm_machinery.html).

Oppelt, T., Schulze, J., Stein, H., and Platzer, B., “Comparison of methods for mould surface heating-part 1: Review,” *Int. Polym. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 12, pp. 518–523, 2012.

Zhao, G., Li, X., and Guan, Y., “Multi-objective optimization of the heating rods layout for rapid electrical heating cycle injection mold” *J. Mech. Des.*, vol. 132, no. 061001, pp. 1–8, 2010.

Wang, G., Zhao, G., and Guan, Y., “Research on optimum heating system design for rapid thermal response mold with electric heating based on response surface methodology and particle swarm optimization,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, no. 2, pp. 902–921, 2011.

Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, J. A., and Jong, W. R., “Simulations and verifications of induction heating on a mold plate,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 7, pp. 971–980, 2004.

Park, G., Lee, C., “Experimental and Numerical Study on Indentation,” vol. 560, pp. 127–132, 2008.

Wang, G., Zhao, G., and Guan, Y., “Thermal response of an electric heating rapid heat cycle molding mold and its effect on surface appearance and tensile strength of the molded part,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 128, no. 3, pp. 1339–1352, 2013.

Wang, G., Hui, Y., Zhang, L., and Zhao, G., “Research on temperature and pressure responses in the rapid mold heating and cooling method based on annular cooling channels and electric heating,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 116, pp. 1192–1203, Jan. 2018.

Didone, M., *et al.*, “Moulded Pulp Manufacturing: Overview and Prospects for the Process Technology,” *Packag. Technol. Sci.*, vol. 30, pp. 231–249, Feb. 2017.

Wever, R., and Twede, D., “The history of molded fiber packaging; a 20th century pulp story,” *22nd IAPRI Symposium Proceedings*, 2007.

“About Molded Fiber - International Molded Fiber Association.” [Online].” <https://www.imfa.org/molded-fiber/> (accessed May 03, 2020).

“Molded Pulp/Processed [Online].” [https://en.wikipedia.org/wiki/Molded\\_Pulp/Processed](https://en.wikipedia.org/wiki/Molded_Pulp/Processed) (accessed May 03, 2020).

KEYES, F. E., "US424003.pdf," 424,003, 1890.

Sarıkaya, E., "Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti," Pamukkale Üniversitesi, 2019.

Hubbe, M. A., "Paper's resistance to wetting - A review of internal sizing chemicals and their effects," *BioResources*, vol. 2, no. 1, pp. 106–145, 2007.

"Manufacturing Pulp Packaging [Online]," <https://www.s-packaging.com/pulp/manufacturing-pulp-packaging/> (accessed May 10, 2020).

Lucisano, M., and Martinez, D. M., "On the characterization of the delamination process during impulse pressing," vol. 16, pp. 362–368, Jan. 2001.

"ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide' ANSYS, Inc. ansysinfo@ansys.com." 2020.

"Matweb [Online] ."

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=b740472e2fb44604868ffb4b3574b3aa&ckck=1> (accessed Dec. 01, 2020).

Jones, D. A., "Principles and Prevention of Corrosion", Second Edition, New Jersey: Prentice Hall (1996).

Fontana, M. G., "Corrosion Engineering", Third Edition. New York: McGraw-Hill (1986).

Safiuddin, Md., "Occurrences Of Corrosion: Causes and Prevention", BRAC University Journal, Vol. III, No. 1, pp. 71-74, 2006.

Aktaş, B., "Makine Mühendisliğinde Malzeme Seçimi," 2016.

Wiley&Sons, J., Inc. M. P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing 2/e", 2002.

Findik F., "Overview to Material Selection", Muhendis ve Makine, Vol. 50, pp. 25-31, 2009

Çini, A., "Inconel 718 Malzemesinin Tornalama İşleminde Yüksek Basınçlı Jet Soğutmanın Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerine Etkisi", A.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Y.Lisans Tezi, 57, Afyonkarahisar.

"Kalite Metalürji [Online] ." <http://kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/plastik-kalip-celikleri/1-2316-plastik-kalip-celigi/> (accessed Dec. 13, 2020).

