

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



LOW-E CAMLARIN ISIL PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEKİR ATEŞ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK
İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Musa BÜYÜKADA

BOLU, EKİM - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Bekir ATEŞ tarafından hazırlanan “**LOW-E CAMLARIN ISIL PERFORMASININ İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 25/10/2023

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Sabri Öztürk
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Murat Pakdil
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Fevzi Çakmak Bolat
Kocaeli Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

BEKİR ATEŞ

ÖZET

**LOW-E CAMLARIN ISIL PERFORMANSININ
İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BEKİR ATEŞ
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SABRİ ÖZTÜRK)
(İKİNCİ DANIŞMAN: DOÇ. DR. MUSA BÜYÜKADA)**

**BOLU, EKİM - 2023
XIV + 86**

Low-e camlar düşük emisivite değerlerine sahip camlar olarak bilinmektedir. Normal camlarda 0,87 olan emisivite değeri low-e camlarda 0,04'e kadar düşürülebilmektedir. Low-e camların yaygın bir diğer özelliği ise uzun dalga boylu ışınların geçişini azaltarak enerjiden tasarruf sağlamaktadır. Bu özellikleri sebebi ile low-e camlar günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta ve üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, camların ısı performansları incelenmiştir. TEC-15, Planibel G ve G Fast olmak üzere üç farklı cam türünden yedişer adet numune ile toplamda 21 cam test edilmiştir. Yapılan çalışmada fırın ısıtılarak fırın kapağına yerleştirilen camların dış yüzey sıcaklıkları beş farklı noktada ölçülmüştür. İlk olarak fırın 50 °C'ye ısıtılarak değerler kaydedilmiş daha sonra fırın iç sıcaklığı sabit tutularak 3 dakika beklenmiş ve oluşan değerler kaydedilmiştir yapılan bu işlemler 200 °C ye kadar her 50 °C'de bir tekrarlanmıştır. Deney sonucunda 840 adet veri incelendi. Ayrıca camlara yüzey direnç testi ve kırılma testi de yapıldı. Yapılan test sonuçlarına göre; Fırın iç sıcaklığı 200 °C'de 3 dakika sabit bekleme sonrasında TEC-15 camında 74,78 °C, Planibel G camında 73,70 °C, G Fast camında ise 72,11 °C olduğu görüldü. Bu sıcaklık değerlerine göre G Fast camı TEC-15 camına göre %3,7 daha düşük sıcaklık gösterirken, Planibel G camı Tec-15 camına kıyasla %1,4 daha düşük sıcaklık göstermiştir. Camların ısı performansları göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Low-e, Emisivite, Cam, Isıl Performans

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF LOW-E
GLASSES
MSC THESIS
BEKIR ATEŞ
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. SABRİ ÖZTÜRK)
(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MUSA BÜYÜKADA)**

**BOLU, OCTOBER 2023
XIV + 86**

Low-e glasses are known as glasses with low emissivity values. The emissivity value, which is 0.87 in normal glasses, can be reduced to 0.04 in low-e glasses. Another common feature of low-e glasses is that they reduce the transmission of long wavelength rays and save energy. Because of these features, low-e glasses are widely used and studied today. In this study, the thermal performance of glasses was investigated. Seven samples of each of three different types of glass, namely TEC-15, Planibel G and G Fast, were tested, a total of 21 glasses. In the study, the oven was heated and the outer surface temperatures of the glasses placed on the oven lid were measured at five different points. First, the oven was heated to 50 °C and the values were recorded, then the oven was kept at a constant temperature for 3 minutes and the resulting values were recorded. These operations were repeated every 50 °C until 200 °C. As a result of the experiment, 840 data were examined. In addition, surface resistance test and fracture test were performed on the glasses. According to the test results; After keeping the oven at 200 °C for 3 minutes, it was seen that the temperature in TEC-15 glass was 74.78 °C, in Planibel G glass was 73.70 °C, and in G Fast glass was 72.11 °C. According to these temperature values, G Fast glass showed 3.7% lower temperature than TEC-15 glass, while Planibel G glass showed 1.4% lower temperature than TEC-15 glass. The glasses were evaluated by considering their thermal performance.

KEYWORDS: Low-e, Emissivity, Glass, Thermal Performance

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
FOTOĞRAF LİSTESİ	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. CAM.....	13
3.1. Camın Tarihçesi	13
3.1.1. Camlar Hakkında Genel Bilgiler.....	14
3.1.2. Camın Kimyasal Özellikleri.....	16
3.1.3. Camın Mekanik Özellikleri.....	16
3.1.4. Camın Fiziksel Özellikleri	17
3.1.5. Optik Özellikler.....	18
3.1.6. Elektriksel Özellikler	18
3.1.7. Isıl Özellikler.....	18
3.2. Camı Oluşturan Ana Maddeler.....	19
3.2.1. Silisyum Dioksit (SiO_2)	19
3.2.2. Alüminyum Oksit (Al_2O_3).....	20
3.2.3. Sodyum Oksit (SODA)	20
3.2.4. Kalsiyum Oksit (CaO)	21
3.2.5. Potasyum Oksit (K_2O)	21
3.2.6. Kurşun Oksit (PbO)	21
3.2.7. Bor Oksit (B_2O_3)	22
3.2.8. Magnezyum Oksit (MgO).....	22
3.2.9. Baryum Oksit (BaO)	22
3.2.10. Demir Oksit (Fe_2O_3).....	23
3.3. Camın Şekillendirme Yöntemleri.....	23
3.3.1. Ezme-Presleme Yöntemi.....	23
3.3.2. Üfleyerek Şişirme Yöntemi	24
3.3.3. Basma ve Üfleme Yöntemi	25
3.3.4. Sıvama Yöntemi.....	26
3.3.5. Düz Plaka Haddeleme	26
3.3.6. Yüzdürme Yöntemi.....	27

3.3.7.	Danner Yöntemi	28
3.3.8.	Savurmalı Spreyleme Yöntemi	28
3.3.9.	Cam Elyaf Çekilmesi Yöntemi	29
3.3.10.	Çevirme Savurma Yöntemi.....	30
3.3.11.	Sarma Yöntemi.....	30
3.3.12.	Dökme-Silindirme Yöntemi.....	31
3.3.13.	Çekme Yöntemi	31
3.4.	Cam Türleri ve Kullanım Alanları	33
3.4.1.	Soda Klasik Camları	33
3.4.2.	Kurşun Camları	33
3.4.3.	Borosilikat Camları	33
3.4.4.	Alüminasilikat Camları	34
3.4.5.	Silis Camları.....	34
3.4.6.	Düz Camlar	34
3.4.7.	Levha Şeklindeki Camlar	35
3.4.8.	Pencere Camları	35
3.4.9.	Güneş Kontrol Camı	35
3.4.10.	Mat Camlar.....	36
3.4.11.	Empire Camlar	36
3.4.12.	Cam Duvar Tuğlaları.....	36
3.4.13.	Cam Kiremit.....	37
3.4.14.	U Profil Camlar	37
3.4.15.	Cam Mozaikler.....	37
3.4.16.	Cam Lifler	38
3.4.17.	Cam Köpüğü	38
4.	LOW-E CAMLAR.....	39
4.1.	Low-e Camların Üretim Şekli ve Kullanım Alanları	40
4.2.	Low-e Camların Avantajları.....	44
5.	METARYAL VE YÖNTEM	46
5.1.	Materyal.....	46
5.1.1.	Deneylerin Malzemeleri	46
5.1.2.	Deney Numunelerin Hazırlanması	46
5.1.3.	Isı Ölçme Cihazları	50
5.1.4.	Yüzey Direnç Ölçme Cihazı	51
5.1.	Yöntem	52
5.1.1.	Deneyin Yapılışı.....	52
5.1.2.	Camların Kırılma Testi	54
5.2.	Deneylerin Sonuçları	57
5.2.1.	TEC-15 Cam Deneyi Sonuçları	58
5.2.2.	Planibel G Cam Deneyi Sonuçları	65
5.2.3.	G fast Cam Deneyi Sonuçları.....	72
5.2.4.	Camların Karşılaştırılması	79
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
7.	KAYNAKLAR	85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Montaj sensörleri ve ölçüm süreci (Kim vd., 2018)	10
Şekil 2.2 Taşınabilir iletim katsayısı ölçer Netzsch Uglass cihazı (Kim vd., 2018)	10
Şekil 2.3 Ara boşluğa bağlı olarak low-e kaplamalı ve kaplamasız çift camlı panellerin termal iletkenliği (Kim vd., 2018).....	11
Şekil 3.1 Cam şekillendirme ezme presleme yöntemi	24
Şekil 3.2 Üfleterek şekillendirme yöntemi işlem sırası	25
Şekil 3.3 Basma ve üfleme yöntemi işlem sırası	25
Şekil 3.4 Sıvama yöntemi işlem sırası	26
Şekil 3.5 Düz plaka haddeleme yöntemi	27
Şekil 3.6 Cam yüzdürme yöntemi.....	28
Şekil 3.7 Danner yöntemi	28
Şekil 3.8 Cam elyaf çekilme yöntemi	29
Şekil 3.9 Dökme silindirme yöntemi	31
Şekil 3.10 Cam çekme yöntemi	32
Şekil 4.1 Pirolitik kaplama yöntemi (Teber, 2018).....	41
Şekil 4.2 Low-e vakum altında sıçratma yöntemi (Teber, 2018)	41
Şekil 4.3 Düz cam ve çok katmanlı camların yansıtma değerleri.....	42
Şekil 4.4 Low-e camın fırında kullanımı	43
Şekil 5.1 Camın prop ile sıcaklığının ölçüldüğü noktalar (mm).....	53
Şekil 5.2 TEC-15 camı 1. numune deney sonuçları	58
Şekil 5.3 TEC-15 camı 2. numune deney sonuçları	59
Şekil 5.4 TEC-15 camı 3. numune deney sonuçları	60
Şekil 5.5 TEC-15 camı 4. numune deney sonuçları	60
Şekil 5.6 TEC-15 camı 5. numune deney sonuçları	61
Şekil 5.7 TEC-15 camı 6. numune deney sonuçları	62
Şekil 5.8 TEC-15 camı 7. numune deney sonuçları	62
Şekil 5.9 TEC-15 camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı.....	63
Şekil 5.10 Planibel G camı 1. numune deney sonuçları	65
Şekil 5.11 Planibel G camı 2. numune deney sonuçları	66
Şekil 5.12 Planibel G camı 3. numune deney sonuçları	66
Şekil 5.13 Planibel G camı 4. numune deney sonuçları	67
Şekil 5.14 Planibel G camı 5. numune deney sonuçları	68
Şekil 5.15 Planibel G camı 6. numune deney sonuçları	68
Şekil 5.16 Planibel G camı 7. numune deney sonuçları	69
Şekil 5.17 Planibel G camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı.....	69
Şekil 5.18 G Fast camı 1. numune deney sonuçları.....	72
Şekil 5.19 G Fast camı 2. numune deney sonuçları.....	72
Şekil 5.20 G Fast camı 3. numune deney sonuçları.....	73
Şekil 5.21 G Fast camı 4. numune deney sonuçları.....	74
Şekil 5.22 G Fast camı 5. numune deney sonuçları.....	74
Şekil 5.23 G Fast camı 6. numune deney sonuçları.....	75
Şekil 5.24 G Fast camı 7. numune deney sonuçları.....	76
Şekil 5.25 G-Fast camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı.....	76
Şekil 5.26 Camların anlık sıcaklıklarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması 79	79

Şekil 5.27 Camların 3 dk bekleme sonrasında sıcaklıklarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması	79
--	----



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Konut binasının enerji tüketim analizi için tercih edilen cam ve çerçeve seçenekleri (Gültekin & Bagherdi, 2015)	5
Tablo 2.2 İller bazında kullanılan cam türüne göre harcanan enerji miktarı (Gültekin & Bagherdi, 2015)	5
Tablo 2.3 Mekan ısıtması için doğal gaz kullanımından kaynaklanan elektrik tüketim oranları (Gültekin & Bagherdi, 2015).....	6
Tablo 2.4 Farklı renklerdeki çift cam ünitelerinin ara boşluğunun durgun hava ve argon gazı ile doldurulması sonucu elde edilen U (toplam ısı geçiş katsayısı) değerlerinin karşılaştırılması (Şenkal, 2005)	8
Tablo 2.5 Yapı koşullarına bağlı olarak çift camlı panelin termal geçirgenliği teorik hesabı ve ölçülen değerler (Kim vd., 2018).....	11
Tablo 5.1 Unit UT320D cihazının teknik verileri (UNİT, 2022)	50
Tablo 5.2 Fluke 52 II cihazı teknik verileri (FLUKE, 2022)	51
Tablo 5.3 Camların temperleme işlemi öncesi ve sonrası yüzey direnç değerleri	81

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1 Low-e cam test ekipmanları (Kim vd., 2018)	12
Fotoğraf 4.1 Deney numunesinin yüzey kaplama kontrolü	40
Fotoğraf 4.2 Low-e cam dış cephe uygulaması (Şenkal, 2005).....	44
Fotoğraf 5.1 Numunelerin kesilmesi için kullanılan cihaz Hegla Rapidline	47
Fotoğraf 5.2 Kesim işlemi yapılan low-e camların rodaj işlemi öncesi uzunluk ölçüsü (mm)	47
Fotoğraf 5.3 Kesim işlemi yapılan camların rodaj işlemi öncesi genişlik ölçüsü (mm).....	48
Fotoğraf 5.4 Low-e camların rodaj işlemi	49
Fotoğraf 5.5 Low-e camların temperlenme işlemi.....	49
Fotoğraf 5.6 EDTM RC2175 cihazının ön ve arka görseli	51
Fotoğraf 5.7 Camların sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan cihazlar.....	52
Fotoğraf 5.8 Deney cihazlarının yerleştirilmesi.....	54
Fotoğraf 5.9 Kırılma testi için kullanılan securit çekiçi ve cam kırıcı aparat.....	56
Fotoğraf 5.10 Kırılma sonucunda camda oluşan minimum kırık cam sayısı.....	56
Fotoğraf 5.11 Kırılma sonucunda camda oluşan maksimum kırık cam sayısı	57
Fotoğraf 5.12 EDTM RC2175 cihazı temperleme öncesi TEC-15 camı yüzey direnç ölçümü sonucu	64
Fotoğraf 5.13 EDTM RC2175 cihazı temperleme sonrası TEC-15 camı yüzey direnç ölçümü sonucu	64
Fotoğraf 5.14 EDTM RC2175 cihazı temperleme öncesi Planibel G camı yüzey direnç ölçümü sonucu	70
Fotoğraf 5.15 EDTM RC2175 cihazı temperleme sonrası Planibel G camı yüzey direnç ölçümü sonucu	71
Fotoğraf 5.16 EDTM RC2175 cihazı temperleme öncesi G Fast camı yüzey direnç ölçümü sonucu	77
Fotoğraf 5.17 EDTM RC2175 cihazı temperleme sonrası G Fast camı yüzey direnç ölçümü sonucu	78

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

Al₂O₂	:Alüminyum Oksit
B₂O₂	:Bor Oksit
BaO	:Baryum Oksit
CaO	:Kalsiyum Oksit
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
°C	:Santigrat Derece
Fe₂O₃	:Demir Oksit
°K	:Kelvin
K₂O	:Kalsiyum Oksit
LOW-E	:Düşük Yayımlı
MgO	:Magnezyum Oksit
PbO	:Kurşun Oksit
SiO₂	:Silisyum Oksit
SiO_x,	:Silisyum Oksit
TiO_x	:Titanyum Oksit
yy	:Yüzyıl
ZnSnO_x	:Çinko Kalay Oksit
W	:Watt
Λ	:Lamda

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, yapıcı yorumlarıyla daima desteklerini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK, yardımcı danışman Doç. Dr. Musa BÜYÜKADA hocama ve saygıdeğer Arş. Gör. Mehmet Fatih KAHRAMAN hocama teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullandığım numuneleri bana karşılıksız sağlayan ve desteklerini esirgemeyen BOLU YORGLASS fabrikasına teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen biricik aileme teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Globalleşen dünyada camın kullanımı oldukça yaygın olmasıyla birlikte kullanım alanı her geçen gün daha da artmaktadır. 21.yy'da fosil yakıtların hızla tükenmesi enerji tasarrufunun önemini bize bir kez daha göstermiştir. Bu sebeple her geçen gün enerji tasarrufu daha da önemli hale gelmiştir. Isıtma ve soğutmaya harcanan enerji endüstriyel kullanımlarda ve evlerde oldukça fazladır. Kullanılan bu enerjinin tüketimini konfordan feragat etmeden azaltmak mümkündür. Bu amaçla, modern teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir. Bu gelişmelerden biriside tez çalışmasının konusu olan low-e camlarla ilgilidir.

Low-e camların üstlerinde bulunan kaplama sayesinde ısı yalıtımı olarak geleneksel camlara kıyasla daha yüksek performans göstermektedir. Low-e camlar güneşten gelen ışığın belli dalga boylarını yansıtır. Bu sebeple low-e camların ısı yalıtım özelliği artarak iş yerlerinde veya evlerde enerji tasarrufu yapmamızı sağlar.

Low-e camların sağlamış olduğu enerji tasarrufu camların yüzeylerinde bulunan kaplamalar ile birlikte değişkenlik göstermektedir. Ancak genel olarak low-e kaplamalı camların normal camlara oranla yüzde 40'a kadar enerji tasarrufu sağladığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu durum enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlamaktadır. Bazı durumlarda ise low-e kaplamalar yeni binalara uygulandığında daha yüksek enerji tasarrufuna imkan vermektedir.

Camların üstlerinde bulunan kaplama sayesinde enerji tasarrufu sağlanmasının yanında camlardan ışık geçirgenliğinin de fazla olması istenmektedir. Camların yüzeylerine yapılan farklı kalınlıktaki low-e kaplamalar ile camın saydamlığı ve enerji tasarrufu arasında bir bağ vardır. Dış cephe kaplaması gibi olan yerlerde saydamlık önemli olduğu için bu duruma uygun kaplama yapılmaktadır.

Enerji tasarrufu sağlayan low-e camların çizilme direnci düşüktür. Bu sebeple camların üretiminde ve nakliye kısmında çizikler meydana gelebilmektedir. Bu durumu en aza indirmek için bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda camlara son katman kaplaması uygulandığında çizilme direncinin arttığı görülmektedir (Teber, 2018).

Yapılan tez çalışmasında low-e camların çalışma şekli, avantaj ve dezavantajları hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca bu camların hangi amaçla ve nerede kullanıldığı hakkında bazı örneklerden bahsedilmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde enerji ihtiyacının artışı ile birlikte enerji tasarrufunun önemi artmaktadır. Enerji tasarrufunun yapıldığı alanlardan birisi de low-e camlardır. Yapılan bir çalışmada güneş panellerinin üzerinde kullanılan standart cam yerine low-e cam kullanıldığında üretilen enerjide artış olduğu test edilmiştir. Kaplama yapılan camların normal camlara göre %5,30 daha fazla enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Camın üstünde bulunan kaplama ile güneş paneline gelen ısı enerjisi olabildiğince azaltılmış olup güneş panelinin verimi arttırılmıştır. Bu sayede enerji üretiminde artış sağlanmıştır (Akıskalıoğlu, 2019).

Low-e camların üretiminde camların hasar almaması ve çizilmemesi oldukça önemlidir. Üretim esnasında çizilen camlar kimi zaman mikro boyutta olurken kimi zaman da bu çizilmelerin boyutları gözle görülebilir boyutlara ulaşmaktadır. Yapılan bir çalışmada low-e kaplamanın üstü farklı katman kalınlığında ve farklı türde malzemeler kullanılarak test yapılmıştır. Test sonucunda ise katman kalınlığının artışının belli bir seviyeden sonra cama olumlu etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada ise 5 nm, 10 nm ve 20 nm kalınlıklarda ve SiO_x , TiO_x , ZnSnO_x ve SiN kaplamalar kullanılmıştır. Camların çiziklerini oluşturmak için farklı batıcı uç ve farklı batma kuvvetleri ile deney yapılmıştır. Low-e kaplamanın üstüne yapılan son katman kaplama olarak kullanılan bu kaplamalarda en verimli sonuç 10 nm kalınlığında ve TiO_x malzemesi kullanılarak elde edildiği test edilmiştir. Bunlara ek olarak yapılan çalışmada çizik boyutlarının birbirine çok yakın değerde olmasına rağmen görünebilirlik değerleri kullanılan malzemeye göre değişkenlik göstermektedir (Teber, 2018).

Camların üstüne yapılan kaplamalar ile camların çizilme direnci arttırılmış olsa da farklı optik özelliklerin çiziklerin görünebilirlik değerinin etkilediği gözlemlenmiştir. Yapılan son katman kaplama tasarımlarının değişmesi ile camın özellikleri optimize edildiğinde oluşabilecek çiziklerin görünebilirlik değerinin düşürülebileceği ve camdan beklenen optik özellik değerlerine ulaşabileceği düşünülmektedir (Teber, 2018).

Low-e camların kullanım alanlarından biriside konutlarda dış cephe uygulamasıdır. Camın saydam bir yapıya sahip olması binalardaki kullanımı

yaygınlaştıran en önemli unsurdur. Güneş enerjisi ise binalardaki enerji tüketimini etkileyen parametrelerden birisidir. Türkiye’de tüketilen kaynakların %72’si ithal edilmektedir. 1970-2006 yılları arasında nüfusun %106, enerji tüketiminin ise %146 arttığı görülmektedir. Türkiye’de bulunan yapıların ısıtılması için harcanan enerji miktarı İsveç’ten %73, Almanya’dan %50 ve Amerika’dan %60 daha fazladır. Binalardaki ısı transferi önemli ölçüde pencereden gerçekleşmektedir. Pencereden ısı kaybını azaltmak için farklı cam türleri ve camlar arasındaki boşluklara kullanılan gazlar bulunmaktadır. Bu sayede ısı transferi olabildiğince düşürülerek enerjiden tasarruf sağlanmaktadır. 2009 yılında GFK Türkiye (Growth from Knowledge) tarafından yapılan enerji verimliliğinin araştırılması kapsamında binalarda kullanılan enerjinin %82 kadarının ısıtma amaçlı tüketildiği tespit edilmiştir (Gültekin & Bagherdi, 2015).

Low-e kaplamalı camlar kış aylarında ısıtma enerjisini azaltırken yaz aylarında ise soğutmaya harcanan enerjiyi önemli ölçüde azaltmaktadır. Kaplamalı camların kullanılmasıyla birlikte konfor seviyesinden feragat etmeden enerjiden tasarruf edilebilmektedir. Bu sebeple gün geçtikçe kaplamalı camların kullanım oranlarında artış görülmektedir (Gültekin & Bagherdi, 2015).

Camlarda güneş kontrolünün etkili olabilmesi için camın dış yüzeyine kaplama yapılmaktadır. Güneşten gelen ışınlar kısa dalga boyları ile yayılmaktadır. Güneşten yayılan kısa dalga boylarındaki ışınlar konutların içine girerek iç mekanda bulunan eşyalar tarafından emilim sağlanır ve iç ortamda bulunan eşyalar ısınır. Isınan eşyalar geri ışıma yaparak ortama uzun dalga boylu ışıma gerçekleştirir. İç mekanda bulunan ısıtıcı sistemlerde uzun dalga boylu ışıma yapmaktadır. Güneş kontrollü low-e camlar ise uzun boylu ışımaları azaltarak ısı kaybını azaltmaktadır. Pencerelede kullanılan düz camlarda herhangi bir kaplama olmadığından ısıyı kısa zamanda iletir. Kaplamalı olan camlar ise soğuk kış aylarında dışarı ısı geçişini azaltırken, sıcak yaz aylarında içerideki soğuk havayı muhafaza eder. Low-e camların dış yüzeylerinde metal oksit kaplama bulunmakta ve bu kaplamalar camın saydamlık değerini %77’nin altına düşürmemesi sebebiyle doğal gün ışığı kullanımına engel olmamaktadır (Gültekin & Bagherdi, 2015).

Dış cephelerde bulunan camların ısı performansı ile yapılan bir çalışmada eQUEST programı ile deney gerçekleştirilmiştir. Deneyde tek ısıcam, tek low-e

cam, çift ısı cam ve çift low-e cam olmak üzere 4 farklı cam türü kullanılmıştır. Bu dört cam türü 3 farklı derece gün bölgesinde test edilmiştir. Tablo 2.1’de konut binasının enerji tüketim analizi için tercih edilen cam ve çerçeve seçenekleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Konut binasının enerji tüketim analizi için tercih edilen cam ve çerçeve seçenekleri (Gültekin & Bagherdi, 2015)

eQUEST Dahilinde Kullanılan Cam ve Çerçeve Seçenekleri	
Cam Sınıfı	Tek Isıcam (Single Clear)
	Tek Low-E Cam (Single Low-e)
	Çift Isıcam (Double Clear)
	Çift Low-E Cam (Double Low-e)
Cam Tipi	Tek Isıcam, 1.4in (Single Clear, 1.4in)
	Tek Low-E Cam [E2=.2], 1.4 in (Single Low-e [E2=.2], 1.4 in)
	Çift Isıcam (Double Clear, 1.4in,1.2, [Argon])
	Çift Low-E Cam [E2=.1] ,1.4in,1.2in,[Argon] (Double Low-E [E2=.1] ,1.4in,1.2in,[Argon])
Çerçeve Tipi	Ins Fibergls/Vinyl Operable
	Ins Fibergls/Vinyl Operable
	Ins Fibergls/Vinyl Oper,Mtl Spacer
	Ins Fibergls/Vinyl Oper,Mtl Spacer

Tablo 2.2 İller bazında kullanılan cam türüne göre harcanan enerji miktarı (Gültekin & Bagherdi, 2015)

İl	Cam tipi	Isıtma (kWh) (Mekân Isıtması)
İzmir	Tek Isıcam, 1.4in	51.143839
İzmir	Tek Low-E Cam (e2=.2) 1.4 in	30.165809
İzmir	Çift Isıcam 1.4in,1.2-Argon	33.067213
İzmir	Çift Low-E Cam (e2=.1) 1.4 in,1.2 in,Argon	26.153666
İstanbul	Tek Isıcam, 1.4in	98.477753
İstanbul	Tek Low-E Cam (e2=.2) 1.4 in	62.740663
İstanbul	Çift Isıcam 1.4in,1.2-Argon	66.782113
İstanbul	Çift Low-E Cam (e2=.1) 1.4 in,1.2 in,Argon	53.350664
Ankara	Tek Isıcam, 1.4in	178.969733
Ankara	Tek Low-E Cam (e2=.2) 1.4 in	129.742579
Ankara	Çift Isıcam 1.4in,1.2-Argon	134.601698
Ankara	Çift Low-E Cam (e2=.1) 1.4 in,1.2 in,Argon	113.998799

Tablo 2.1’de gösterildiği gibi 4 farklı cam kullanılmış ve Tablo 2.2’de gösterildiği üzere 12 farklı senaryo test edilmiştir. Test edilen senaryolar karşılaştırıldığında İzmir’de tek ısıcam kullanılan konutların çift low-e kullanan konutlara oranla %48 oranında tüketim farklılığı oluşmaktadır. Bu durum İstanbul için %45, Ankara için ise %36 olduğu görülmektedir (Gültekin & Bagherdi, 2015).

I. Derece, II. Derece ve III. Derece gün bölgelerinde bulunan ve farklı tipte camlar kullanılan deneyde ısıtma için doğalgaz kullanıldığı varsayılmış ve kullanılan doğalgaz neticesinde oluşan elektrik gideri Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Mekan ısıtması için doğal gaz kullanımından kaynaklanan elektrik tüketim oranları (Gültekin & Bagherdi, 2015)

Cam Tipleri	Gün Bölgeleri		
	I.Derece (İzmir)	II.Derece (İstanbul)	III.Derece (Ankara)
Tek ısıcam 1.4in	% 44 (S1)	% 58 (S5)	% 68 (S9)
Tek Low-E Cam (e2=.2) 1.4 in	% 31 (S2)	% 47 (S6)	% 61 (S10)
Çift ısıcam 1.4in,1.2-Argon	% 34 (S3)	% 48 (S7)	% 62 (S11)
Çift Low-E Cam (e2=.1) 1.4 in,1.2 in,Argon	% 28 (S4)	% 43 (S8)	% 58 (S12)

İzmir bölgesi için kullanılan camlara bakıldığında, doğalgaz kullanımından kaynaklı elektrik enerjisinin kullanımı en fazla tek ısıcamda (S1) %44’lük değerde olduğu tek low-e camda (S2) %31 olduğu, çift ısıcamda (S3) %34 olduğu ve çift low-e camda ise (S4) %28 olduğu görülmüş. Buna bağlı olarak enerji tüketiminin en yüksek S1 senaryosunda ve en düşük enerji tüketiminin low-e camın kullanıldığı S4 senaryosunda olduğu test edilmiştir. Bu deneye göre tek cam kullanılan konutun çift low-e cam kullanan konuta oranlar %36 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir (Gültekin & Bagherdi, 2015).

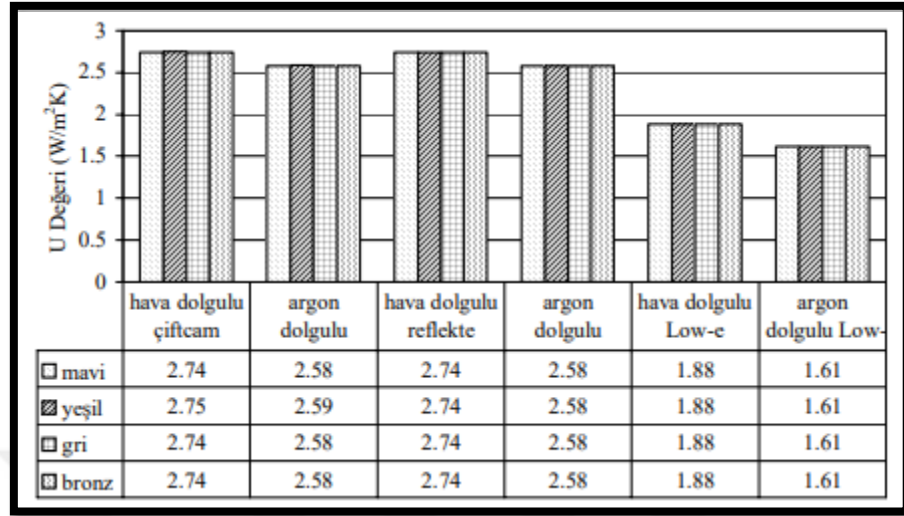
İstanbul bölgesinde ise tek ısıcam (S5) %58, tek low-e camın (S6) %47, çift ısıcamın (S7) %48 ve çift low-e cam kullanılan konutta ise %43 oranındadır. Bu elektrik kullanım oranlarına bakıldığında ise tek ısıcam kullanmak yerine çift low-e cam kullanıldığında doğalgaza bağlı elektrik enerji tüketiminin %25 azaldığı görülmektedir.

III. derece gün bölgesinde olan Ankara’da cam türüne göre harcanan enerji miktarı incelediği zaman tek ısı cam kullanıldığında %68, tek low-e camda %61, çift ısıcam kullananlarda %48 ve çift low-e cam kullananlarda ise %43 olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak tek ısıcam kullanılan konutların çift low-e cam kullanan konutlara oranla %15 gibi bir fark olmaktadır.

İncelenen tüm bölgelerde ise en fazla enerji tüketiminin tek ısıcam kullanılan konutlarda olduğu en düşük enerji tüketiminin ise çift low-e cam kullanan konutlarda olduğu görülmektedir (Gültekin & Bagherdi, 2015).

Dış cephe kaplamaları ile ilgili yapılan bir başka çalışmada beş farklı cam türü testi incelenmiştir. Tablo 2.4’te gösterildiği üzere camların bazılarında hava dolgusu olarak argon gazı kullanılmış bazılarında ise farklı türde kaplama yapılmıştır (Şenkal, 2005).

Tablo 2.4 Farklı renklerdeki çift cam ünitelerinin ara boşluğunun durgun hava ve argon gazı ile doldurulması sonucu elde edilen U (toplam ısı geçiş katsayısı) değerlerinin karşılaştırılması (Şenkal, 2005)



Camların ara boşluklarına koyulan hava yerine argon gazı kullanıldığında ısı iletim katsayılarında düz cam için %6, reflekte cam için %6, low-e cam için ise %14 gibi düşüş olduğu görülmektedir. Camlarda ısı iletimi ne kadar düşük olursa, yaz aylarında dış ortamdan iç ortama, kış aylarında ise iç ortamdan dış ortama ısı geçişi o kadar azaltılmış olur bu sayede enerjiden tasarruf edilebilmektedir. Hava dolgulu çift cam yerine argon gazı kullanılarak low-e cam kullanıldığında %41 oranında ısı iletim katsayısı düşmektedir. Güneş enerjisinden yararlanılmak istenmeyen alanlarda low-e cam kullanıldığında güneşten gelen uzun dalga boylu ışınların geçişi olabildiğince engellenerek dışarıdan ısı girişini de azaltmaktadır. Bu sayede dış ortamdan gelen ısı geçiş miktarı düşürülebildiği gibi iç ortamdan da dış ortama ısı geçişi azalmaktadır (Şenkal, 2005).

Isıl geçirgenliğin belirlenmesi için yapılan bir çalışmada low-e camların dış katmanında bulunan kaplama sayesinde normal camlara oranla %41'e kadar yüksek performans verebildiği görülmüştür. Ayrıca camın ara boşluğu %90 argon gazı ile doldurulduğunda ise normal cama oranla yaklaşık $0.15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ daha düşük transfer katsayısı oluşmaktadır. Yapılan çalışmada ölçüm doğruluğunu arttırabilmek adına taşınabilir Netzsch Uglass cihazı kullanılmıştır (Kim vd., 2018).

Binalardaki pencereler enerji kaybı açısından en önemli bölgelerden biridir. Bu sebeple yeni yapılan binalarda kullanılan camlar enerji performansı açısından

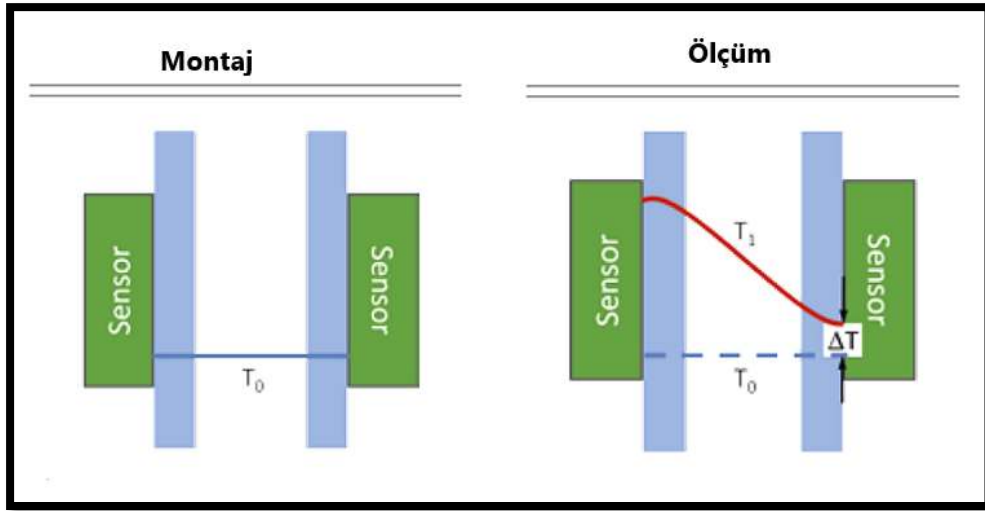
oldukça önemlidir. Kullanılan camlar low-e kaplamalı, çift cam, üçlü cam ve reflekte cam gibi malzemeler olabilmektedir. Low-e kaplamalı camlar uzun dalga boylu kızılötesi ışınları standart camlara göre daha az geçirdiği için tercih sebebi olabilmektedir (Kim vd., 2018).

Cam malzemesinin termal geçirgenliğinin belirlenmesi normal bir malzemeye göre oldukça zordur, bunun sebebi ise camın birden fazla katmandan oluşması, katmanlar arasında kaplamaların olması ve bazı gazların kullanılmasıdır. Bununla birlikte eski yapılardaki pencerelerin sökülmeden ısı geçirgenliğinin hesaplanması oldukça zordur ve standart test yöntemleri ile camların geçirgenlik katsayısı örneklemeler ile sınırlı kalmaktadır (Kim vd., 2018).

DIN EN 673, cam malzemesinin ısı geçişinin camın kalınlığı, ara boşluk boyutları, emisivite, cam kalınlığı ve gaz doluluk seviyesi gibi referans verileri ile matematiksel olarak hesaplanması için oluşturulmuş bir standarttır (Kim vd., 2018).

Camların ısı performansının incelenmesinde özellikle yalıtımlı camlar için tasarlanan dinamik ısı kaynağı yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem iki ucu ısıtılmış sensör okuyucular ile yapılmaktadır. Cam malzemesinin durumu kısa bir zaman aralığında güvenilirliği yüksek şekilde değerlendirilebilmektedir.

Şekiller 2.1 ve 2.2’de gösterildiği gibi ölçüm aletleri vakum pompası aracılığı ile camın her iki yüzeyine kolay bir şekilde monte edilebilmektedir. Montajdan sonra iki sensörden birine diğerinden yaklaşık 7 °C ila 8 °C daha fazla sıcaklık uygulanır ve sensörler arasındaki sıcaklık artışından ΔT ’yi hesaplar. Farklı sıcaklıkların zamana karşı değişimi analiz edilerek camın termal katsayısı belirlenir.

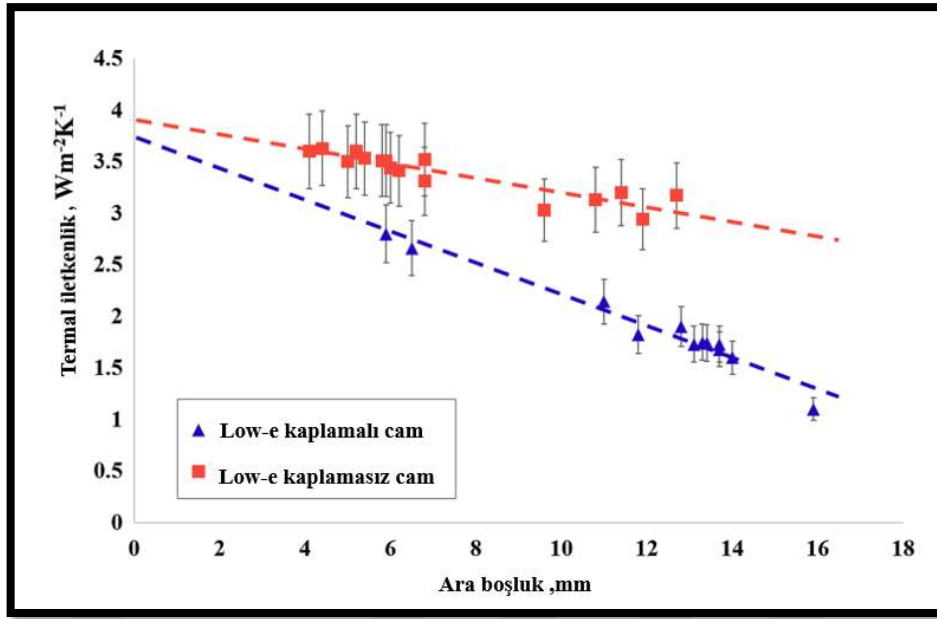


Şekil 2.1 Montaj sensörleri ve ölçüm süreci (Kim vd., 2018)



Şekil 2.2 Taşınabilir iletim katsayısı ölçer Netzsch Uglass cihazı (Kim vd., 2018)

Camların arasında bulunan boşluk arttıkça camların ısı geçiş katsayıları lineer bir şekilde düşmektedir. 14 mm değerine geldiğinde ısı geçiş katsayısı yarıya kadar düştüğü görülmektedir. Camlardaki ara boşluğu arttırmak her ne kadar ısı geçişi için iyi gözükse de ara boşluk sebebiyle camın fazla yer kaplaması ve camda oluşan kırılma durumu olumsuz etki oluşturmaktadır. Şekil 2.3’de ara boşluğa bağlı olarak low-e kaplamalı ve kaplamasız çift camlı panellerin termal iletkenliği verilmiştir.



Şekil 2.3 Ara boşluğa bağlı olarak low-e kaplamalı ve kaplamasız çift camlı panellerin termal iletkenliği (Kim vd., 2018)

Camların yalıtım özelliklerini ölçmek için 4 farklı cam kullanılan testte ilk olarak %90 argon gazı ve low-e kaplama sonra düz low-e cam arasında hava boşluğu daha sonra ise low-e kaplama olmadan %90 argon gazı ve low-e kaplama olmadan ara boşluğunda hava ile test edilmiştir. Yapılan bu testte argon gazı ve low-e kaplama birlikte kullanıldığında $1,63 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, low-e kaplamasız ve argon gazı kullanımı olmadan ise $2,93 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ değeri elde edilmektedir. Test sonucunda oluşan değerler teorik olarak hesaplanan değerlere oldukça yakındır. Fotoğraf 2.1’de low-e cam test ekipmanları verilmiştir (Kim vd., 2018).

Tablo 2.5 Yapı koşullarına bağlı olarak çift camlı panelin termal geçirgenliği teorik hesabı ve ölçülen değerler (Kim vd., 2018)

Numune	Yapı (1.Cam/Boşluk/2.cam)	Yalıtım Kaplaması	Gaz dolgu	Isı Geçirgenliği	
				Ölçülen [Wm ⁻² K ⁻¹]	Hesaplanan [Wm ⁻² K ⁻¹]
A	5 mm/C/14 mm/ 5 mm	Low-e kaplamalı	Argon (90%)	1.63 ± 0.16	1.60 ± 0.16
B			Hava	1.89 ± 0.19	1.85 ± 0.19
C	5 mm/14 mm/ 5 mm	Low-e kaplamasız	Argon (90%)	2.77 ± 0.28	2.75 ± 0.28
D			Hava	2.93 ± 0.29	2.89 ± 0.29



Fotoğraf 2.1 Low-e cam test ekipmanları (Kim vd., 2018)

Tablo 2.5'e bakıldığında A örneğinin C örneğine kıyasla ısı geçirgenlik performansı %41 daha fazladır. A örneği ile D örneği kıyaslandığında ise bu oran %44'e çıkmaktadır. Argon gazının kullanımıyla ise ısı geçiş katsayısı $0.15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ düşmektedir. Bu durumlar incelendiğinde kaplamalı camların normal camlara göre daha verimli olduğu, argon gazının ise etkili bir parametre olduğu açıkça görülmektedir (Kim vd., 2018).

2013 yılında yapılan bir araştırmada ABD'de binaların ısıtılması ve soğutulması için harcanan enerjinin, toplama enerjinin %14'ünü oluşturduğu tespit edilmiştir. Binalarda oluşan yüksek enerjini kaybının sebeplerinden biri ise camlardan oluşan ısı kayıplarıdır. Sıradan binalardaki tüketilen enerjinin %30'unu genellikle pencere, kapı ve çatılar oluşturmaktadır. ABD'de sadece pencerelerden kaynaklı ısı kayıp miktarının bir yıl için kabaca 40 milyar dolar olduğu düşünülmektedir. Standart camlar, radyasyon ile oluşan ısı kaybının %60'ını oluşturmaktadır (Ding & Clavero, 2017).

3. CAM

3.1. Camın Tarihçesi

İnsanlığın var olduğundan beri doğal camların yer yüzünde varlığı bilinmektedir. Bu camlar, yeryüzüne düşen meteor veya şimşek çakması sonucu oluşan yüksek sıcaklıktan sonra ani soğuma ile oluşmuşlardır. Geçmiş dönemden cam malzemelerini incelediğimizde camın tarihinin taş devrine dayandığını görebiliyoruz. Günümüzde kullanılan camlar ise birkaç bin yıldır kullanılmaktadır.

Camdan modern anlamda mozaik yapımına ptolemaic devirde İskenderiye’de ve Antik Roma medeniyetinde rastlanılmıştır. Üstünde tarih yazılmış en eski cam ise M.Ö 1551-1527 yılları arasında yaşamış olan Firavun Amenhotep’e ait iri boncuktur.

Yunanlı tarihçi olan Pliny’e göre Mezapotamya’da kervancıların yaktığı ateş sonucunda kaza ile karışan soda ve kumun ergiyip cama dönüşmesi sonucu camcılık başlamıştır. Mezapotamya zamanında seramik boncuklar, seramik sırrı ile kaplanırdı. Seramiğin üzerinde bulunan bu sır bir çeşit camdır. M.Ö 2500’lerde boncuk yapımında ise tamamen bu cam malzemesi kullanılmıştır (Taştēmür, 2017).

Venedik’te 15. Yüzyıl zamanlarında ilk kristal cam icat edildi. 1675 yılında ise George Ravenscroft isminde cam ustası cama kursun oksit ekleyerek ilk kurşunlu camı bulmuştur. 1902 yılında ise büyük cam levhalar icat edilmiştir. 1904 yılında Micheal Joseph Owens’ın icat ettiği makinede kavanoz şişeler yapılmaya başlanmıştır.

Türk tarihinde camcılığın yeri oldukça fazladır. Yapılan kazı çalışmalarında Selçuklular ve Artuklular dönemine ait olan bazı cam işleri bulunmuştur. Bu cam işlerinden bazıları Diyarbakır’daki Artuk Sarayı’na ait olduğu bilinmektedir. Bulunan camların şekillerine ve yapısına bakıldığında camların mozaik cam küplerinden oluşmuş bir ejder şekli olduğu anlaşılmaktadır. O zamanlar Selçuklu devletinin başkenti olan Konya’da bulunan Kubadabad Sarayı’nda Fil gözü denilen bombeli kadeh ve tabağa benzeyen bir cam eşya çıkmıştır (Turhan, 2007; Öbelik, 2011 ; Taştēmür, 2017).

3.1.1. Camlar Hakkında Genel Bilgiler

Camın %90'dan fazlasını binlerce yıl önce olduğu gibi kireç, kum ve soda oluşturmaktadır. Günümüze kadar camın içeriğinde kullanılan malzemelerde önemli bir değişme olmamasına rağmen camın kalitesini etkileyen ikinci derecede öneme sahip maddelerde çokça değişiklik olmuştur. Cam sektöründe genelde son teknolojilerin kullanıldığı bilinmekte, son birkaç on yıldır yüzlerce yeni cam formülü bulunmasına rağmen dünyada eski teknolojileri kullanan tesisler de mevcuttur. Bunun başlıca sebebi yeni teknolojilerin pahalı ve zor olmasıdır.