Kumar, R., Jagadish, and Ray, A., "Selection of Material for Optimal Design Using Multi-criteria Decision Making," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpc, pp. 590–596, 2014.



Shanian, A., and Savadogo, O., “TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell,” *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1095–1104, 2006.

“Baykal Rezistans [Online] .” <https://www.baykalrezistans.com/urunler/fisek-rezistanslar.html> (accessed Dec. 13, 2020).

“Isı Form Rezistans [Online] .” <https://www.isiformrezistans.com/teknik-45-isi-hesaplama.html> (accessed Dec. 01, 2020)

Engineering ToolBox, (2011). Electric Heating of a Mass. [online]  
Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-heating-mass-d\\_1757.html](https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-heating-mass-d_1757.html) (accessed Dec. 01,2020).

“Netes [Online] .” <https://www.netes.com.tr/blog/sicaklik-olcumu-ve-kalibrasyonu-hakkinda-bilmeniz-gerekenler> (accessed Dec. 01, 2020)

# **EKLER**

## 6. EKLER

### EK-A DT104 AX Auto-Tune PID Sıcaklık Kontrol Cihazı

# GENO®

## DT109/DT107/DT106/DT105/DT104

### MULTI INPUT AUTO-TUNE PID THERMOSTAT



#### GENEL ÖZELLİKLER

- Multi-Input çift kontak sıcaklık kontrol cihazı
- Seçilebilir sensör tipi: T/C (J,K,S,R,T), Pt-100
- Auto-tune PID özelliği
- "Anti-windup" özelliği
- P, PI, PD, PID veya ON-OFF kontrol formu
- PID modunda otomatik "Overshoot" engelleme özelliği
- Set ve Alarm değerleri için üst ve alt limit seçme imkanı
- Bağıl, mutlak veya band alarmı seçme imkanı
- Isıtma / Soğutma fonksiyonu
- Set ve Proses değerlerinin aynı anda izlenebilme imkanı
- T/C için ortam sıcaklık kompanzasyonu
- Pt100 için hat kompanzasyonu (3 telli bağlantı)
- Hafızada kayıtlı °C/mV, °C/R dönüşüm tabloları ile eğri düzeltme
- Ölçüm değerine "Offset" ekleme imkanı
- Soğutma çıkışı için gecikme özelliği
- Şifreli giriş ile veri güvenliği
- Sensör arızalarını algılama özelliği
- Sensör veya sensör hattı kopması durumunda ayarlanabilir Out çıkışı
- Yüksek hassasiyet, doğruluk
- Program ve kontrol parametrelerini sürekli hafızada tutabilme
- Opsiyonel SSR çıkış seçeneği
- Soketli klemens ile kolay bağlantı imkanı

#### GENERAL SPECIFICATION

- Multi-input temperature controller with Out and ALARM outputs
- Selectable sensor type: T/C (J,K,S,R,T), Pt-100
- Auto-tune PID
- "Anti-windup"
- Control forms: P, PI, PD, PID or ON-OFF
- Automatic "Overshoot" cancellation in PID mode
- Upper & lower limit for SET and ALARM settings
- Selectable relative, absolute or band alarm
- Selectable heating / cooling function
- Displays SET and PROCESS values
- Cold-junction compensation for T/C
- Line compensation for Pt100 (3 wire connection)
- Excellent linearity with °C/mV, °C/R look-up tables
- Input "Offset" feature
- Delay timer for cooling function
- Password protected
- Detects sensor failure
- Adjustable duty cycle for Out output in case of sensor failure
- High accuracy
- EEPROM memory keeps settings
- Optional SSR output
- Easy connection with plug-in connectors

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Durmuş Çakar

Doğum Yeri ve Tarihi : DENİZLİ/17.05.1989

Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

Elektronik posta : cakar\_drms@hotmail.com

İletişim Adresi : Bahçelievler mah. Bahçelievler cad. No:132

D.2 Merkezefendi / Denizli