Cam genelde saydam ya da yarısaydam halde kullanılan çoğunlukla sert ve kırılabilir yapıya sahip, birçok alanda kullanılan inorganik maddedir. Camlar çok eski dönemlerden beri gerek süs gerekse inşaat alanında kullanılmaktadır. 21. yüzyılda en ilkel aletlerden en gelişmiş teknolojiye kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Camın ana maddesi silisyum dioksit olup, ani soğutulmuş toprak alkali veya alkali metal oksitleriyle bazı metal oksitlerin çözünmesinden oluşan bir malzemedir. Camın üretimi esnasında hızlı soğuma ile kristal yapı yerine amorf yapı oluşur. Hızlı soğuma sayesinde camda mukavemet artış ile birlikte saydamlık artışı gözlemlenir. Camın kullanım alanlarına baktığımızda mutfak eşyaları, uzay sanayi, tıp, laboratuvar, ev eşyaları ve dekorasyon gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Hangi amaçla kullandığımıza bağlı olarak camın iç yapısı da değişmektedir. Bu gibi nedenlerle otomobil camı, dış cephe camı, çift taraflı low-e camı gibi birçok farklı cam türü görebiliriz (Öbelik, 2011).

Cam malzemenin sözlük anlamı soda veya potasyum bileşikleri katılmış silis kumunun ateşte eritilmesiyle yapılan sert, saydam ve çabuk kırılır cisimdir. Camlar oda sıcaklığında normal şartlarda katı haldedir. Eskilerden günümüze kadar camın kullanım alanları çok fazla değişmemekle birlikte bazı kullanım alanları da eklenmiştir. Cam yapı itibari ile birçok kimyasal malzemeye direnç gösterdiği için çeşitli araştırmalarda cama ihtiyaç duyulmuştur.

Camlar katılaşıırken saydam ya da yarı saydam davranış gösterdikleri için laboratuvarlarda deney yapan insanlar deney yaptıkları cam malzemenin içinde ne olduğunu görmekte zorlanmazlar. Bundan 100 sene öncesinde laboratuvar malzemeleri çoğu bölgede bulunmamaktaydı. Kullanılan camların kimyasal

dayanımı da çok yüksek değildi. Sonrasında gelişen teknoloji ile camın içerisine farklı kimyasal maddeler eklenerek daha dayanıklı hale getirildi. Fakat bu cam ürünleri ani ısınma ve soğumaya karşı çok dayanıklı olmadıkları için camda iç gerilme sonucu çatlama ve kırılma meydana gelebiliyordu (Harmancı, 2018).

Başlarda cam üreticileri camın çatlamaya karşı direncini arttırmak için camı çok ince ürettiyordu. Camın inceliği sayesinde termal şoklarda camın kırılma eğilimi bir nebze de olsa azalmıştı. Fakat camın inceliği her ne kadar camın kırılma eğilimini azaltsa da camın darbelere karşı dayanımını düşürüyordu. Bu gibi sebeplerden camın iç yapısında bazı geliştirmeler yapılmaya başlandı.

Cam 800-1000 °C sıcaklığa çıkarıldığı zaman yumuşamaya başlar ve şekil alabilir hale gelir. Camın dayanımını içeriğinde bulunan silis ve alüminyum oranları ile birlikte değiştirmektedir. Isıtıldığı zaman viskozitesi düşmekte soğutulduğunda ise artmaktadır. Cam amorf yapıda olmakla birlikte kristalleştirilemez.

Camın Özellikleri;

- Aşınmaya karşı dirençli
- Optik olarak kullanılabilir
- Esnemeye karşı mukavemetli
- Kimyasal direnci yüksek
- Saydam ve ısı direnci yüksek
- Isıl şoklara dirençli

Camın Mekanik özellikleri;

- Basma Mukavemeti: $4 \cdot 10^4 - 12 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$
- Çekme Mukavemeti: $2 \cdot 10^3 - 9 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$
- Elastisite Modülü: $6 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$
- Poisson Oranı: 0.22
- Yoğunluk: Apartman dairelerinde kullanılan pencere camları için 2500-2700 kg/m³
- Sertlik: Apartman dairelerinde kullanılan pencere camları için Mohs sertlik değeri 5,5 dolaylarındadır.
- Isınma değeri: 795 J/kg°C

- Isı geçiş katsayısı: 1.16 W/m°C
- Kırılma indisi: Kristal cam için 1,6
- Erime noktası: 1500-1600 °C
- Yumuşama noktası: 820-900 °C Borosilikat cam için

Yukarıda verilen camın özellikleri camın iç yapısı ve görmüş olduğu ısıl işlemlerle birlikte değişiklik göstermektedir (Harmancı, 2018).

3.1.2. Camın Kimyasal zellikleri

Camın gazlar ve sıvılar ile gösterdiği reaksiyon direnci kimyasal dayanıklılık olarak isimlendirilir. Camın kimyasal dayanım özelliği sayesinde laboratuvar, ilaç sektörü gibi yerlerde kullanılmaktadır. İlaç sektöründe kullanılan camlar içerisine koyulan ilaçlar ile kimyasal tepkimeye girmemesi önemli bir husustur. Bu tür camlarda yüksek kimyasal dayanım olması gerekmektedir.

Cam yapı itibari ile birçok maddeye kimyasal dayanıklılık göstermektedir. Hidroflorik asit ve bazı alkali çözeltilere karşı dayanımı düşüktür. Bu sebeple hidroflorik asit camın yüzey işleme ve matlaştırma prosesinde kullanılmaktadır. Su camı olarak tanımlanan camların içeriğinde CaCO₃ (kalsiyum karbonat) yeterince veya hiç bulunmadıkları için suya karşı dayanımları düşüktür. Dış cephe camları gibi su ile etkileşime girebilecek camların bileşiklerine CaO (kireç) eklenmelidir.

3.1.3. Camın Mekanik zellikleri

Cam yapımında kullanılan silika (SiO₂) camın kimyasal dayanımı ile birlikte mekanik dayanımında oldukça arttırmaktadır. Camların kırılmaya karşı gösterdikleri direnci silika birinci dereceden etkilemektedir. Camlar plastik deformasyona maruz kaldıklarında kırılmaktadır bu sebeple plastik deformasyona maruz kalmaları istenen bir durum değildir. Camlarda metal bileşiklerinde olduğu gibi akmaya dirençli değildir. Camın retiminde yanlış ısıl işlem veya hava kabarcığı gibi sorunlar olduğunda camın dayanımı düşmektedir.

Cam yapı itibari ile mekanik özellik bakımından güçlü bir malzeme olsa da, camda oluşan kırılma değerleri teorik değerin oldukça altındadır. Camın içerisinde

üretimden kaynaklı ufak hatalar oluşursa veya darbe ile hasar alırsa atomlar arasında kırılmalar meydana geldiğinden camın çatlamasına ya da kırılmasına sebep olmaktadır (Leitch, 2005).

Günümüzde ortalama camın çekme mukavemet değeri $21 \cdot 10^9$ N/m²'dir. Fakat bu değer teorik olan hesaplanmış değerdir. Üretimi tamamlanmış camdaki çekme mukavemet değeri teorik değerden 500 kat kadar daha düşüktür. Mukavemet ölçümlerinde camların kusursuz olması istenir. Camlarda meydana gelen ufak hasarlar ölçüm sonuçlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sebeple camların çekme mukavemeti $13 \cdot 10^6$ Pa kabul edilebilir. Camların tasarımında ise bu değer $6,5 \cdot 10^6$ Pa'a kadar düşmektedir. Bunlara ek olarak tavlama işlemi ile $20 \cdot 10^6$ N/m²'ye çıkan bu değer camın iç yapısını da değiştirerek $130 \cdot 10^6$ Pa değerine kadar çıkartılabilir (Özgül, 2009; Turhan, 2007).

3.1.4. Camın Fiziksel Özellikleri

Viskozite camı şekillendirmek için önemli bir unsurdur. Üretilen camın sıcaklığındaki artış viskoziteyi doğrudan düşürmektedir. Camın iç yapısı da viskoziteyi etkileyen parametrelerdendir.

Camın üretiminde önemli olan viskozite, her proseste üretimin daha iyi olabilmesi için uygun değer de olmalıdır. Üretimi tamamlanan camın viskozite değerinin olabildiğince yüksek olması istenir. Bunun sebebi üretilen camların formlarını koruyabilmesidir.

Camın yoğunluğu, içerisinde kullanılan malzemelere bağlı olup genelde 2,2-7,2 g/cm³ değer aralığında değişmektedir. Sıklıkla kullanılan dış cephe camlarında ise bu değer 2,3-2,6 g/cm³ aralığında değişiklik göstermektedir.

Camlar soğuma esnasında genelde 100-350 °C sıcaklıktayken soğuk şoklara dayanıklıdır. Bunu etkileyen en önemli parametre camın içeriğinde kullanılan bileşiklerdir. Na₂O, PbO ve K bunlara örnektir. Camdaki sıcaklık artışı ile birlikte camın ısı sığası da buna paralel olarak artmaktadır (Özgül, 2009; Öbelik, 2011).

3.1.5. Optik Özellikler

Optik camlar günümüzde gözlük, teleskop başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Camın yansıtması, camda yapılan kaplama ve cama gelen ışığın yönüne bağlıdır. Silis camlarında yansıtma değeri %4 civarlarındadır. Kaplamasız cam, gelen ışığın %92'sini geçirebilmektedir. Camların kırılma indisi iç yapısında kullanılan malzeme, camın rengi ve üretim yöntemi ile değişiklik göstermekle beraber 1,45-1,90 aralığındadır. Camın bileşimine katılan Fe_2O_3 cama mavi, yeşil, sarı gibi renkler verdiği için ışık geçirgenliğini azaltmaktadır. Camın ışık geçirgenliği arttıkça, camda oluşan yansıma düşüş gösterir (Turhan, 2007).

Camın içeriğini oluşturan maddeler camın kalitesini birinci dereceden etkileyen parametredir. Camın kimyasal bileşimini ölçmek için alev spektrometre ve otomatik nicelik emisyon spektrografi kullanılsa da genelde camın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kontrol yolu kullanılmaktadır (Özgül, 2009).

3.1.6. Elektriksel Özellikler

Günlük yaşantımızda kullanmakta olduğumuz camlarda elektrik iletimi yok denecek kadar azdır. Bu sebeple camların elektriksel dirençlerinin olduğu söylenebilir. Ampullerde tellerin sarılmış olduğu malzemeler ve elektrik direklerinde kullanılan fincanlar bunlara örnek olarak verilebilir (Öbelik, 2011).

3.1.7. Isıl Özellikler

Camın ısı iletkenliği yüksek değildir bu nedenle ısı yalıtımın ve görselliğin gerekli olduğu dış cephe camlarında, fırın kapaklarında yaygın olarak bu özelliğinden yararlanılmaktadır. Dış cephe camlarında ısı iletimini daha da düşürmek için cama kaplama ve iki cam arasına argon gazı kullanmak mümkündür.

Isıl genleşme camın sıcaklık artışıyla boyunda görülen büyümeyi gösterir. Sıcaklığın fazla olduğu yerlerde camın termik şoklara karşı dayanabilmesi için ısıl genleşmenin minimum düzeyde olması istenir. Camın ısıl genleşme katsayısını düşürmek için en önemli madde bor'dur. Bor camlarında ortalama %12-15 arası bor kullanılmakla beraber bu değer %25'lere kadar çıkabilmektedir. Camın iki farklı kısmı farklı ısılara maruz kaldıklarında genleşme oranları da farklı olacaktır. Bu sebeple camda gerilmeler oluşup kırılma ve çatlama oluşabilmektedir. Yüksek

ısılara maruz kalınan camların ısı şok dayanımının da yüksek olması istenmektedir (Harmancı, 2018).

3.2. Camı Oluşturan Ana Maddeler

Camı oluşturan ana maddeler; eritici maddeler, oksitler, ve stabilizatörler olarak 3 farklı grupta incelenebilir. Camın oluşmasındaki ana malzemeler kum-soda-kireç olarak bilinmektedir. Standart camın yapısındaki bu malzemeler haricinde cama büyük ölçüde iyileştirmeler yapan ve üretimini kolaylaştıran yardımcı maddelerde ayrı bir grup olarak incelenebilir (Doğru, 2018).

3.2.1. Silisyum Dioksit (SiO₂)

Camda en yaygın kullanılan cam yapıcı malzeme silisyum dioksittir. Camın mukavemetinin artmasını sağlar ve kimyasal dayanım kazandırır. Silika 1700°C'nin üzerinde ergir bu ergime sıcaklığı üretim için zorluk oluşturmaktadır. Camın ergime sıcaklığını düşürmek için bazı yardımcı malzemeler kullanılır. Kullanılan yardımcı malzemeler ise camın mukavemet ve kimyasal dayanımını düşürebilmektedir.

Doğada bulunan kum ve kum taşı cam yapımında kullanılan en yaygın cam yapıcı oksittir. Cama silis veren silis kumu, feldspat ve yüksek fırın cürufu olmak üzere üç ana madde bulunmaktadır. Feldspat kaya formunda tektosilikat bir mineraldir. Dünya kabuğunun ağırlıkça %41'ini oluşturur. Feldspat, yüksek sıcaklıktaki fırın cürufu ile cama silika verebilmektedir. Buna ek olarak camın ihtiyaç duyduğu alümina gibi maddelerden faydalanmak için kullanılır. Feldspatların camda kullanılması silis açısından birincil öneme sahip değildir. Feldspatlar ve yüksek fırın cürufları alüminyum oksidin başlıca kaynağıdır. Bu maddeler camın ergimesini de kolaylaştırabilir.

Camın üretiminde silisin kullanılma nedenleri;

- Camın ana maddesi silisdir.
- Ergimiş halde bulunan camın akışkanlığını artırır.
- Camın ısı şoklara karşı dayanımını artırır.
- Camın viskozitesini artırır.
- Camı mukavemet açısından iyileştirir.

- Camın genleşme katsayısını düşürür.
- Camın asitlere karşı dayanımını artırır.
- Oda sıcaklığında bulunan cama camsı özellik kazandırır (MEB, 2013).

3.2.2. Alüminyum Oksit (Al_2O_3)

Alümina aracı oksitlerden biridir. Birçok camda az miktarda bulunur. Alüminanın cama birden çok etkisi vardır; kimyasal dayanımı artırır, camın ergime sıcaklığını yükseltir, camın çalışma aralığını genişletir ve devitrifikasyon (kristalleşme) oluşmasını engeller. Alümina camda genellikle %4'ten daha az miktarda bulunur. %4'ten büyük olduğu durumlarda nadir olmakla birlikte görülebilir.

Camın üretiminde alüminyum oksidin kullanılma nedenleri;

- Kristallenmeyi önleyici etkisi vardır.
- Karbon monoksit ve silika yerine düşük oranda kullanıldığında ergimede kolaylık sağlar.
- Karışıma doğrudan kullanıldığı zaman viskoziteyi arttıran bir maddedir.
- Camın kimyasal dayanımını arttıran bir maddedir.
- Camın mukavemetini artırır.
- Isıtıcı ocağın iç yüzeyindeki aşınmayı geciktirir (MEB, 2013).

3.2.3. Sodyum Oksit (SODA)

Cam üretiminde en çok kullanılan tadil edici oksit olarak bilinir. Karışımın ergime sıcaklığını düşürmesi amacı ile kullanılmaktadır. Karışıma akışkanlık kazandırır bu yüzden “flask oluşturucu” (ergimeye yarayan madde) olarak da anılmaktadır. Soda (Na_2O) camın kimyasal dayanımını azaltmakla birlikte ısı genleşme katsayısını arttırmaya yardımcı olur. Sodyum karbonat, sodyum oksidi oluşturan başlıca ham maddedir. Sodyum karbonat soda-kireç-silis camlarının başlıca ham maddelerindendir. Cam üretiminde maliyeti en yüksek olan maddedir.

3.2.4. Kalsiyum Oksit (CaO)

Kalsiyum oksit camı tadil edici oksitlerdendir. Karışımın ergime sıcaklığını yükseltir. Camın kimyasal dayanımını olumlu yönde etkilemekle birlikte suya karşı direncini de artırır. Eriyik camı katılaşırken şekillendirilmesini kolaylaştırır. Camın mukavemetinin artmasını sağlar. Kireç taşı (CaCO_3) camın kalsiyum oksit ihtiyacını karşılayan ana ham maddedir. Fakat kireç taşından kalsiyum oksit elde edilmesi hem pahalı hem de zor olduğu için çok fazla tercih edilmemektedir. Dolomit (mermer) kalsiyum oksidi elde etmek için kullanılmakla birlikte magnezyum oksidin temini için de kullanılmaktadır.

3.2.5. Potasyum Oksit (K_2O)

Potasyum oksit tıpkı sodyum oksit gibi tadil edici oksittir. Sodyum oksit kadar etkili olmasa da ergitici bir oksittir. Potasyumun iyon çapı sodyuma göre daha büyük olduğu için cam içinde hareketi kısıtlıdır. Bu yüzden potasyum oksit kullanılan camların çalışma sahası geniş ve elektrik iletkenliği düşüktür. Potasyum oksit camın viskozitesini arttırmakla birlikte genellikle kristal cam yapımında kullanılmaktadır. Potasyum oksit malzemenin ergimesini her ne kadar kolaylaştırırsa da tek başına yeterli olmamaktadır sodyum oksit ile birlikte kullanılması gerekmektedir. Verimin daha iyi olması için soda ve potasyum oksidin birlikte kullanılması gerekmektedir.

3.2.6. Kurşun Oksit (PbO)

Kurşun oksit camın kırılma indisini yükselttiği için genellikle optik camlarda kullanılmaktadır. Cama parlak görünüm katar. Kurşun oksit aracı oksitlerden biridir. Ayrıca ergime sıcaklığını düşürüp camın şekillendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Kurşun oksit kesme ve parlatma prosesleri için daha yumuşak bir cam oluşturmakla birlikte parlak olan ve ışığı iyi yansıtan kristal cam elde etmek için kullanılır.

3.2.7. Bor Oksit (B_2O_3)

Bor oksidin camlar üzerinden önemli bir etkisi bulunmaktadır. Isıl genleşme katsayısının düşük olması istenildiği durumlarda kullanılmaktadır. Mutfakta kullanılan tencerelerden fırın kapaklarına, laboratuvar kaplarından bazı özel optik camlara kadar birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Bor, camın ergimesini kolaylaştıran, camın parlaklığını arttıran, çizilmeye ve darbelere karşı dayanıklılığı arttıran bir maddedir. Kimyasal direnci yüksek ve termal şoklara karşı dayanıklıdır. Bor oksit en önemli cam yapıcı oksitlerdendir. Borosilikat camların yapısında genelde %12-15 arasında bor kullanılmakla beraber bu değer %25'e kadar çıkabilmektedir. Bor oksidin ana kaynağı borik asit ve kolemanittir.

3.2.8. Magnezyum Oksit (MgO)

Magnezyum oksit aside karşı direnci olmayan (tamamen çözünebilen), suya karşı direnci düşük olan, yüksek sıcaklıklarda ergiyen bir oksittir. Magnezyum oksit cama kalsiyum oksit gibi etki göstermektedir. Fakat devitrifikasyon (kristalleşme) eğilimi yoktur. Magnezyum oksit camın daha çabuk katılaşmasını sağlar ve kalsiyum okside (CaO) kıyasla viskoziteyi artırır. Düz cam üretiminde camın kristalleşmemesi için bir miktar MgO kullanılır. Magnezyum oksit camın kristal büyüme oranını önemli ölçüde azaltır. Camın ergime sıcaklığını düşürüp ürüne parlaklık kazandırır. Şişelerin üretim esnasında kolay katılaşan MgO 'li cam kullanılmaktadır (MEB, 2013).

3.2.9. Baryum Oksit (BaO)

Baryum oksit özellikleri bakımından kurşun okside benzer. BaO camın kırılma indisini artırır, yoğunluğunu azaltır, cama parlaklık verir. Baryum oksit baryum karbonatın ergitilmesi ile elde edilebilmektedir. Camın kimyasal dayanımını artırır. Kurşunlu camlara kıyasla baryumlu camlar daha serttir. Karışımındaki BaO oranı %40'dan fazla olduğunda renkte sararma meydana gelebilmektedir. Pota ve fırında kolay ergiyen baryum oksit camlarına ateşte parlatma işlemi uygulanabilir. BaO camları preslenmiş cam, optik cam ve parfümeri cam elde etmek için

kullanılır. Televizyonun ekran parlaklığını arttırdığı için siyah-beyaz ve renkli televizyon tüpü üretiminde kullanılabilir.

3.2.10. Demir Oksit (Fe_2O_3)

Fe_2O_3 genellikle dağlık bölgelerde kayaların arasından çıkan bir bileşiktir. Camın içeriğinde mümkün olduğunca en az düzeyde demir oksit olması istenmektedir. Cama mavi, yeşil, sarı gibi renkler verebilmektedir (Albaşkara, 2017).

3.3. Camın Şekillendirme Yöntemleri

Camların şekillendirilmesinde onlarca yöntem vardır. Bu bölümde en sık kullanılan camların şekillendirilmesi hakkında bilgiler verilmiştir.

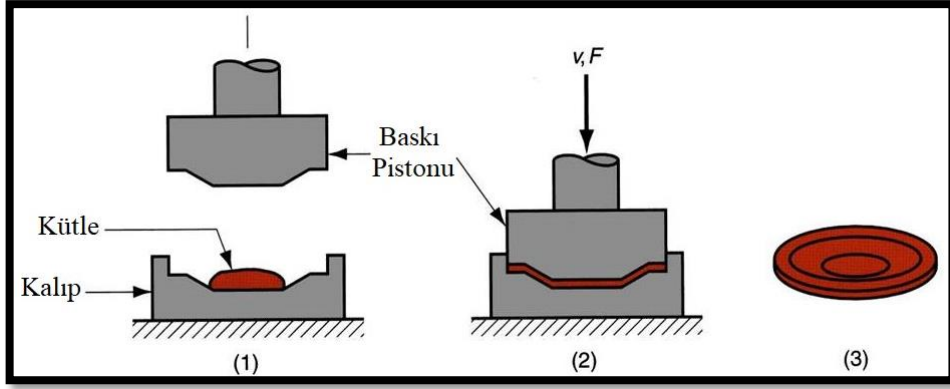
3.3.1. Ezme-Presleme Yöntemi

Presleme yöntemi genellikle cam döşeme duvar tuğlaları gibi basit formdaki camları üretmek için kullanılmaktadır. Camcılık tarihinin başlangıcından günümüze kadar her dönemde çokça kullanılmış bir yöntemdir. Üretim diğer yöntemlere nazaran daha kolay bir yöntem olup sınırlı formda üretim yapılmaktadır. Bal kıvamındaki camın basit ve hızlı şekilde ezilmesi ile gerçekleşir. Kalıp içerisine veya uygun bir yüzey içerisine ergimiş camın ezilerek biçimlendirilme yapıldığı görülür. Fakat bu yöntemde biçimlendirme sınırlıdır. Bu sebeple camcılığın ilk başlarında daha çok düz yüzeyli biçimler üretilmiştir.

Ezme yöntemi tek aşamadan oluşup, genelde yalın sonuçlar ortaya çıkar. Cam üretiminde her ne kadar renkli karışım kullanılabilse de ezme yönteminde fazla süsleme yapmak üretimi zorlaştırmaktadır. Camcılığın başlarından günümüze kadar çok fazla değişme olmamasına rağmen bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Buna örnek olarak kalıp soğutma, desen ile cam üretimi örnek verilebilir.

Düz cam kalıp içerisinde basılma işlem sırası Şekil 3.1’de verilmiştir;

1. Ergimiş haldeki cam fırından kalıba aktarılır.
2. Ergimiş cam iki parçalı kalıpta sıkıştırılır.
3. Kalıplar birbirinden ayrılır.



Şekil 3.1 Cam şekillendirme ezme presleme yöntemi

3.3.2. Üfleyerek Şişirme Yöntemi

Dairesel biçimdeki camların yapımında en çok kullanılan yöntemlerden birisi üfleme yöntemidir. Bu yöntemde en önemli malzeme üfleme çubuğudur. Üfleme çubuğu özel olarak hazırlanmış madeni borudur. Bu boru pota içinde ergimiş halde bulunan camın içine sokulur ve hafif döndürülerek borunun etrafına camların tutunması sağlanır daha sonra borunun ucundaki cam biraz bekletilir ve soğuyarak akıcılığı azaltılmış olur. Sonrasında madeni borunun ucundan üflendiğinde cam şişer ve düzgün bir küre oluşturur. Kısmen üretimi tamamlanmış cam istenilen ölçüye ulaştığında soğutularak üretimi tamamlanır. İstenildiği durumda potanın içindeki sıvı halde bulunan cama daldırılarak ekleme yapılabilir.

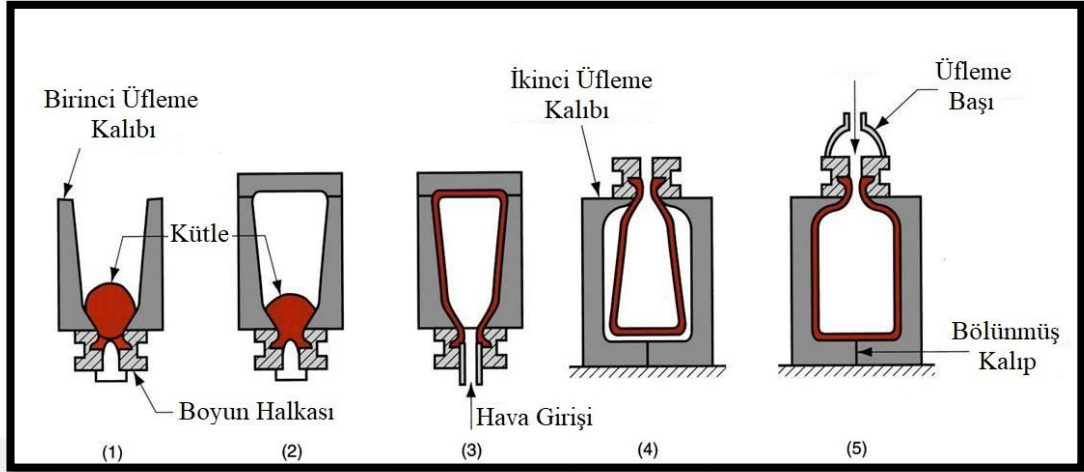
İlkel gibi gözüken bu üretim yöntemi gelişerek yerini makinelere bırakmış olsa da günümüzde zanaatkarlar bu yöntemi kullanmaktadır. Makineler sayesinde üretim çok daha kapsamlı olup vazo, şişe gibi cam eşyalar üretilmektedir.

İlk düz cam levha üretiminde, ısıtılarak silindirik biçimi verilen cam balon, kesilip düzeltilerek üretimi sağlanmıştır. Şişirme yöntemi cam üretimi için dönüm noktalarından biridir. Üretim yöntemini kolaylaştıran bu yöntem camın iç yapısının daha iyi hale getirilmesi ile hızla gelişmiştir. Daha saydam, ince ve mukavemetli camlar üretilmeye başlanmıştır. Şekil 3.2’de üfleyerek şekillendirme yönteminin işlem sırası verilmiştir.

Üfleme Yöntemi Sırası:

1. Belli bir miktar ergimiş cam kalıba aktarılır.
2. Kalıbın açık olan kısmı kapatılır.

3. İlk üfleme işlemi gerçekleştirilir.
4. Kısmen şekli tamamlanmış parça ters çevrilir ve ikinci kalıba yerleştirilir.
5. Cama son şeklini verebilmek için ikinci üfleme yapılır.

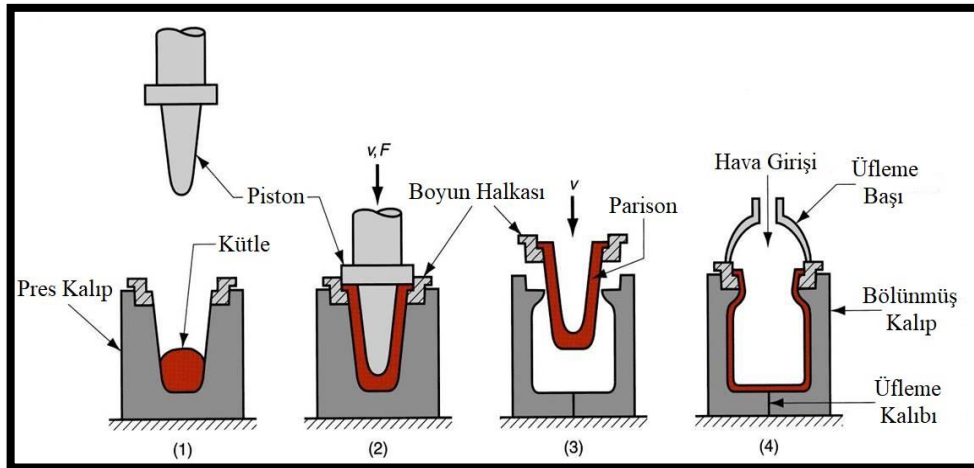


Şekil 3.2 Üfleterek şekillendirme yöntemi işlem sırası

3.3.3. Basma ve Üfleme Yöntemi

Şekil 3.3’de Basma ve üfleme işlem sırası verilmiştir:

1. Erimiş haldeki cam hamuru kalıba aktarılır.
2. Parison yöntemi ile ilk şekillendirme işlemi yapılır.
3. Kısmen şekillendirilmiş olan camın boyun kısmından tutularak şişirme kalıbına yerleştirilir.
4. Üfleme yöntemini kullanarak son şekle getirilir.

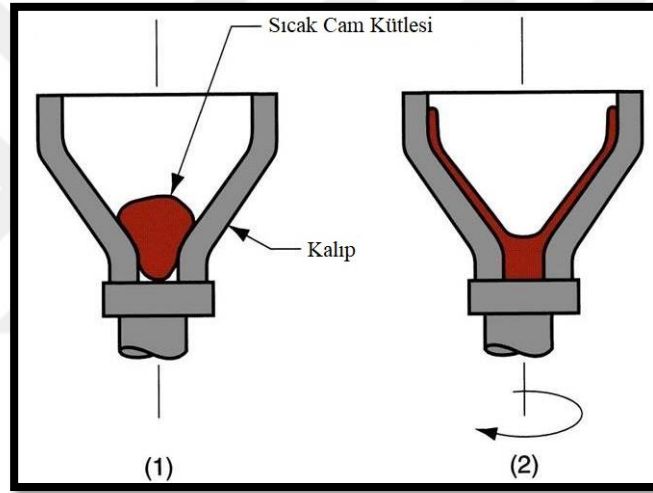


Şekil 3.3 Basma ve üfleme yöntemi işlem sırası

3.3.4. Sıvama Yöntemi

Eski tip olan tüplü televizyon ve tüplü bilgisayar monitörleri gibi çanak şeklinde cam parçalarının üretiminde kullanılan yöntemdir. Bu yöntem de merkezkaç kuvvetinin prensibinden yararlanılarak üretim yapılır. Şekil 3.4'te sıvama yöntemi gösterilmiştir.

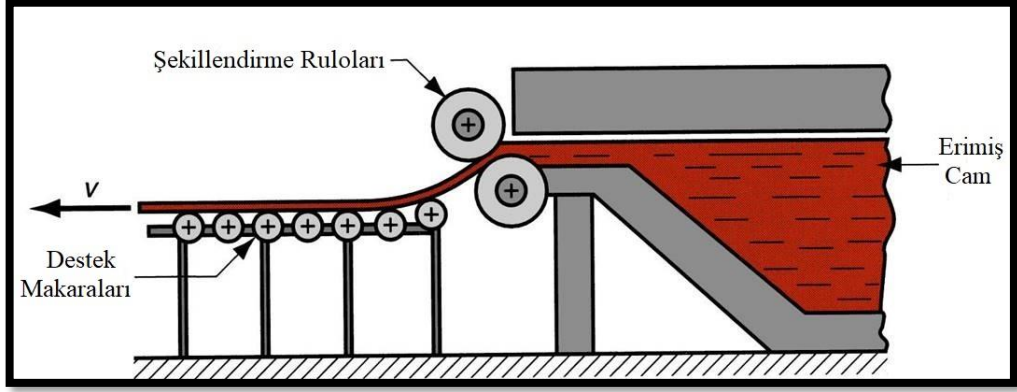
1. Bir miktar ergimiş cam kalıba dökülür.
2. Kalıbın döndürülmesi ile cam kalıba eşit şekilde yayılır.



Şekil 3.4 Sıvama yöntemi işlem sırası

3.3.5. Düz Plaka Haddeleme

Erimiş haldeki cam zıt yönde döndürülmekte olan silindirlerin arasında sıkıştırılıp soğutulur ve şekil verilmesi ile üretim gerçekleşir. Bu yöntem de camın kalınlığını zıt yönde dönen silindirlerin arasındaki açıklık belirler. Bu açıklık istenilen kalınlıkta cam üretebilmemizi sağlar. Genellikle düz plaka üretiminde kullanılan bu yöntemde üst tarafta bulunan silindirin şekillendirilmesi ile baskılı üretim gerçekleştirilebilir. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi sürekli döküm yapılabilir. Üretilen camların düzgünlüğü için parlatma ve taşlama işlemi yapılabilir.



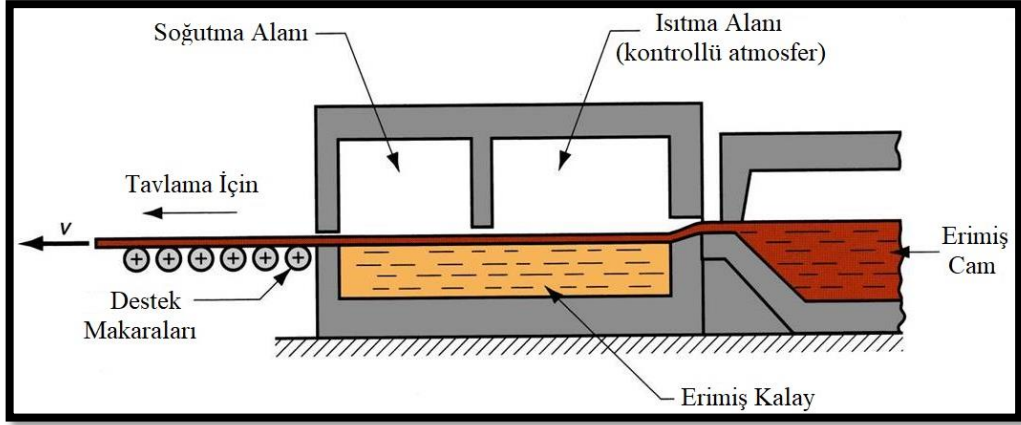
Şekil 3.5 Düz plaka haddeleme yöntemi

3.3.6. Yüzdürme Yöntemi

Erimiş halde bulunan cam, zemininde ergimiş kalay bulunan ısıtma alanına gönderilir ve ısıtma alanında katılaşmaya bırakılır. Atmosferinde azot ve hidrojen karışımı bulunan ısıtma alanında ilk olarak ısıl şoklanmayı önlemek için sıcak bölüm bulunmaktadır daha sonra soğuk alana gönderilen cam katılaşır ve sürekli üretim yapılır. Bu yöntem ile üretimi yapılan cam levhaların yüzeyleri diğer yöntemlere nazaran daha iyi oluşu için taşlama ve parlatma proseslerine gerek kalmaz. Cam üretiminde gelişmiş ülkelerin çoğunda bu yöntem kullanılarak üretim yapılmaktadır. Şekil 3.6’da cam yüzdürme yöntemi gösterilmiştir.

Başlıca özellikleri:

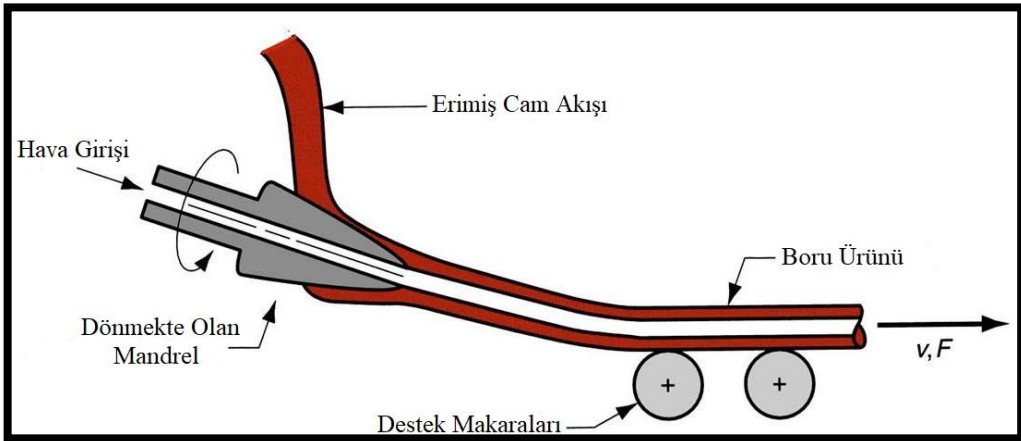
- 3 m en ve 2-25 mm kalınlıkta camların üretimine uygundur.
- Yüzdürme yöntemi ile günde 450-850 ton üretim yapılabilmektedir.
- Üretim kaybı çok düşüktür.
- Bakımı zor değildir ve kesintisiz üretim yapılabilmektedir.
- Hat tamamen otomasyon ile çalıştığı için iş gücü minimuma indirilmiştir.
- Yüzey kaplama işlemleri hat üzerinde yapılabilmektedir (DPT, 1990).



Şekil 3.6 Cam yüzdürme yöntemi

3.3.7. Danner Yöntemi

Boru şeklinde cam ürünlerin üretiminde kullanılan yöntemdir. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ergimiş halde bulunan cam içi boş ve dönmekte olan mandrelin üzerine aktarılır ve cam boru, üretimi yapılmış olan diğer ucundan çekilir. Mandrelin içinden verilen hava sayesinde cam soğutularak katılaşması sağlanır. Bu yöntemde camın üretimini doğrudan etkileyen hava giriş basıncına, mandrelin dönme hızına ve camın çekilme hızına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.7 Danner yöntemi

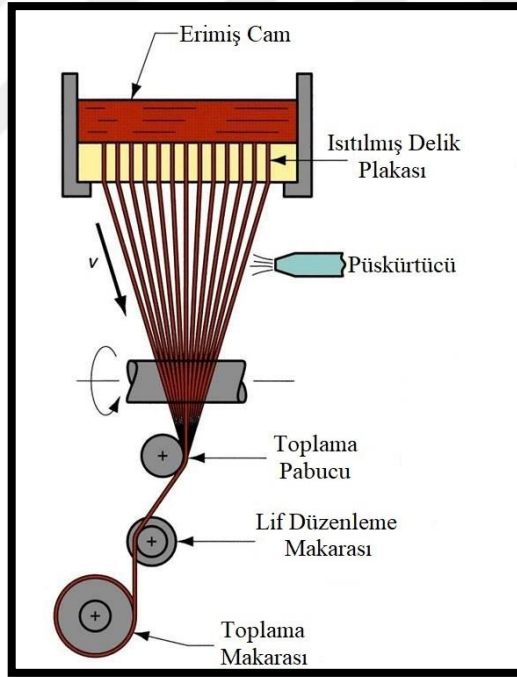
3.3.8. Savurmalı Spreyleme Yöntemi

Bu yöntem ile fibroz cam yünlerinin üretimi için kullanılmaktadır. Fibroz cam yünü: içerisinde fiberlerin gelişigüzel dağıldığı ses ve ısı yalıtımında, hava

filtrelerinde kullanılmakta olan yüne benzer tiptir. Savurmalı spreyleme yönteminde erimiş halde bulunan cam, dönen ve içerisinde çok sayıda ufak delik bulunan bir eleğe aktarılır. Cama etki eden merkezkaç kuvveti sayesinde camın deliklerden dışarı akması sağlanır ve süngerimsi yapı meydana gelir. Fibroz cam yünlerinin ses ve ısı yalıtımı oldukça iyidir.

3.3.9. Cam Elyaf Çekilmesi Yöntemi

Isıya dayanıklı platin alaşımdan yapılmış ve ısıtılmış olan platin plakada çok sayıda delik bulunmaktadır. Bu plakadan erimiş cam geçirilir. Plakadan geçmiş olan camlar sıcak ve çok incedir. Püskürtücü ile camlara basınçlı buhar gönderilerek camların soğuması sağlanması ile birlikte camlar pamuk görünümü kazanır. Soğumuş cam makaralara sarılarak sürekli olarak cam elyaf üretilir. Bu üretim yönteminde 0.0025 mm çapında camlar üretilmektedir. Şekil 3.8’de cam elyaf çekme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Cam elyaf çekilme yöntemi

3.3.10.Çevirme Savurma Yöntemi

Camcılığın üretiminde yaygın kullanımı olan fakat çok fazla isimlendirilmemiş tekniklerden birisidir. Bu yöntemde temel olarak merkez kaç kuvvetinden yararlanılır. Ergimiş cam madeni çubuk üzerine sarılıp belirlenen hızda dönmesiyle birlikte cam eşit şekilde savrulur ve düzgün dairesel formlar oluşturulur. Bu yöntemde kalıplar genellikle basit olduğu için diğer yöntemlere nazaran kalıp maliyeti daha düşüktür.

Küçük kütle daha çabuk soğuduğu için savurma yönteminde genellikle büyük kütleli camlar kullanılır. Bu sebepten çevirme savurma yönteminde büyük kütlenin üretimi daha kolay olur.

Genellikle simetrik ve tek parça olarak üretim yapılan bu yöntemde erimiş cam kalıba aktarılır. Merkezkaç kuvvetinden yararlanıldığı için döndürme hızı çok önemlidir. Daha önceden belirlenen dönme hızında döndürülmeye başlanan cam, etrafa eşit şekilde yayılmaya başlar. Üretilen camlara tekrar ekleme yapmak zordur. Çevirme savurma yönteminde genel olarak komplike olmayan, yumuşak, simetrik ve çok ince olmayan camlar üretilmektedir.

3.3.11.Sarma Yöntemi

Bu üretim yönteminde ergimiş cam potadan madeni çubuk ya da başka araçlar ile alınabilir. Sonrasında erimiş cam madeni boruya yapışır ve potadan çıkartılır. Bu yöntemde de sarım yapılacak camın ağırlığı önemlidir, camın kohezyonu sebebiyle tek seferde camı potadan alıp yapılan işlem üretim için yeterli olmayabilir. Bu yüzden büyük hacimde cam üretilmek istenildiğinde camın soğuması beklenir ardından tekrar erimiş cam madeni çubuğa sarılarak alınır. Bu yöntem ile üretimi yapılan cama ayak, kulp ya da görsel ekleme yapılması kolaydır.

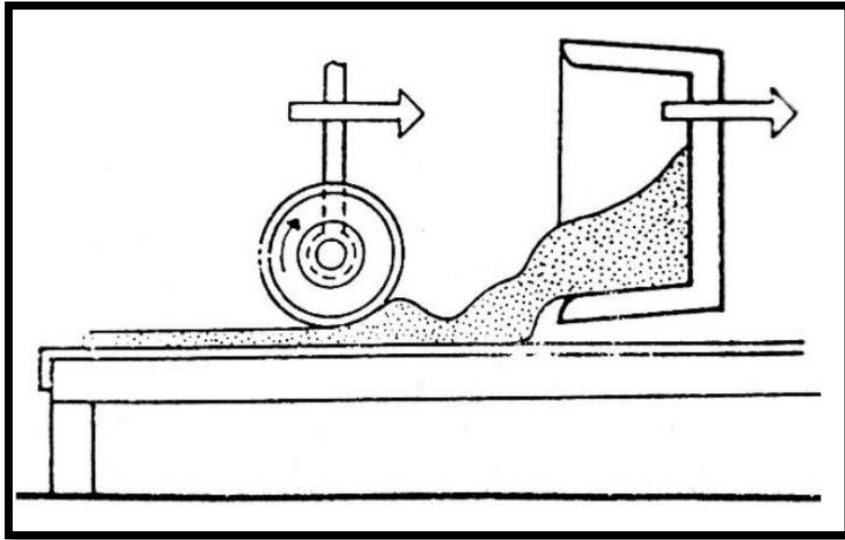
Cam sarma yöntemi farklı amaçlara hizmet etmektedir. Üst üste sarılan cam katmanlarının renk, doku veya bunları birbirine karıştırılmasıyla daha farklı görünümler elde edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu bağlam da her cam üretim yönteminde olduğu gibi sarma yönteminde de dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Sarma yöntemi ile üretilen camların hatalarını telefı etmek oldukça güçtür. Farklı cam türleri ile sarma yöntemi kullanıldığında hata yapılırsa camın

geri dönüşümü imkansızlaşır. Sarma yönteminde birleştirilecek olan camların uyum içerisinde olması istenir çünkü ilerleyen zamanlarda camın içerisinde uyumsuzluktan dolayı çatlama ve kırılma meydana gelebilir.

3.3.12.Dökme-Silindirme Yöntemi

Dökme silindirme yönteminde bal kıvamındaki cam hamuru düzlem masaya dökülür ardından camın üzerinden silindirin geçirilmesiyle camın levha haline getirilmesi sağlanır. Silindirme yönteminde camın kalınlığını düzlemsel masa ile üzerinde bulunan silindirin arasındaki açıklık belirler. Bu açıklık sayesinde istenilen kalınlıkta cam üretilmektedir.

Dökme silindirme yöntemi kullanılarak üretilen camlar genelde düz levha şeklinde olup silindirde bulunan girinti ve çıkıntılar sayesinde camın üst katmanında şekil verilmektedir. Bazı özel hallerde camın iki katmanına da şekil verilebilmektedir. Şekil 3.9’da dökme silindirme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Dökme silindirme yöntemi

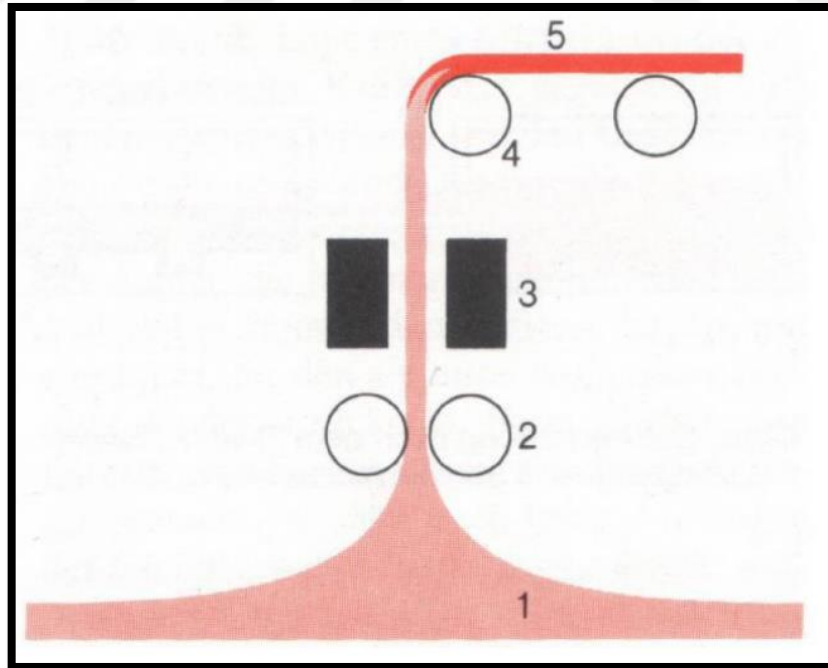
3.3.13.Çekme Yöntemi

Camın üretiminin ilk başlarında ilkel yöntemler kullanılıyordu bu sebeple düz camların sürekli üretimi hem zorlaşıyor hem de zaman alabiliyordu. Üretimde

yaşanan bazı aksaklıklar teknolojinin gelişmesi ile minimize edildi. Çekme yöntemi de teknolojinin gelişmesi ile birlikte günümüzde sıkça kullanılan yöntemlerden birisi oldu.

Çekme yönteminde erimiş olan cam hamuruna ince bir demir çubuk hafifçe sokulup biraz bekletilmesinin ardından cam soğuyarak demire iyice yapışır. Böylelikle cam çekilmeye hazır hale gelmiş olur. Cam çekilme esnasında halen sıcak olduğu için soğutulması gereklidir bu yüzden camın çekildiği hizaya soğutucu konularak camın soğuyarak katılaşması sağlanır. Çekme yönteminde camda oluşan kohezyon kuvveti sebebiyle üretim sınırlıdır. 1.50 m genişlik ve 7 mm kalınlıkta camlar üretilebilmektedir. Çekme yöntemi sürekli üretim yapılabilen yöntemlerden biridir. Şekil 3.10'da cam çekme yöntemi gösterilmiştir.

- 1: Cam Eriği
- 2: Silindirler
- 3: Soğutucu
- 4: Bükme Silindirleri
- 5: Düz Cam Bandı



Şekil 3.10 Cam çekme yöntemi

3.4. Cam Türleri ve Kullanım Alanları

Camı oluşturan ana maddeler silis soda ve kireç olarak bilinmekte bu maddelere ek olarak ikincil dereceden öneme sahip maddelerin kullanılması ile birlikte birçok cam çeşitleri ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu maddelerin avantajı olduğu gibi dezavantajı da vardır. Örneğin camda silis oranı arttırıldığında camın dayanımı da artmakta fakat camın ergime sıcaklığı 1700 °C'ye kadar çıkmaktadır. Sodyum oksit kullanıldığında ise camın ergime sıcaklığı düşmekte ama üretim maliyeti artmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı cam türlerinde ihtiyaca yönelik üretim yöntemleri ve değişik kimyasal yapılar kullanılmaktadır.

3.4.1. Soda Klasik Camları

Günümüzde üretilen camların takribi olarak %90'ını soda klasik camları oluşturmaktadır. Maliyetleri düşük olan soda klasik camlarının ısıl gerilme ve kimyasal dayanımı düşüktür. Bu gibi nedenlerle kimyasal dayanım ve ısıl gerilmelerin çok fazla olmadığı dış cephe camlarında floresan ampullerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İçeriğinde %5 dolaylarında kalsiyum oksit (CaO) kullanılmaktadır. CaO yerine kurşun oksit (PbO) kullanılırsa kurşun camları elde edilir.

3.4.2. Kurşun Camları

Genellikle çok pahalı olan kurşun oksit camlarının içeriğinde %80 civarında PbO kullanılmakla beraber bazı özel durumlarda bu değer daha da yükselmektedir. Kristal cam olarak da bilinen bu camlar camın erime sıcaklığını düşürmektedir. Yumuşama noktası ise CaO camlarının altına düşebilmektedir. Cama kolay işlenebilme özelliği kazandıran PbO camın kırılma indisini yükseltmektedir. Kurşun camlarında kullanılan PbO oranı %80'nin üzerinde olduğu durumlarda gama ve X ışınları tarafından koruyucu cam olarak kullanılmaktadır. Ayna ve süs eşyası gibi kullanım alanları da bulunmaktadır.

3.4.3. Borosilikat Camları

Erime ve yumuşama noktaları oldukça yüksek olan bu camlar ısıl şoklara karşı direnci ile bilinmektedir. Isıl genleşme katsayısı oldukça düşük olan borosilikat camlarının kimyasal direnci de oldukça yüksektir. Bu gibi nedenlerden dolayı

ısıtıcı, mutfak eşyaları, laboratuvar malzemeleri ve astronomi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Borosilikat camlarının yapısında %12'den fazla bor oksit kullanılmaktadır.

3.4.4. Alüminasilikat Camları

Yapısında %21'den fazla alüminyum oksit kullanılan bu camlarda %10 bor oksit %50'nin üzerinde silisyum dioksit kullanılmaktadır. İçeriğin de bulunan bor oksit sayesinde ısı şoklara karşı dirençli olan bu cam türünün kimyasal direnci de oldukça yüksektir. Alümina silikat camlarının kimyasal bileşiminde kullanılan Al_2O_3 ve B_2O_3 sayesinde camın yumuşama noktası yükselmektedir. Bu sebeple üretimi zorlaşmaktadır. Yangın tüpleri, termometre ve ateş ile temas edebilecek birçok yerde alümina silikat camları kullanılmaktadır.

3.4.5. Silis Camları

%90'nın üzerinde silisyum oksit kullanılan bu camlarda %5 civarında bor oksit kullanılmaktadır. Saydam olmasıyla bilinen silis camları UV ışınlarını geçirdikleri için bazı mikropların bertaraf edilmesinde kullanılmaktadır. Özel lambaların yapımında silis camlarından yararlanılmaktadır. Camın yapısında yüksek oranda silis bulunduğu için ergime sıcaklığı 1700 °C'lere çıkabilmektedir. Silis camlarının üretiminde, yapısında yüksek miktarda SiO_2 bulunduğu için saf kristal kuvars kumu kullanılmaktadır.

Silis camları yapı itibarı ile genleşme katsayıları oldukça düşüktür bu sebeple termal şoklara karşı en dirençli camlardan biridir. Bu camların yumuşama noktaları yüksek olduğu için üretimi zorlaşmaktadır. Elektrik geçirgenliği olmayan bu camların maliyetleri yüksektir.

3.4.6. Düz Camlar

Düz camların çekme, haddeleme, silindirleme, fourcault yöntemi gibi birçok üretim alanı bulunmaktadır. Gün ışığı geçirgenliği yüksek olan bu camlar dış cephe camları gibi görüşü yüksek olan yerlerde kullanılmaktadır. Dış cephe pencere camlarının büyük çoğunluğunu düz camlar oluşturmaktadır. Düz camlar kullanılan alana göre kalınlıkları, ağırlıkları ve üzerindeki kaplamalar değişiklik

göstermektedir. Bu gibi değişikliklerden dolayı düz camlar: binaların dışında, güvenlik camlarında, araba camlarında kullanılmaktadır (MEGEP, 2008).

3.4.7. Levha Şeklindeki Camlar

Cam malzemelerin maliyetini düşürebilmek için genelde levha şeklinde üretimi yapılmaktadır. Levha halinde üretilen camlarda isteğe bağlı olarak kaplama, reflekte temperleme gibi bazı özel işlemler yapılmaktadır. Yapılan bu işlemlere göre camın ismi ve kullanım alanları da değişiklik göstermektedir. Kaplama yapılan levha camlar ısıl geçirgenliğinin düşük olması istenildiği durumlarda, temperleme işlemi ise camın dayanımı arttırmakta kullanılmaktadır.

3.4.8. Pencere Camları

Konutlarda ofislerde sıklıkla kullanılmakta olan pencere camları iç mekan ve dış mekan arasındaki görsel bağlantıyı sağlamaktadır. Pencere camlarının güneş geçirgenliğinin olabildiğince yüksek olması istenmektedir. 21.yy'da cam teknolojisinin gelişmesi ile birlikte pencere camları, ısı kayıpları önlemek için çift cam olarak kullanılmakta ve iç kısmına argon gibi gazlar kullanılmaktadır. Bu sebeple enerji tasarrufu sağlayan ve ses yalıtımını olumlu yönde etkileyen pencere camlarının maliyetleri de yükselmektedir. Pencere camları kullanılan alanlara ve yapılan işlemlere göre kendi arasında farklı cam türleri oluşturmaktadır.

Çekme yöntemi ile üretilen pencere camları çekme hızına ve silindirler arası boşluğa bağlı olarak farklı kalınlıklarda üretilebilmektedir. Pencere camların da isteğe bağlı olarak 2-7 mm kalınlığında camlar üretilebilmektedir. Isı yalıtımı için camın kalınlık değeri çok fazla önemli olmasa da çift cam olarak üretimi yapılan normal pencere camları ısı yalıtımı açısından gün geçtikçe gelişmektedir (Harmancı, 2018).

3.4.9. Güneş Kontrol Camı

Güneş ışığı geçirgenliği yüksek, ısı geçişini azaltabilen bu camların üzerine kaplama yapılabilir. Camın bileşiminde kullanılan farklı malzemeler ve bu malzemelerin oranları sayesinde cama farklı renkler verilebilmektedir. Renklendirme işlemi ile birlikte güneşten gelen enerjinin belli bir kısmı dış ortamdan iç ortama geçiş yapabilmektedir.

3.4.10. Mat Camlar

Mat olması sebebi ile ışık geçirgenliği düşük olan bu camlarda camın yüzeyinin pürüzlü hale getirilmesi işlemi yapılmaktadır. İç mekan ve dış mekan arası görsel bağlantının düşük olması istenildiği durumlarda kullanılmaktadır. Ofislerin iç bölme kısımlarında kullanılan camlar buna örnek olarak verilebilir.

3.4.11. Empire Camlar

Görselliğin ön planda olduğu bu cam tipinde dökme-silindirleme yöntemi kullanılmaktadır. Silindirde bulunan girinti ve çıkıntılar sayesinde camın üst yüzeyinde desenler oluşturulabilmekle beraber nadir de olsa camın iki tarafına da desen yapılabilir. Dekoratif amaçlı kullanılan empire camlar, daire iç kapılarında sıklıkla kullanılmaktadır.

3.4.12. Cam Duvar Tuğlaları

Cam duvar tuğlaları ışığı geçirme özelliğinden dolayı dış cephelerde gün ışığından yararlanılmak istenen durumlarda tuğla yerine kullanılmaktadır. Bu camlar pres yöntemi ile üretilen iki cam tuğlanın köşelerinin ısıyla eritilmesinin ardından birbirine yapıştırılarak üretilmektedir. Birleştirilen iki camın ortasında bulunan hava sayesinde cam duvar tuğlasında ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Üretilen cam duvar tuğlalarında dekoratif amaçlı renkli cam tuğlaları üretilebilmektedir. Bu camların yerlerine montajında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde normal tuğlaların montajında yapıldığı gibi sıra sıra eklenerek montaj yapılmasıdır. Bu montaj sırasında tıpkı tuğlalarda olduğu gibi birleştirme işleminde harç kullanılmaktadır. İkinci yöntemde ise cam duvar tuğlaları ölçüsü belirlenen boyutlarda dış mekanda hazırlanıp tek parça halinde yerine yerleştirme ile yapılmaktadır. Burada cam tuğlaların tek parça olarak montaj işlemi kimi zaman kolay olsa da kimi zaman büyük boyutlarda sorun çıkarabilmektedir. İki metotta da çimento harcı kullanılmaktadır. Cam duvar tuğlalarının montajında ek yerlerinden sıvı geçmemesi çok önemlidir. Bunun için tuğlaların ek yerlerine derz çekilmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak mevsim değişikliklerinde camın genişlediğinde yapının hasar almaması için köşelerden genişleme payı bırakılmalıdır (Turhan, 2007).

3.4.13.Cam Kiremit

Çatılarda ışık geçirgenliği istenen yerlerde normal kiremitler yerine cam kiremit tercih edilebilmektedir. Presleme yöntemi ile üretilen bu cam kiremit malzemeleri mantolama malzemeleri ile kullanılmaması gerekmektedir. Bu durum ısı yalıtım için olumsuz olsa da güneş ışığından faydalanılmak istenen çatı katlarında yararlı olmaktadır.

3.4.14.U Profil Camlar

Almanya ve Fransa gibi birçok batı ülkesinde üretimi yapılan U profil camlar ışık geçirgenlik sebebiyle görsel amaçlı kullanılmaktadır. Bu camların kullanım alanı geniş olup geniş hacimdeki mağazalarda, hastanelerde, okullarda, spor salonlarında ve fabrikalar gibi büyük yapılarda kullanılmaktadır. Telli ve telsiz şekilde üretilen bu camların ek yerleri özel plastik bir macun veya özel plastik profiller ile kapatılmaktadır.

U cam profili avantajları:

- Işığı dağıtır ve parlamayı en aza indirir, doğal ışık sağlar.
- Eşit ışık dağılımı sağlar.
- Hafif, kurulumu ve kullanımı kolaydır.
- Ses yalıtımı sağlar.
- Isı transfer katsayısı 0.19-0.49 W/mK aralığındadır.

3.4.15.Cam Mozaikler

Hamur kıvamında bulunan cama antimon oksit veya kriyolit ilavesi ile cam mat hale gelir. Cam mat haldeyken, ışık geçirgenliği az olması ve aynı zamanda görüntü vermemesi sebebiyle kaplama malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Çoğunlukla döşemeler ve duvar kaplaması olarak kullanılmaktadır. Cam mozaikler 13 mm'den 20-30 mm, 30-60 mm ölçülerinde üretilmektedir. Mozaik tekniğiyle üretimi yapılan ürünler, camın arka tarafından plastik bir dokuma ile veya ön tarafından kağıt bir malzemeye yapıştırılmış olarak üretimi tamamlanmaktadır.

Cam mozaiklerin kaplanması işleminden önce, duvarın kaba ve ince sıvalarının tamamlanmış olması gereklidir. Cam mozaiklerin duvara kolay bir şekilde

kaplanabilmesi için ince sıvanın yüzeyinin perdahlanması gerekmektedir. Cam mozaik kaplamalar dış etkenlere dayanıklı oldukları için dış cephe kaplamalarında sıklıkla yapılmaktadır. Görsellik istenilen bölgelerde farklı renk ve şekiller ile kaplama yapılabilen bu malzemeler, dış cephe uygulamalarında cam mozaiklerin iç kısmına sızan suyu dışarı tam olarak atamadıkları için sıcaklık farkının yüksek olduğu kısımlarda dökülmeler meydana gelebilmektedir.

3.4.16.Cam Lifler

Cam elyaf çekilme yöntemiyle üretilen cam lifler, genelde sesleri absorbe etme ve ısı yalıtımı maksadı ile kullanılmaktadır. Üretilen cam lifler, lif haline getirilmeden önce 1,15 W/mK olan ısı iletim katsayısını üretimi tamamlandıktan sonra 0,025 W/mK değerine kadar düşürülebilmektedir. Cam liflerinin düşük ısı geçiş katsayısı sebebiyle endüstriyel sıcaklıklar dışındaki sıcaklıklarda rahatlıkla kullanılmaktadır.

Cam lifleri araçların gövdelerinde, tanklarda, roketlerin bazı aksamalarında ve uçakların bazı özel parçalarının üretilmesinde kullanılabilmektedir. Cerrahi maskelerde de kullanılabilen cam liflerinin ömrü bu malzemelerin üretiminde uygulanan ısı değişikliğine bağlıdır. Son zamanlarda sıkça kullanılan bazı plastik malzemelerin mukavemetini arttırmak için cam liflerinden yararlanılmaktadır.

3.4.17.Cam Köpüğü

Cam köpüğün üretilmesi için camın saf karbonla beraber yumuşayınca kadar ısıtılması gerekmektedir. Cam köpüğü, yalıtım malzemelerinde olması istenen birçok özelliği içinde barındırır. Cam köpüklerin buhar geçirmeme, kimyasal direnç, böceklerden etkilenmeme, alev geçirmeme, yanmama, hafif olma, işlenebilme ve yüksek ısı yalıtımı gibi birçok önemli özelliği bulunmaktadır.

4. LOW-E CAMLAR

Cam malzemesi bilindiği üzere inşaat sektörünün birçok alanında sıkça kullanılan bir malzemedir. Bu durumun en etkili sebebi gün ışığı kullanarak aydınlatmanın ve termal konforun sağlanmasıdır. Termal konforu sağlamanın bir diğer yoluda güneş ışınının pasif olarak kontrolünü sağlamaya yardımcı olan low-e kaplamadır.

Camların üzerindeki low-e kaplamayı daha rahat anlayabilmek için güneşten gelen enerjiyi anlamak önemli bir husustur. Çünkü güneşten gelen enerjinin içerisinde insan sağlığına ve kullanılan bazı malzemelere zarar verebilecek dalga boyutları vardır. Güneşten gelen farklı dalga boylarında ki ultraviyole (UV) ya da diğer adıyla mor ötesi ışın, kızılötesi (IR) ışın ve görünen ışın bulunmaktadır. Dalga boyu 310-380 nanometre arasında değişen ultraviyole ışınlar gündelik hayatta kullandığımız kumaşların ve dış cephe boyalarının zamanla solmasına sebep olmaktadır. Görünen ışın ise 380-780 nanometre arasındadır. Binaya ısı enerjisi sağlayan ise kızılötesi ışınlardır, dalga boyu 780 nanometreden itibaren başlar. Güneşten gelen ısı enerjisi kış aylarında her ne kadar istenen bir durum olsa da yaz aylarında istenmeyen bir enerjidir. Buna ek olarak dışarıdan gelen ısının şiddetini istediğimiz ölçüde ayarlayamamak bizim için olumsuz bir etki oluşturabilmektedir. Low-e ile kaplanmış camlar görünen ışığın performansını en az etkileyerek IR ışınlarının geçişini azaltmaktadır. Bu sayede konfor seviyesi arttırılmış olur.

Low-e camlar insan saçından daha ince ve şeffaf bir kaplama ile kaplanmaktadır. Bu kaplama genellikle 100-400 nm arasında değişmekte olup enerji tasarrufunda büyük önem arz etmektedir. Bu camların üretiminde normal camlara kıyasla tek fark üstüne yapılan kaplamadır. Low-e camlar düşük emisivite değerine sahip birçok yaygın kullanım alanı olan camlardır. Normal camlara 0.87 olan emisivite değeri, low-e ile kaplandığında 0.04 değerine kadar düşürülebilmektedir. Bu camlar genelde 0.04-0.16 emisivite değer aralığında üretilmektedir. Normal camlara göre %15 daha pahalı olan low-e camlar %50'ye kadar enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Tek ve çift yüzey kaplamalı olarak kullanılabilen low-e camlar şeffaflık ve doğal gün ışığından ödün vermez. Işık geçirgenliğini %76'nın üzerinde tutabildiği

için görsellik ve enerji tasarrufu istenen yerlerde kullanılmaktadır (Huang vd., 2008; Ferrara vd., 2016).



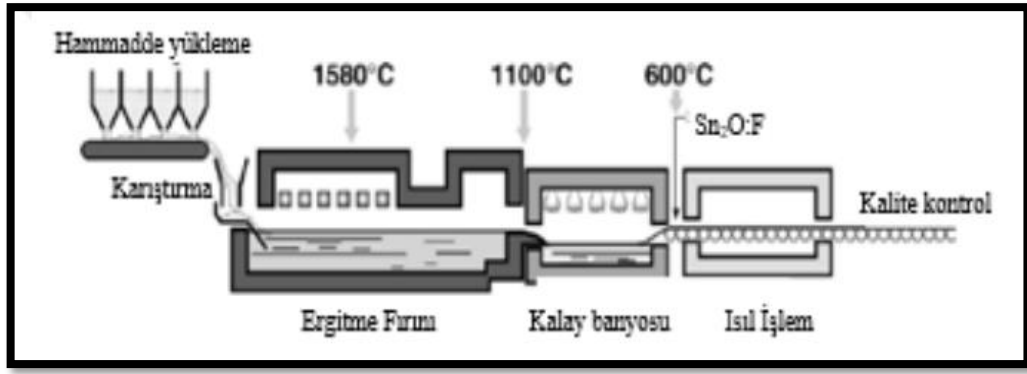
Fotoğraf 4.1 Deney numunesinin yüzey kaplama kontrolü

Low-e camların üstlerinde bulunan metal oksit tabaka sayesinde camların kaplama olan yüzeyinde elektrik iletkenliğı oluşmaktadır. Fotoğraf 4.1’de görüldüğü gibi camda oluşan elektrik iletkenliğı kontrol kalemi ile kontrol edilebilir ve kaplamalı yüzey tespiti yapılabilir. Ayrıca kaplamalı yüzey tespiti yüzey direnç lme cihazıyla da yapılabilmektedir.

4.1. Low-e Camların retim şekli ve Kullanım Alanları

Low-e camlar yüzeylerine yapılan kaplama dışında normal camlardan farksızdır. Yapılan kaplama sayesinde birçok alanda kullanılan bu camın üretim süreci oldukça meşakkatlidir. Temelde iki farklı şekilde üretimi yapılan low-e camlar vakum altında manyetik alan destekli sıçratma ve pirolitik yöntem ile üretimi yapılabilmektedir.

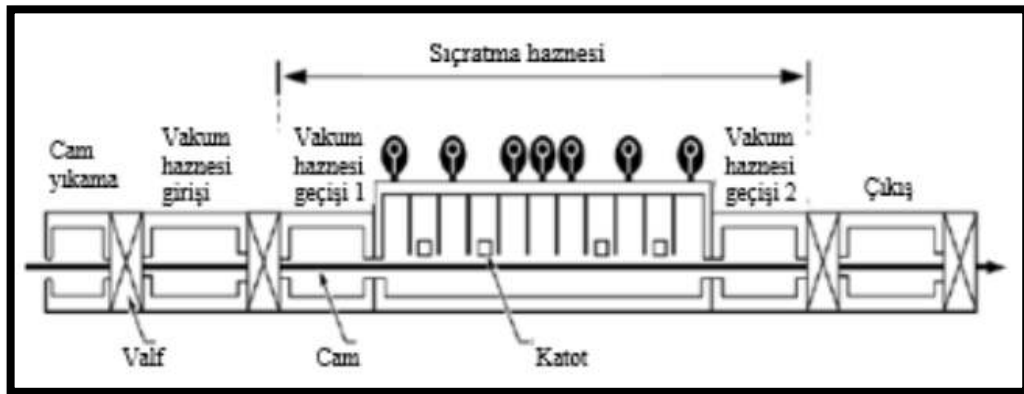
Bir çeşit kimyasal buhar biriktirme yöntemi olan pirolitik yöntemde üretim hattından çıkan cam kalay banyosunun ardından yaklaşık 600 C sıcaklıkla katkılanmış metal oksit ile kaplanmaktadır. Hat st kaplama olarak da adlandırılan bu yöntem, düz cam üretim hattındaki yüksek sıcaklık altında yapılan kaplama yöntemidir. şekil 4.1’de pirolitik yöntemin şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Pirolitik kaplama yöntemi (Teber, 2018)

Pirolitik yöntemde kaplamalar yüksek sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlar sonucu üretildiği için cam ile üzerindeki kaplama arasında güçlü kovalent bağ oluşmaktadır. Pirolitik yöntem ile üretilen camlar yüksek çizilme direncine sahip olmaktadır.

Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi low-e kaplamada sıkça kullanılan yöntemlerden birdir. Hat dışı kaplama olarak yapılan bu yöntemde kısmen üretilmiş camın üzerine bir çeşit kaplama yapılmaktadır. Kaplama yapılmadan önce camın deiyonize suda yıkanarak temizlenmesi sonrasında vakum ve sıcaklık altında kurutulması gerekmektedir.

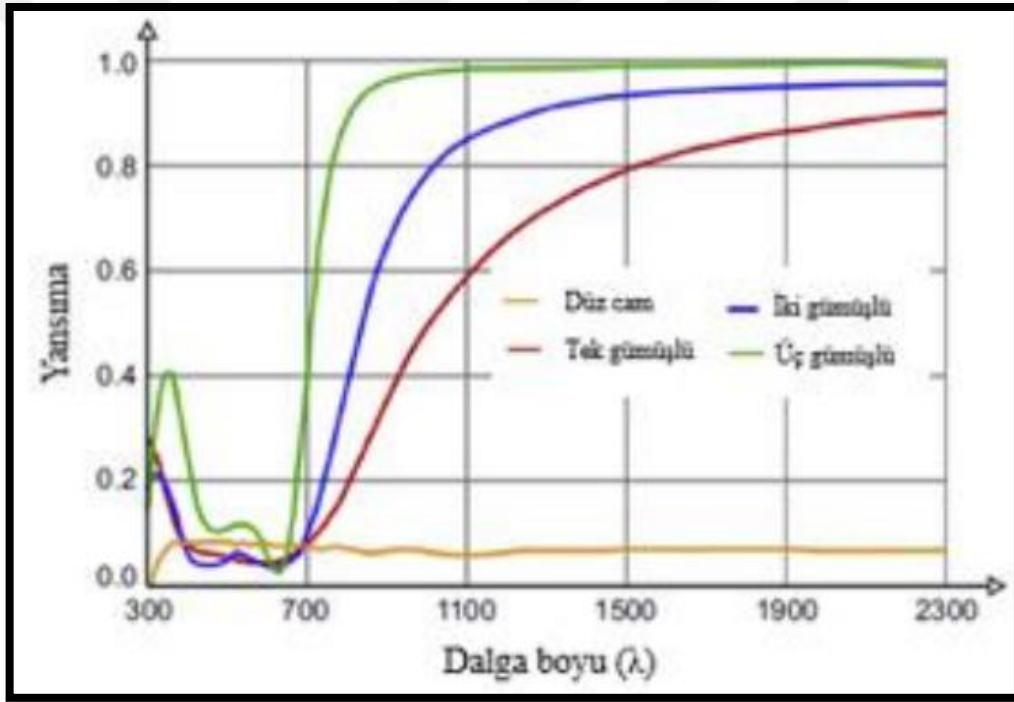


Şekil 4.2 Low-e vakum altında sıçratma yöntemi (Teber, 2018)

Manyetik alan destekli sıçratma yöntemi ile üretilen camlar, fiziksel bağlara bağlı metalik esaslı çok katmanlı yapıya sahiptir. Yapılan katmanların tasarımına bağlı olarak kaplamalarda iç gerilmeler oluşabilmektedir. Bu yöntem ile üretilen camların çizilme dirençleri, pirolitik yöntemle üretilen camlara kıyasla daha

düşüktür fakat manyetik alan sıçratma yöntemi ile üretilen camların emisivite değerleri daha düşük ve optik seçicilik özelliği daha iyidir. Manyetik alan sıçratma yönteminde birden fazla katman kaplaması yapılabilir. Şekil 4.2’de sıçratma yöntemi gösterilmiştir.

Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri low-e kaplama teknolojisinin %90’ını oluşturmaktadır. En çok tercih edilen fiziksel buhar biriktirme yöntemi ise manyetik alan destekli sıçratma yöntemidir. Ayrıca daha yüksek biriktirme hızlarında kaplama yapma imkanı sağlamaktadır bu sayede diğer yöntemlere göre daha seri üretim imkanı sağlar. Kaplama kalınlığı genellikle 100-400 nm aralığında olmaktadır (Schaefer vd., 1997; Finley, 1999).



Şekil 4.3 Düz cam ve çok katmanlı camların yansıtma değerleri

Low-e kaplamanın bazı uygulamaları çok katmanlı olabilmektedir. Tek katmanlı low-e, çift katmanlı low-e ve üç katmanlı low-e sistemlerin kalınlıkları sırasıyla 100 nm, 200 nm ve 300 nm’dir. low-e kaplamalarda kalın tek katman kaplama yerine aynı kalınlıkta çok sayıda ince film kaplama yapmak daha verimli olabilmektedir. Bu sayede optik seçiciliği daha yüksek olan kaplamalar elde edilebilmektedir. Çok katman kaplama sayesinde kaplamanın çizilme dirençleri ve yansıtma oranları artırılabilir. Şekil 4.3’te görüldüğü gibi normal cam da yansıtma

oranı dalga boyu 400λ 'yı geçtikten sonra tüm dalga boyları için aynıken, gümüş kaplama oranı arttıkça yansıtma değeri uzun dalga boylarında artmaktadır. Low-e camda uzun dalga boylarında oldukça yüksek bir yansıtma oranı vardır. Cama yapılan kaplama sayesinde bu yansıtma oranı da arttırılabilmektedir (Teber, 2018; Chiba vd., 2005).

Günümüzde yapı sektöründe sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Low-e camların yüzeyinde bulunan kaplama sayesinde konfordan feragat etmeden enerji tasarrufu sağlamak mümkündür. Bu sebeple low-e camların kullanım alanları oldukça yaygındır.



Şekil 4.4 Low-e camın fırında kullanımı

Low-e camlardan fırınlarda enerji tasarrufu sağlaması amacıyla yararlanılmaktadır. Fırınlarda genellikle bir kaplamalı birde düz cam olmak üzere iki cam kullanılmaktadır. Bazı üreticiler fırın camı olarak çift taraflı low-e cam kullanırken cam sayısını da arttırabilmektedir. Fırında kullanılan kaplamalı cam ilk katman olarak tercih edilir. Şekil 4.4'te low-e camın fırında kullanımı verilmiştir.



Fotoğraf 4.2 Low-e cam dış cephe uygulaması (Şenkal, 2005)

Fotoğraf 4.2’de dış cepheye uygulanmış low-e cam görülmektedir. Yeni yapılan birçok yapıda tercih edilen bu cam türü maliyeti %15 kadar arttırırken %50’ye kadar enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

4.2. Low-e Camların Avantajları

Low-e camların yapı itibari ile birçok avantajı bulunmaktadır. Avantajlar aşağıda madde madde yazılmıştır.

- Yüksek ışık geçirgenliği sayesinde fırının kapağında kullanımında iç ortamın görünümünü bozulmadan enerjiden tasarruf sağlar.
- Low-e cam sıcaktan soğuğa transferi minimum seviyeye indirir.
- Etkili ısı yalıtımı sayesinde enerji tasarrufu sağlar.
- Güneş panellerinde kullanımında verimi %5,30 arttırdığı test edilmiş.
- Şeffaflıktan ve doğal gün ışığı görünümünden ödün vermezler. Bu sayede normal camlar gibi dış ortamı görebilirken aynı zamanda enerjiden tasarruf sağlar.

- Pencerelelerde uygulanan low-e kaplamalar dış ortamda bulunan soğuk hava ile i ortamda bulunan sıcak havanın temasını azaltarak camdaki nem birikimini azaltır. Buharlaşma nedeniyle camın bulanıklaşmasını önlemeye yardımcı olur.
- İç mekanlarda sıcaklığın homojen olmasını sağlar bu sayede cam kenarında oturan kişi dış ortamın soğukluğunu diğer camlara göre daha az hisseder.
- Güneşten gelen uzun dalga boylu olan kızılötesi (IR) ışınlarını filtreleyerek enerjiden tasarruf sağlarken UV ışınların geçişini azaltarak iç ortamda bulunan kıyafet ve diğer eşyaların renklerinin solmasını engellemiş olur.



5. MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve yöntem bölümünde kullanılan araçlar ve yöntemler anlatılmıştır. Camın ısısını ölçmek için kullanılan cihazın özellikleri, camın yüzey direncini ölçmek için kullanılan ekipman ve diğer cihazlardan bahsedilmiştir.

5.1. Materyal

Bu bölümde materyal bölümü detaylı olarak anlatılmış, deney malzemeleri ve diğer ekipmanlar hakkında bilgi verilmiştir.

5.1.1. Deneylerin Malzemeleri

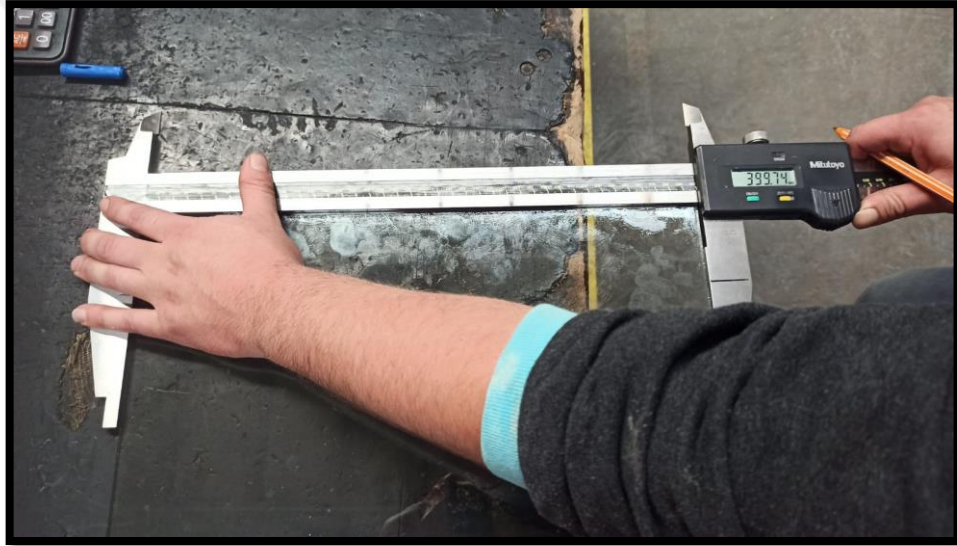
Deney numunesi olarak low-e kaplama yapılmış 3 farklı cam türü kullanılmıştır. low-e camların yüzeylerinde metal oksit kaplama bulunmaktadır. Bu sayede ısı performansları normal camlara göre daha iyidir. Isıl performansının iyi olması sebebiyle fırın ve pencere gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

5.1.2. Deney Numunelerin Hazırlanması

Deneyde gerekli olan malzemeler 4 mm kalınlığında 3300 mm * 2140 mm cam plakalardan kesilerek alınmıştır. Kesim için HEGLA BBG 6133 cihazı kullanılmıştır. Fotoğraf 5.1'de numunelerin kesimi için kullanılan cihaz gösterilmiştir. İki eksenli cam kesme makinesi ile üç farklı low-e cam türünden yedişer adet numune kesilmiştir. Deneyde 21 adet numune test edilmiştir. Deneyde kullanılan camlar 3 farklı cam türü olup isimleri TEC-15, Planibel G ve G Fast şeklindedir.



Fotoğraf 5.1 Numunelerin kesilmesi için kullanılan cihaz Hegla Rapidline



Fotoğraf 5.2 Kesim işlemi yapılan low-e camların rodaj işlemi öncesi uzunluk ölçüsü (mm)



Fotoğraf 5.3 Kesim işlemi yapılan camların rodaj işlemi öncesi genişlik ölçüsü (mm)

Kesim ölçüleri; kullanılacak olan fırına uygun olması için 399.74 mm * 509.50 mm olarak belirlenmiştir. Fotoğraf 5.2 ve fotoğraf 5.3’de camların rodaj işlemi öncesi ölçüleri gösterilmiştir. Kesim işlemi tamamlanan camlara temperleme işlemi yapılabilmesi için rodaj işlemi yapılmaktadır. Rodaj işlemi sayesinde camların keskin köşeleri kaybolur. Bu sayede camların temperlenmesi sırasında çamın köşelerden çatlayarak parçalanması önlenir. Rodaj işlemi ile camların boyutları küçülerek asıl istenen boyut olan 399 mm * 509 mm olmuştur. Fotoğraf 5.4’de rodaj işlemi gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.4 Low-e camların rodaj işlemi

Rodaj işleminden sonra camların ısıl dayanımını arttırmak için temperleme işlemi yapılmıştır. Isıl dayanımı artan camlar fırında kullanıma daha elverişlidir. Temperleme işleminde camlar 20 m uzunluğunda 700 °C sıcaklıktaki hattın içine girer. Daha sonra 25 °C sıcaklıkta basınçlı hava ile soğutularak temperleme işlemi tamamlanmış olur. Fotoğraf 5.5’te temperleme işlemi gösterilmektedir.



Fotoğraf 5.5 Low-e camların temperlenme işlemi

5.1.3. Isı Ölçme Cihazları

Isı ölçme cihazı olarak kullanılan cihazlardan birisi Unit UT320D modelidir. Kontak tipi termometre olan cihaz iki kanallı sıcaklık farkını hesaplayabilmektedir. İki farklı K tipi prop okuyucu ucu ile iki farklı noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneyde 3 farklı Unit UT320D cihazı kullanılarak 6 farklı noktanın sıcaklığı ölçülmüştür. Tablo 5.1’de Unit UT320D cihazının teknik verileri verilmiştir.

Tablo 5.1 Unit UT320D cihazının teknik verileri (UNİT, 2022)

Özellikler	Menzil	UT320D
Sıcaklık ölçümü (K)	-50 °C ~ 1300 °C	(±% 0.5 + 1)
Sıcaklık ölçümü (J)	-50 °C ~ 1200 °C	(±% 0.5 + 1)
Özellikler		
Ekran modu		Çift
Otomatik kapanma		✓
Düşük batarya göstergesi		✓
Fark ölçümü (T1-T2)		✓
Veri tutma		✓
°C / °F seçimi		✓
MAKS / MIN / AVG		✓
Mod seçimi (K / J)		✓
Arka ışık		✓
Düşme testi	1m	✓
Çalışma sıcaklığı	0 °C ~ 40 °C	
Çalışma Nemi	≤80% RH	

Deneyde ısı ölçmek için kullanılan diğer cihaz Fluke 52 II cihazıdır. Bu cihaz iki farklı K tipi prob okuma özelliğine sahiptir. °C, °F veya Kelvin (K) olarak üç farklı standartta ısı ölçümü yapabilmektedir. K, J, T ve E tipi termokupllar ile ölçüm yapabilmektedir. Tablo 5.2’de Fluke 52 II cihazının teknik verileri verilmiştir.

Tablo 5.2 Fluke 52 II cihazı teknik verileri (FLUKE, 2022)

Teknik Özellikler		
Sıcaklık Doğruluğu	100 °C'nin üstünde:	J, K, T, E, ve N tipi: $\pm[0.05 + 0.3^{\circ}\text{C}]^*$
		R ve S tipi: $\pm[0.05 + 0.4^{\circ}\text{C}]^*$
	100 °C'nin altında:	J, K, E, ve N tipi: $\pm[0.20 + 0.3^{\circ}\text{C}]^*$
		T tipi: $\pm[0.50 + 0.3^{\circ}\text{C}]$
Sıcaklık	J tipi:	-210 °C ile 1200 °C arası
	K tipi:	-200 °C ile 1372 °C arası
	T tipi:	-250 °C ile 400 °C arası
	E tipi:	-150 °C ile 1000 °C arası
	N tipi:	-200 °C ile 1300 °C arası *
	R ve S tipi:	0 °C ile 1767 °C arası *
Sıcaklık ölçeği		ITS-90
Uygulanabilir standartlar		NIST-175

5.1.4. Yüzey Direnç Ölçme Cihazı

Camın yüzeyinin direncini ölçmek için EDM RC2175 cihazı kullanılmıştır. Kullanılan bu cihaz sayesinde camın hangi yüzeyinde kaplama olduğunu ve kaplamanın direncini rahatlıkla göstermektedir. Kalibre edilmiş direnç ölçme cihazı dört noktalı teknik kullanılarak ölçüm yapmaktadır. Fotoğraf 5.6'da EDM RC2175 cihazının ön ve arka görseli verilmiştir.



Fotoğraf 5.6 EDM RC2175 cihazının ön ve arka görseli

5.1. Yöntem

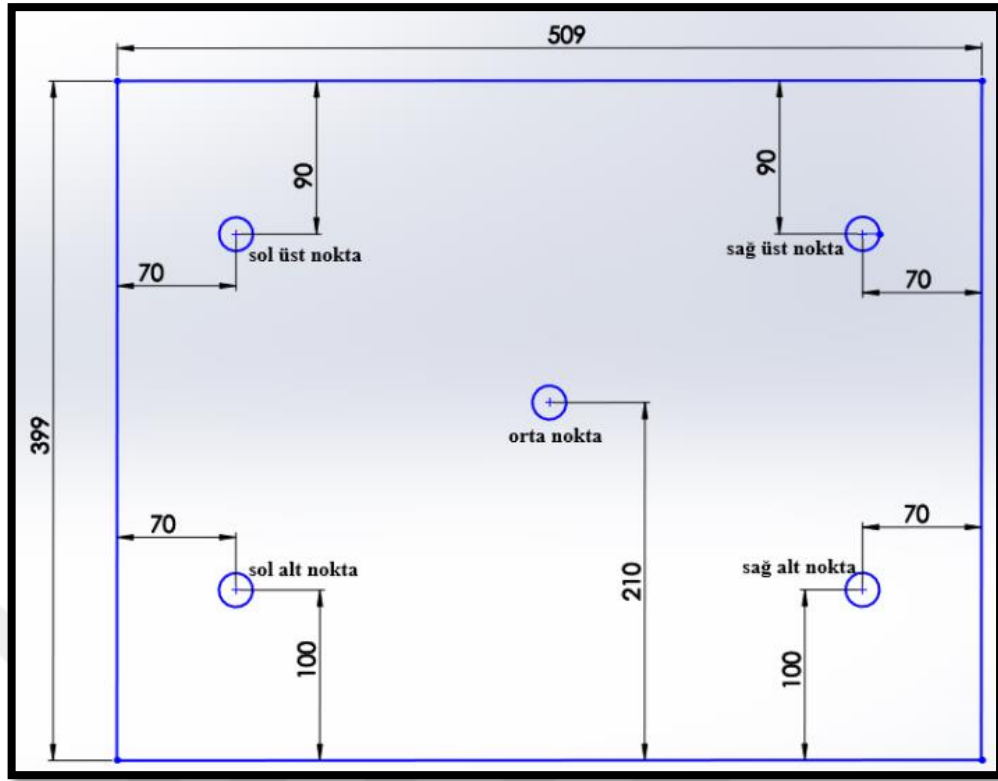
Yöntem bölümünde deneyin yapılışı detaylı olarak anlatılmış ve camların kırılma testi hakkında bilgi verilmiştir.

5.1.1. Deneyin Yapılışı

Hazırlanan camlar low-e kaplamalı yüzeyi fırına bakacak şekilde ısı bantları ile fırına sabitlendi. Camın ısı dağılımını daha rahat gözlemleyebilmek için camın dış yüzeyinin dört köşesine, camın orta noktasına ve fırının iç kısmına toplamda 6 adet k tipi prop yerleştirildi. Prop okuyucu olarak UNI-T 320D modeli kullanıldı. UNI-T 320D cihazı ile ölçüm sonuçları $\pm 0,5 + 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyet ile ölçüldü. Her prop okuyucu iki adet değer okuduğu için üç adet prop okuyucu ile 6 farklı noktanın anlık sıcaklıklarını ölçerek deney gerçekleştirildi. Kullanılan prop okuyucuların $\pm$ değerlerini stabilize etmek için cihazlar 1, 2 ve 3 olarak adlandırıldı ve her deneyde cihazların yerleri değiştirilerek deney yapıldı. Yapılan deney sonuçlarının doğruluğunu ölçmek için UNI-T 320D'ye göre daha hassas sıcaklık ölçüm yapabilen $\pm 0,05 + 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 adet FLUKE 52 II cihazı kullanıldı. Bu cihaz ile fırının iç sıcaklığı ve camın orta noktasındaki sıcaklık değerleri ölçüldü. Fotoğraf 5.7'de ölçüm için kullanılan cihazların fotoğrafları gösterilmektedir.



Fotoğraf 5.7 Camların sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan cihazlar



Şekil 5.1 Camın prop ile sıcaklığının ölçüldüğü noktalar (mm)

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere camın dış noktasının dört köşesine yerleştirilen probalar sağdan ve soldan 7 cm açıklıkta, üstteki probalar camın üst noktasından 9 cm, alt kısımda bulunan probalar ise camın alt kısımdan 10 cm açıklıkta yerleştirildi. Orta noktadaki prob ise camın alt noktasından 21 cm’ye yerleştirildi bu sayede fırının kapak kısmı ortalandı ve deney sonuçlarının daha homojen olması sağlandı. Fotoğraf 5.8’de propların yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.8 Deney cihazlarının yerleştirilmesi

Deney yapılırken ilk başta fırın 50 °C'ye ayarlandı. Deneyler laboratuvar şartlarında 23 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirildi. Fırının içindeki sıcaklığı daha net ölçebilmek adına fırının içine yerleştirilmiş olan k tipi prob ile ölçüm yapıldı. Sıcaklık 50 °C'ye ulaştığında her bir probdaki değer kaydedildi daha sonra fırının sıcaklığı 3 dakika aynı sıcaklıkta bekletildi bu sayede camın yüzeyindeki sıcaklık dağılımı daha stabil bir hale gelmiş oldu. Üçüncü dakikanın sonunda altı probda oluşan tüm değerler kaydedildi. Bu işlem 50 °C, 100 °C, 150 °C ve 200 °C için yapıldı. Zamanlama kronometre ile yapıldı, her sıcaklık değeri ve süre kaydedildi. Bu sayede geç ısınma veya erken ısınma gibi durumlar gözlemlendi ve deney tekrar yapıldı.

5.1.2. Camların Kırılma Testi

Camların kırılma testi camın kalitesini belirleyen önemli unsurlardan bir tanesidir. Kırılma testinde cam düz yüzeye (deney masasına) yerleştirilir ardından camın bir yüzeyi bantlanır. Bantlanmasının sebebi kırılma sonucunda cam

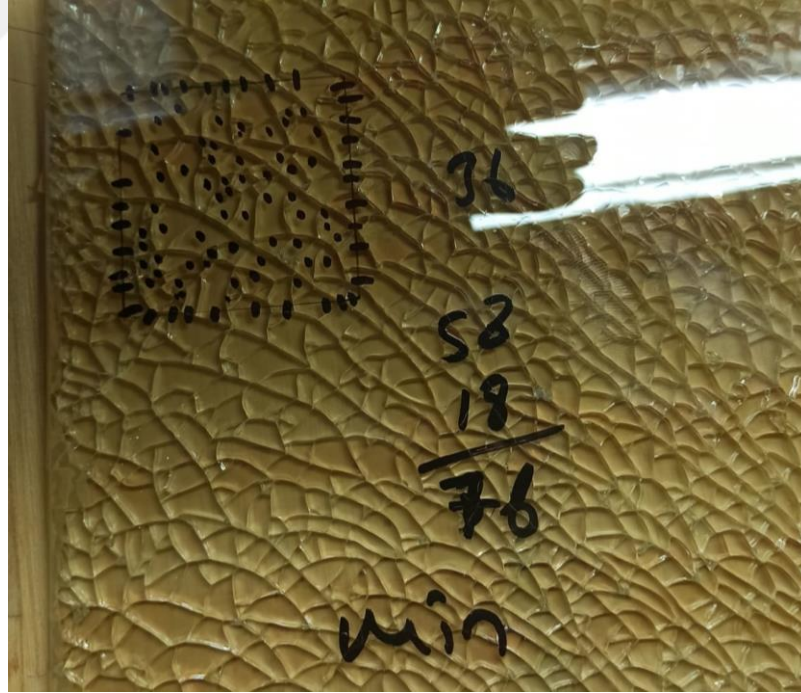
parçalarının dağılmamasını sağlamaktır. Daha sonra kırıcı aparat camın orta alt noktasına yerleştirilir ve üstüne baskı uygulanır. Uygulanan baskı ile kırıcı aparatın içerisinde bulunan yay atar yayın ucunda bulunan metal parça cama vurur ardından cam kırılır. Bu işlem securit çekici ile manuel kuvvet uygulanarak da yapılabilmektedir.

Kırılan camlar 100 mm * 100 mm akredite edilmiş çerçeve ile kontrol edilir. Kontrol işlemi iki aşamadan oluşur. İlk aşamada camın kırılan parçalarının en az olduğu bölge tespit edilir. Kırık olan cam parçalarının sayımı yapılır. İkinci aşamada ise camın kırılan parçalarının en fazla olduğu bölge tespit edilir. Kırık olan cam parçalarının sayımı gerçekleştirilir.

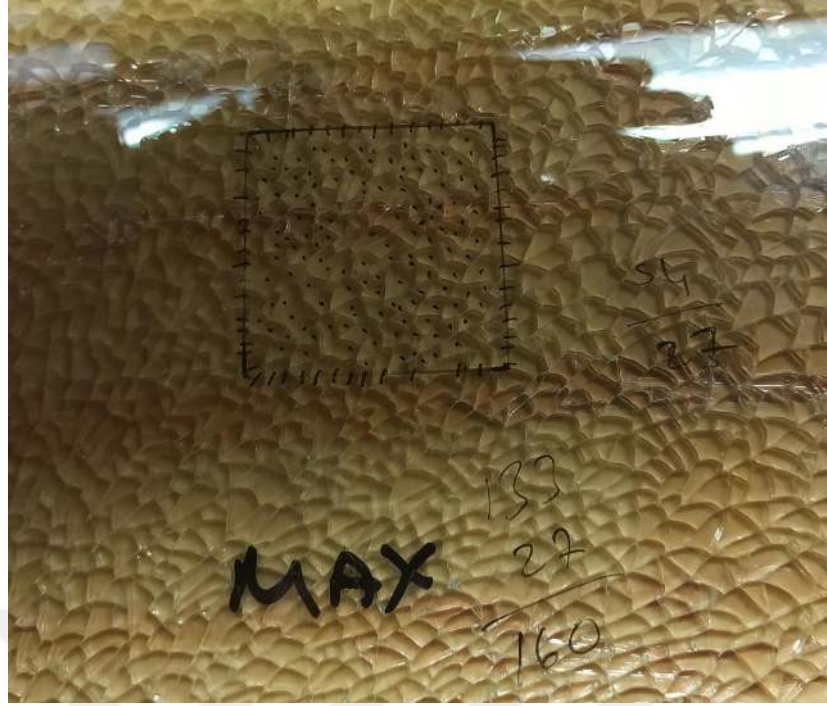
Sayım işleminde akredite edilmiş çerçeve cama yerleştirilir ardından asetat kalemi ile çerçeve çizilir. Çerçevenin içinde kalan cam kırıkları birer puan olarak hesaplanır. Çerçeveye değen her bir cam kırığı ise yarım puan olarak hesaplanır. Hesaplanan bu iki değer toplanır. Camda oluşan kırık sayısı istenen değere ne kadar yakınsa o kadar kabul edilebilir düzeyde olmaktadır. Temperleme işlemi biten camlara kalite kontrol açısından kırılma testi uygulanmaktadır. Uygulanan bu test ile camların kullanılabilirliği test edilmektedir. Fotoğraf 5.9'da securit çekici ve cam kırıcı aparat yer almaktadır.



Fotoğraf 5.9 Kırılma testi için kullanılan securit çekiçi ve cam kırıcı aparat



Fotoğraf 5.10 Kırılma sonucunda camda oluşan minimum kırık cam sayısı



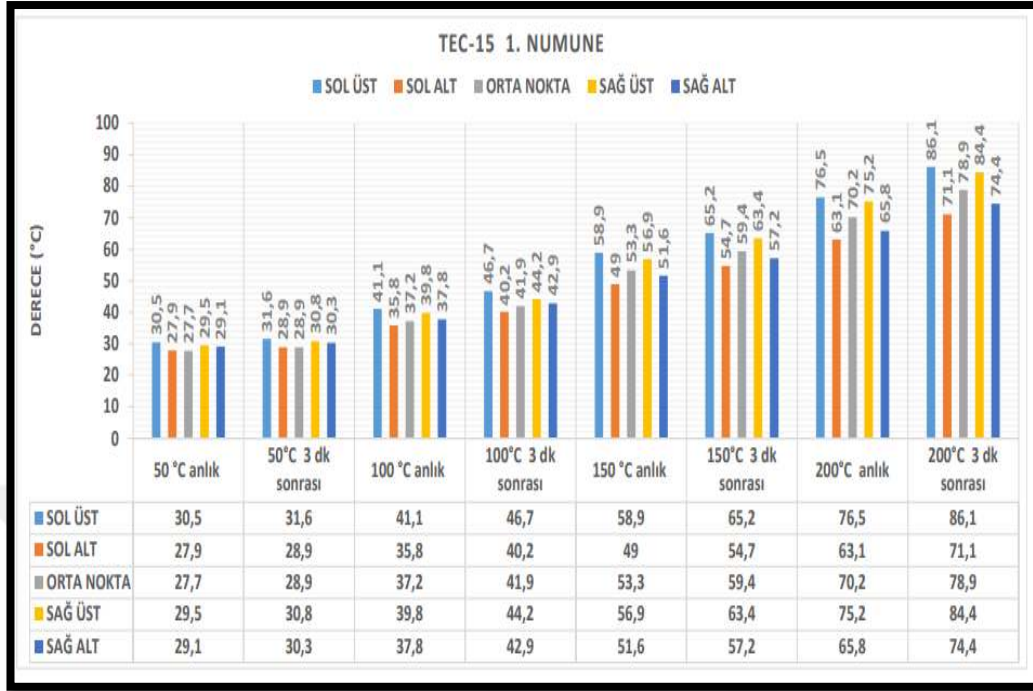
Fotoğraf 5.11 Kırılma sonucunda camda oluşan maksimum kırık cam sayısı

Fotoğraflar 5.10 ve 5.11’de kırılma testi sonucunda camlarda oluşan en fazla ve en az kırık sayıları verilmiştir. Yapılan sayım sonucunda camlarda en az 76 kırık en fazla ise 160 kırık olduğu görülmektedir. Kırık sayısının istenen değerden uzaklaşması demek; camın ya çok az kırık sayısına sahip olduğunu ya da kırılan parçaların büyük olduğunu gösterir. Bu durum da temperleme işleminin başarısız olduğu şeklinde yorumlanır.

5.2. Deneylerin Sonuçları

Bu bölümde deney sonuçları farklı başlıklar altında açıklanmış ve incelenmiştir. İnceleme sonrasında camlar arasında mukayese yapılmıştır.

5.2.1. TEC-15 Cam Deneyi Sonuçları



Şekil 5.2 TEC-15 camı 1. numune deney sonuçları

Şekil 5.2’ de TEC-15 camı 1. numune deney sonuçları verilmiştir. Sayısal veriler incelendiğinde en yüksek değerin genel olarak sol üst noktada olduğu görülmüştür. Fırın iç sıcaklığı anlık olarak 200 °C olduğunda camın dış orta noktasında sıcaklığın 70,2 °C olduğu, fırın 200 °C de 3 dakika bekletildiğinde yine aynı noktada 78,9 °C olduğu ölçülmüş ve sıcaklık değerinde %12 artış olduğu hesaplanmıştır.



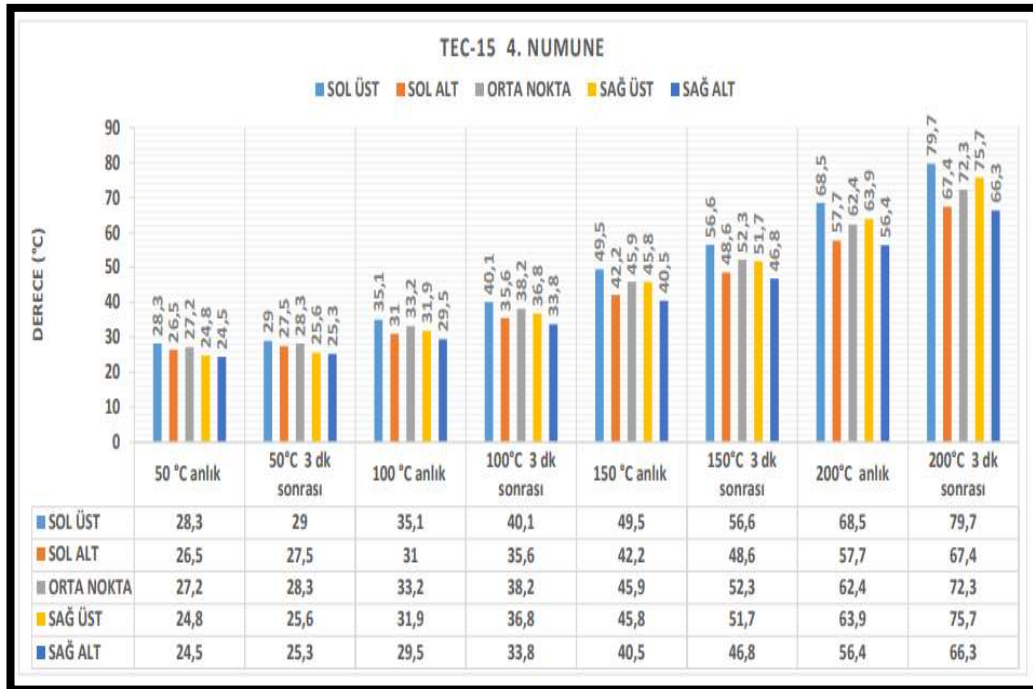
Şekil 5.3 TEC-15 camı 2. numune deney sonuçları

Şekil 5.3’de TEC-15 camı 2. numune deney sonuçları verilmiştir. Deney sonuçlarına göre 1. Deneye kıyasla sonuçlar daha düşük çıkmıştır. Fırın iç sıcaklığı düşükken camın dış yüzeyine yerleştirilen proplarda ölçülen sıcaklık farklarının az olduğu, fırın iç sıcaklığı yükseldikçe proplarda ölçülen sıcaklık farklarının arttığı görülmüştür.



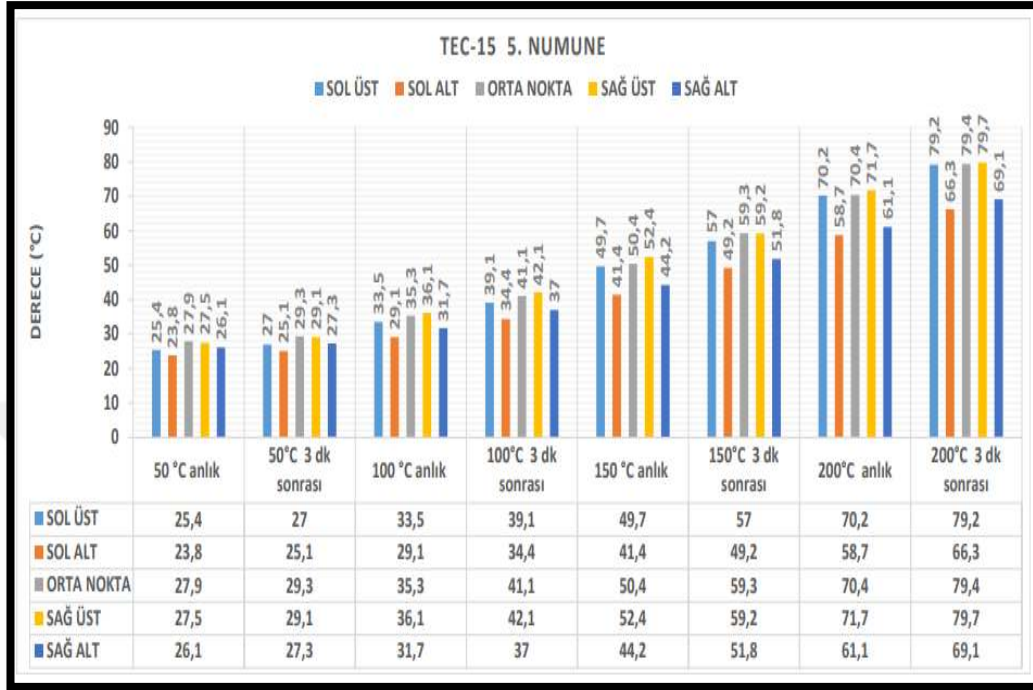
Şekil 5.4 TEC-15 camı 3. numune deney sonuçları

Şekil 5.4’de TEC-15 camı 3. numune deney sonuçları verilmiştir. Deney sonucuna göre fırının iç sıcaklığı 200 °C’de 3 dakika beklediğinde camın dış orta noktasında 75,7 °C sıcaklık oluşmuştur.



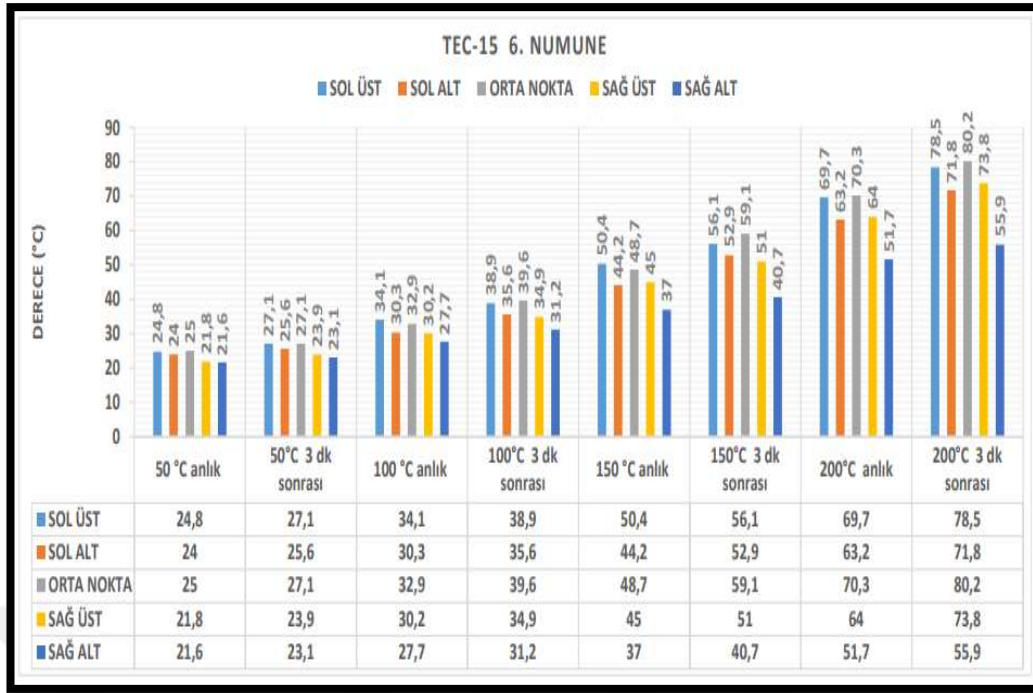
Şekil 5.5 TEC-15 camı 4. numune deney sonuçları

Şekil 5.5’de TEC-15 camı 4. numune deney sonuçları verilmiştir. Deney sonuçlarına göre fırın içindeki her 50 °C’lik artış için camın yüzeyinde oluşan sıcaklığın ortalama 10 °C artış yaptığı görülmüştür.



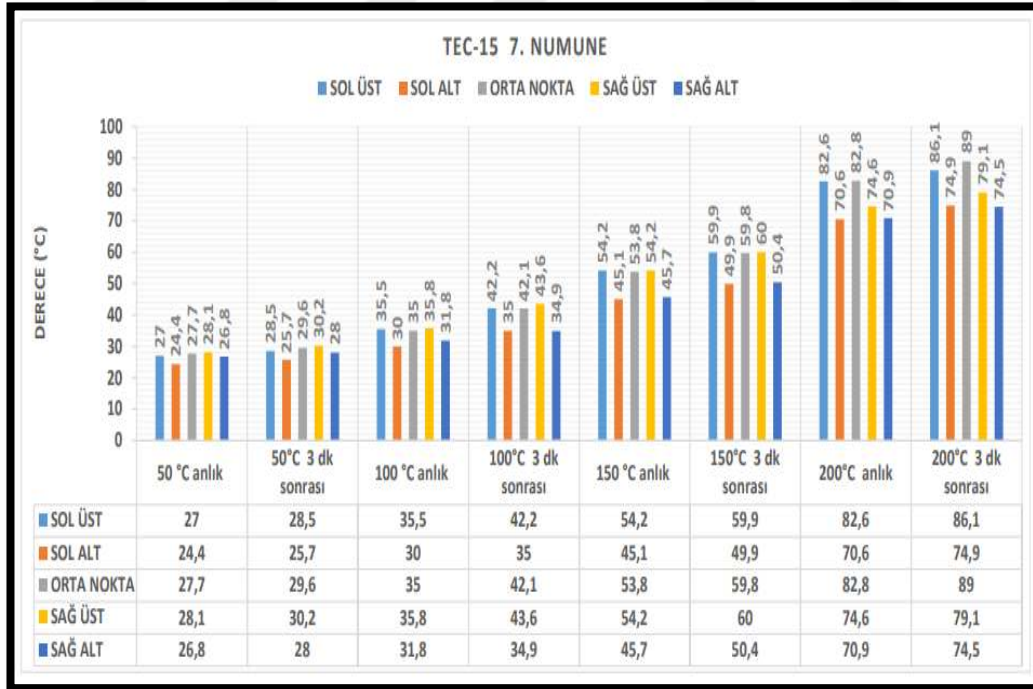
Şekil 5.6 TEC-15 camı 5. numune deney sonuçları

Şekil 5.6’da TEC-15 camı 5. numune deney sonuçları verilmiştir.



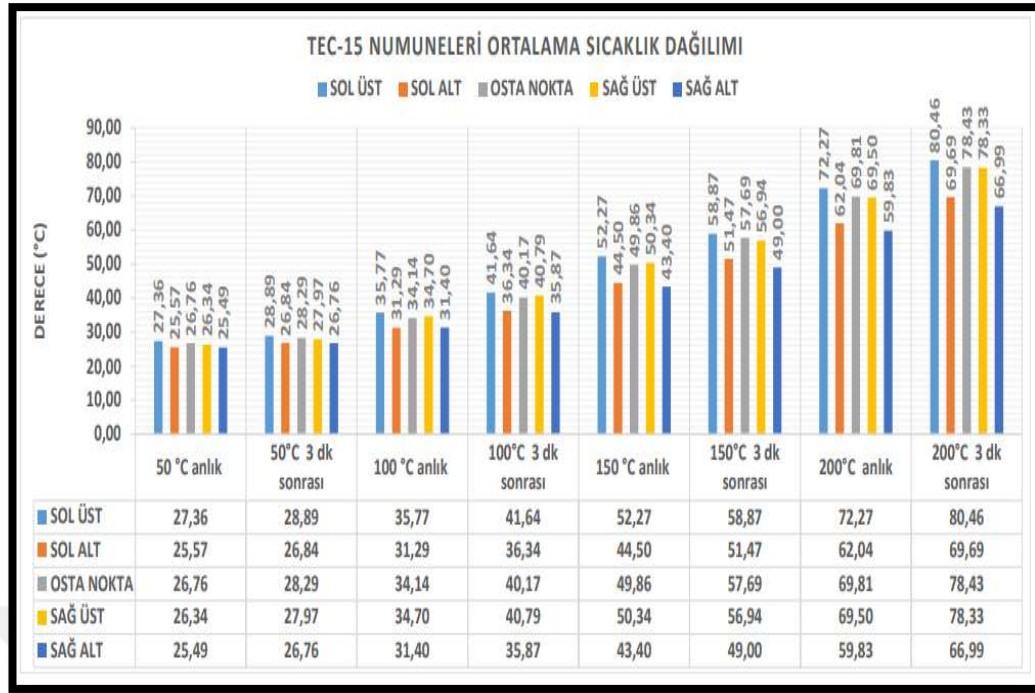
Şekil 5.7 TEC-15 camı 6. numune deney sonuçları

Şekil 5.7’de TEC-15 camı 6. numune deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.8 TEC-15 camı 7. numune deney sonuçları

Şekil 5.8’de TEC-15 camı 7. numune deney sonuçları verilmiştir.

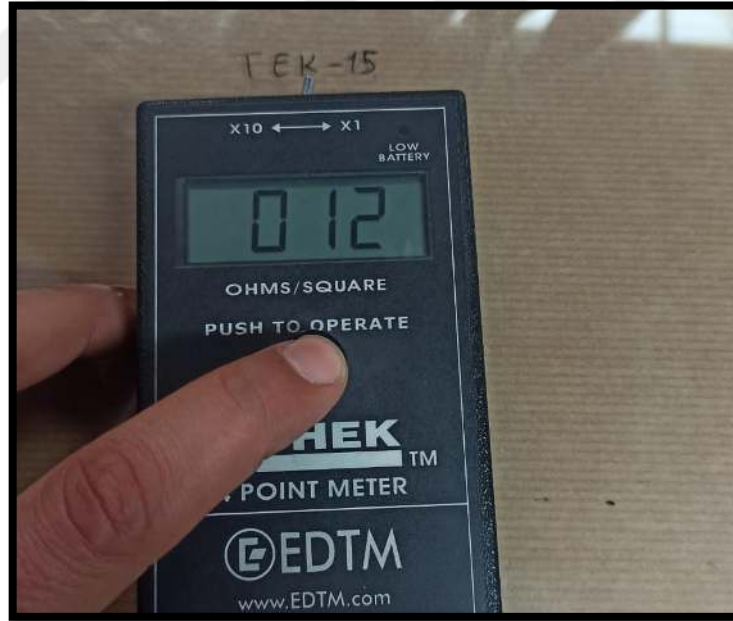


Şekil 5.9 TEC-15 camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı

Şekil 5.9’da TEC-15 camına ait 7 numunenin ortalama sıcaklık değeri verilmektedir. TEC-15 için yapılan tüm deneyler incelendiğinde camın alt noktasının üst noktaya göre daha az ısındığı üst noktalara doğru çıktıkça sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak fırının üst yüzeyinde bulunan rezistansın alttaki rezistansa göre daha yüksek sıcaklıkta olması düşünülmektedir. Camların ortalama sıcaklık değerleri (bkz. Şekil 5.9) incelendiğinde fırının içinde 200 °C sıcaklık varken camın dış yüzeyinde orta nokta için 78,43 °C olduğu görülmüştür. Bu değer sol üst nokta için 80,46 °C, sol alt nokta için 69,69 °C, sağ üst nokta için 78,33 °C, sağ alt nokta için 66,99 °C olduğu ölçülmüştür.



Fotoğraf 5.12 EDM RC2175 cihazı temperleme öncesi TEC-15 camı yüzey direnç ölçümü sonucu

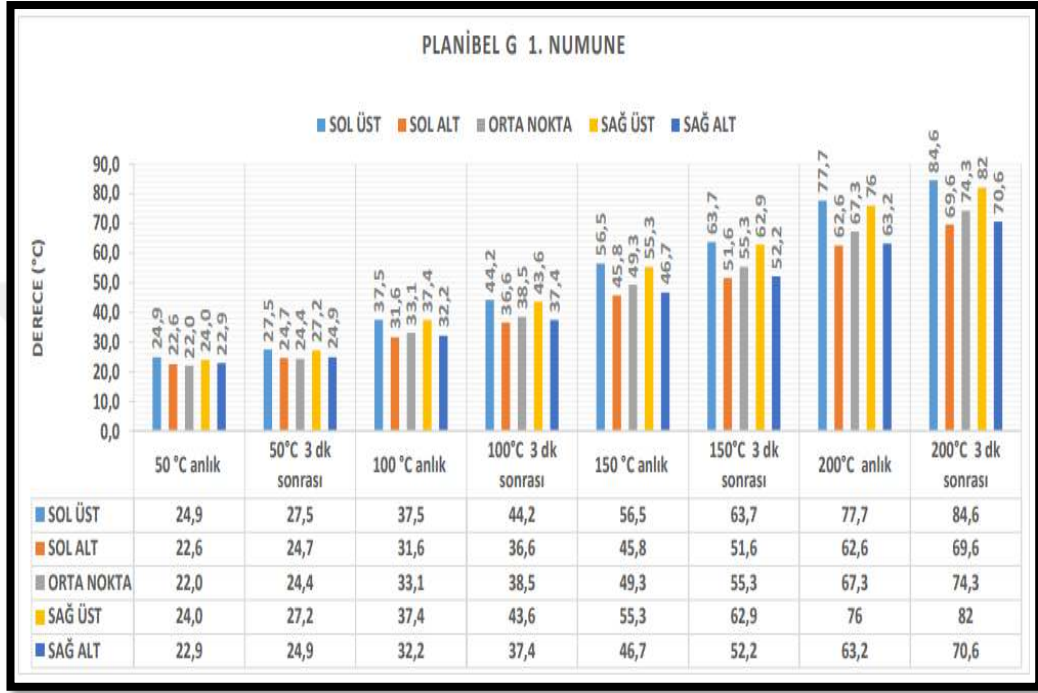


Fotoğraf 5.13 EDM RC2175 cihazı temperleme sonrası TEC-15 camı yüzey direnç ölçümü sonucu

Fotoğraflar 5.12 ve 5.13’de Tec-15 cam numunesinin temperleme işleminden önce ve sonra ölçülen yüzey direnç ölçüm sonuçları verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre Tec-15 camı temperleme işleminden önce yüzey direncinin $0,13 \text{ ohm/cm}^2$ olduğu ölçülmüştür. Temperleme işleminden sonra bu değerin düşerek $0,12$

ohm/cm² olduğu ölçülmüştür. Temperleme işleminden önce ve sonra ölçülen bu değerler sayesinde camın yüzeyinde bulunan metal oksit kaplamanın emisiviteye olan etkisini yorumlayabiliriz.

5.2.2. Planibel G Cam Deneyi Sonuçları



Şekil 5.10 Planibel G camı 1. numune deney sonuçları

Şekil 5.10’da Planibel G camı 1. numune deney sonuçları verilmiştir. Sayısal veriler incelendiğinde fırın iç sıcaklığı anlık 50 °C olduğunda camın sol üst noktasında 24,9 °C, sol alt noktada 22,6 °C, orta noktada 22 °C, sağ üst noktada 24 °C ve sağ alt noktada 22,9 °C olduğu ölçülmüştür. Fırın iç sıcaklığı 50 °C’de sabit tutularak 3 dakika beklendiğinde ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalama olarak %10 arttığı hesaplanmıştır.



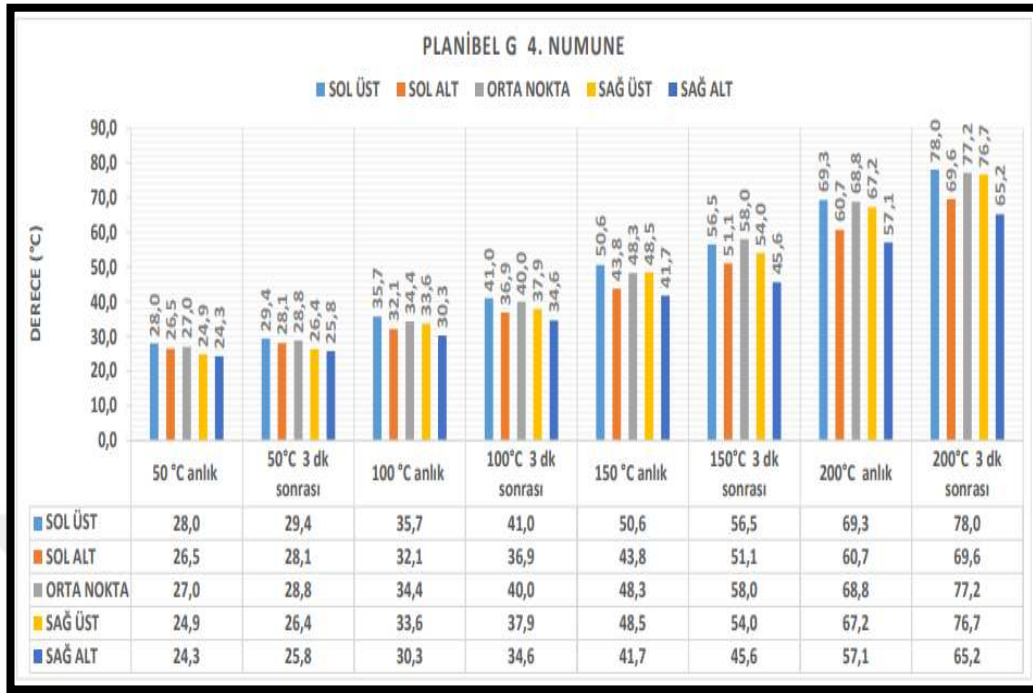
Şekil 5.11 Planibel G camı 2. numune deney sonuçları

Şekil 5.11’de Planibel G camı 2. numune deney sonuçları verilmiştir. Şekil 5.11 incelendiğinde sıcaklık değerlerinin 1. numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir.



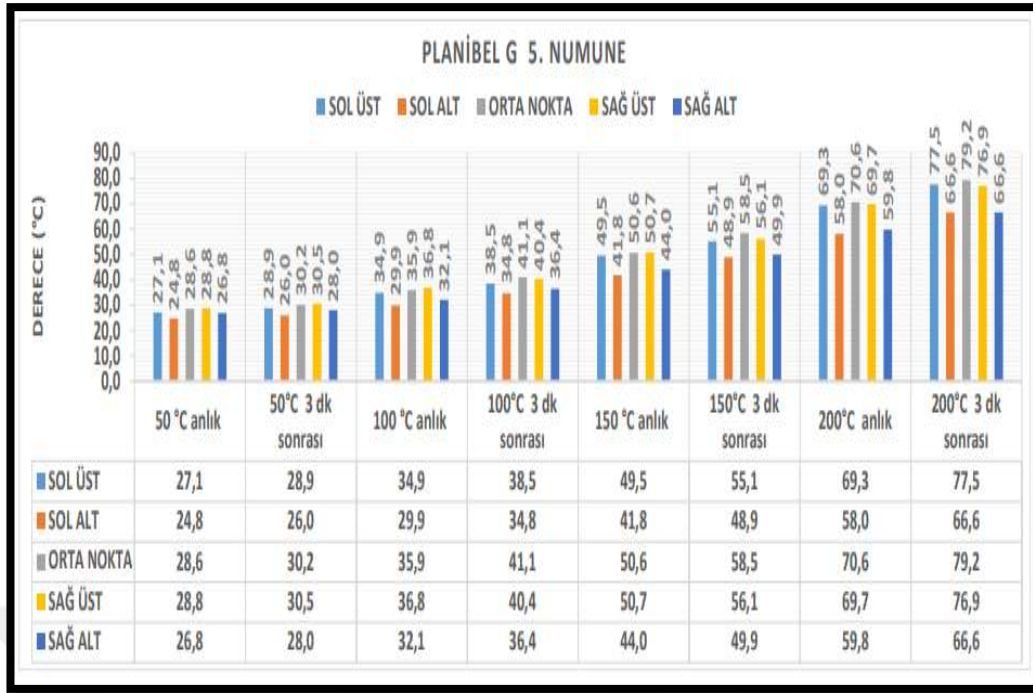
Şekil 5.12 Planibel G camı 3. numune deney sonuçları

Şekil 5.12’de Planibel G camı 3. numune deney sonuçları verilmiştir.



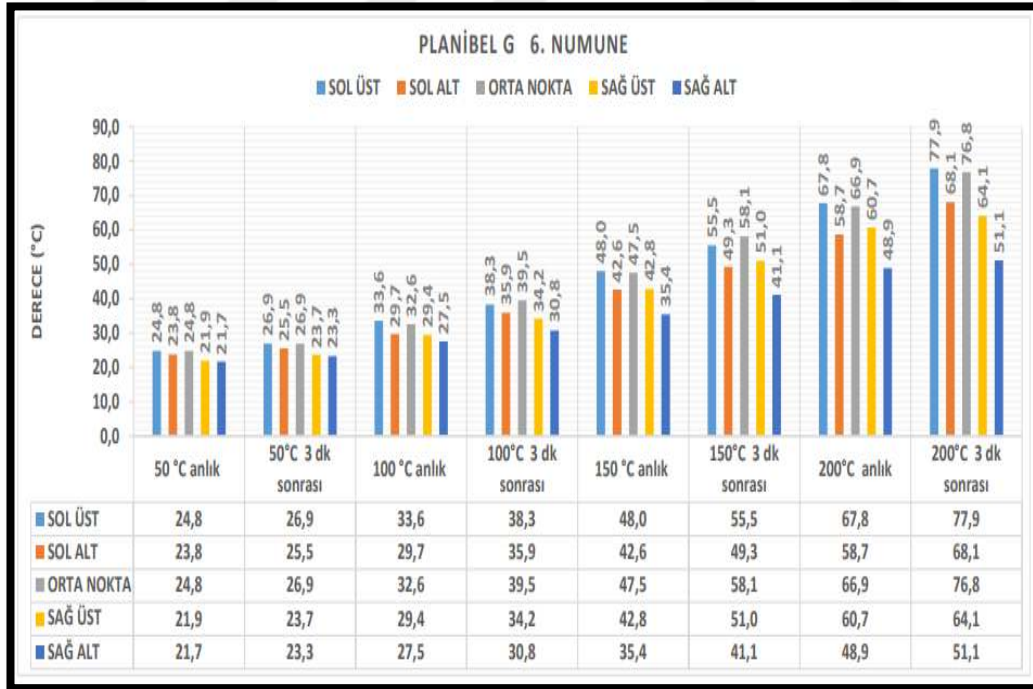
Şekil 5.13 Planibel G camı 4. numune deney sonuçları

Şekil 5.13’de Planibel G camı 4. numune deney sonuçları verilmiştir. Şekiller 5.10-13 inceleniğinde en verimli sonucun 4. cam numunesinde olduğu görülmektedir. 4. numune 1. numuneye göre ortalama %7 daha iyi sıcaklık sonucu verirken bu değer 2. cam için %10, 3. cam için % 2’dir.



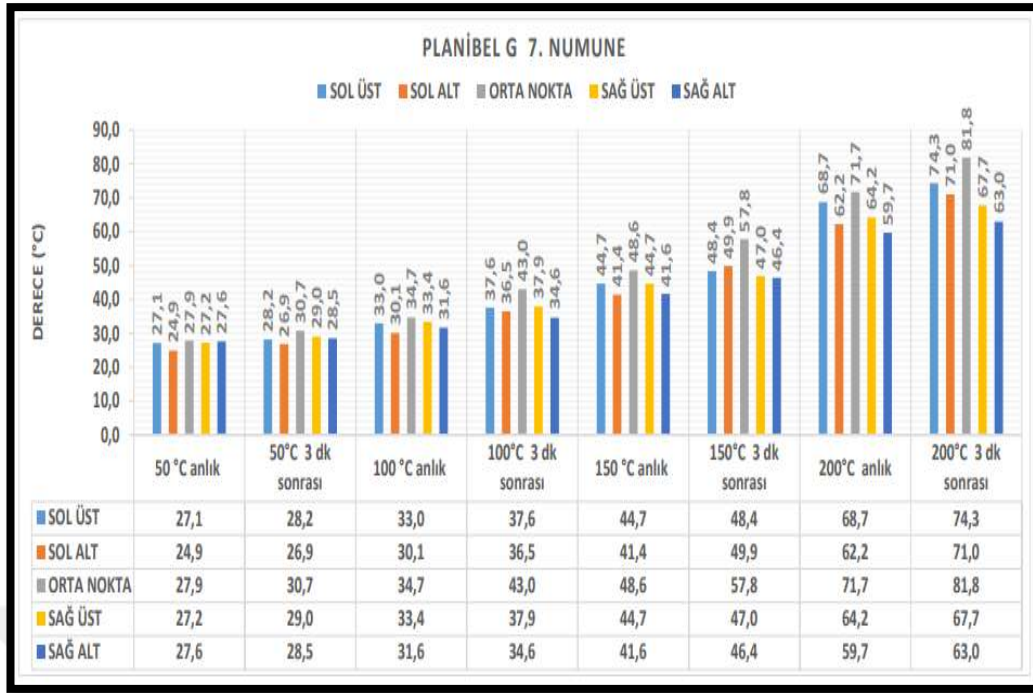
Şekil 5.14 Planibel G camı 5. numune deney sonuçları

Şekil 5.14’de Planibel G camı 5. numune deney sonuçları verilmiştir.



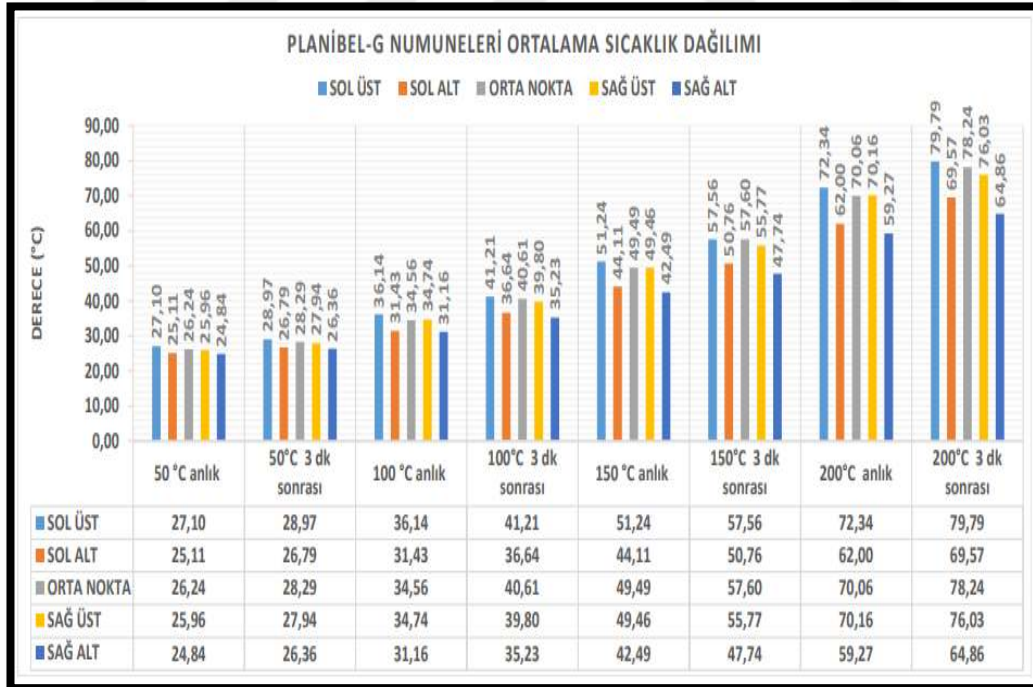
Şekil 5.15 Planibel G camı 6. numune deney sonuçları

Şekil 5.15’de Planibel G camı 6. numune deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.16 Planibel G camı 7. numune deney sonuçları

Şekil 5.16’da Planibel G camı 7. numune deney sonuçları verilmiştir.



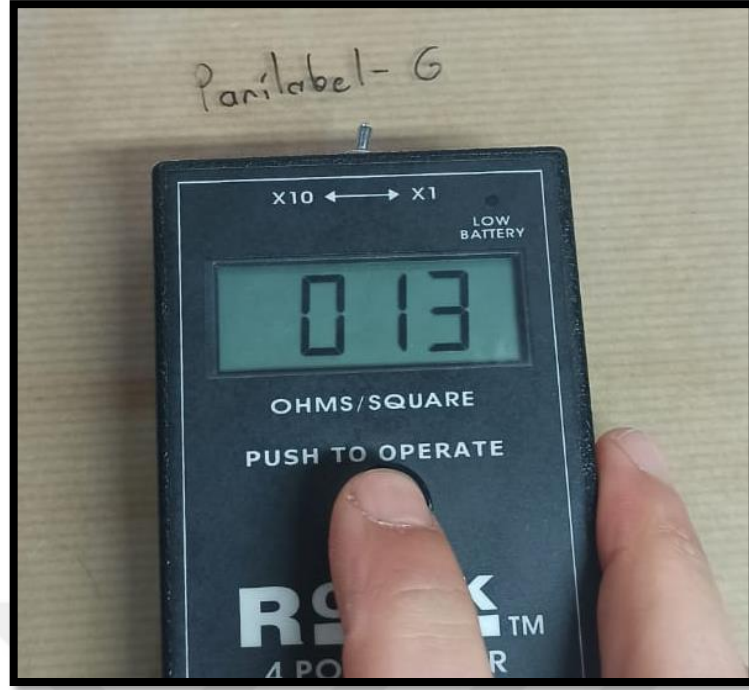
Şekil 5.17 Planibel G camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı

Şekil 5.17’de Planibel G camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı verilmiştir. Sayısal veriler incelendiğinde Planibel G numunelerinin TEC-15

numunelerinde olduğu gibi sıcaklığın camın üst noktalarında alt noktalara göre daha fazla olduğu görölmüştür. Şekil 5.17’de verilen her bir değ er 7 farklı numunenin aynı noktadaki sıcaklık ortalamasını göstermektedir. Camların ortalama sıcaklıklarının yazılması ile daha homojen bir sonuç elde edilmiştir. Fırının iç yüzeyi 200 °C iken camın dış yüzeyinin sol üst noktası 79,79 °C, sol alt noktasının 69,57 °C, orta noktasının 78,24 °C, sağ üst noktasının 76,03 °C, sağ alt noktasının ise 64,86 °C olarak ölçölmüştür. Bu değ erler ise TEC-15 numunelerine kıyasla az da olsa daha verimli olduğunu göstermektedir.



Fotoğraf 5.14 EDTM RC2175 cihazı temperleme öncesi Planibel G camı yüzey direnç ölçümü sonucu



Fotoğraf 5.15 EDTM RC2175 cihazı temperleme sonrası Planibel G camı yüzey direnç ölçümü sonucu

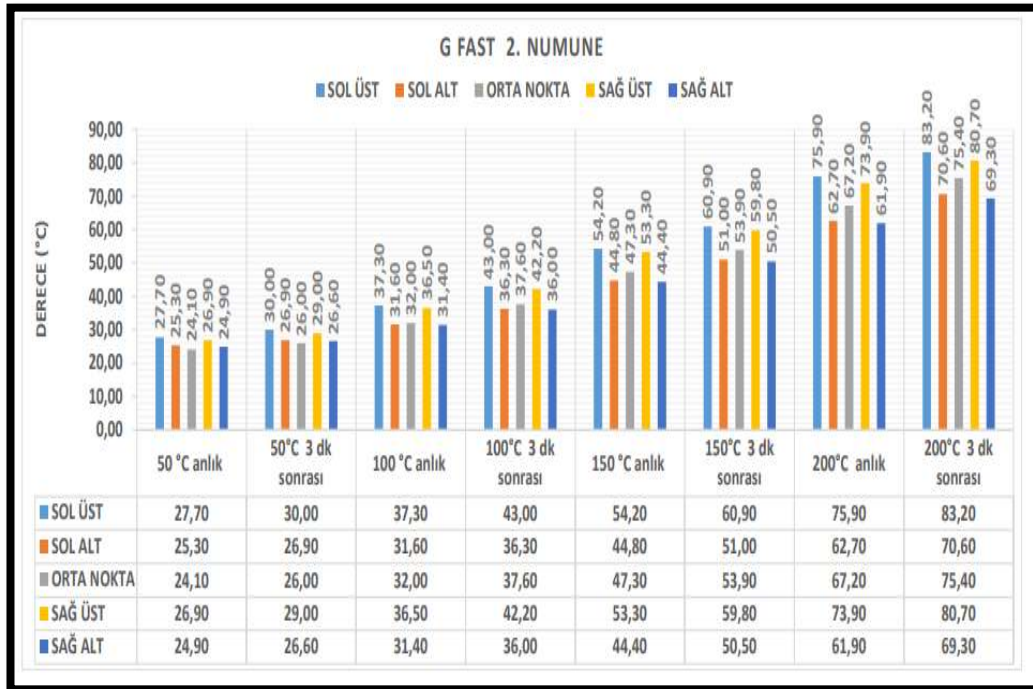
Fotoğraflar 5.14 ve 5.15’de Planibel G cam numunesinin temperleme işleminden önce ve sonra ölçülen yüzey direnç ölçüm sonuçları verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre Planibel G numunesi temperleme işleminden önce yüzey direncinin 0,14 ohm/cm² olduğu ölçülmüştür. Temperleme işleminden sonra bu değerin düşerek 0,12 ohm/cm² olduğu ölçülmüştür.

5.2.3. G fast Cam Deneyi Sonuçları



Şekil 5.18 G Fast camı 1. numune deney sonuçları

Şekil 5.18’da G Fast camı 1. numune deney sonuçları verilmiştir.



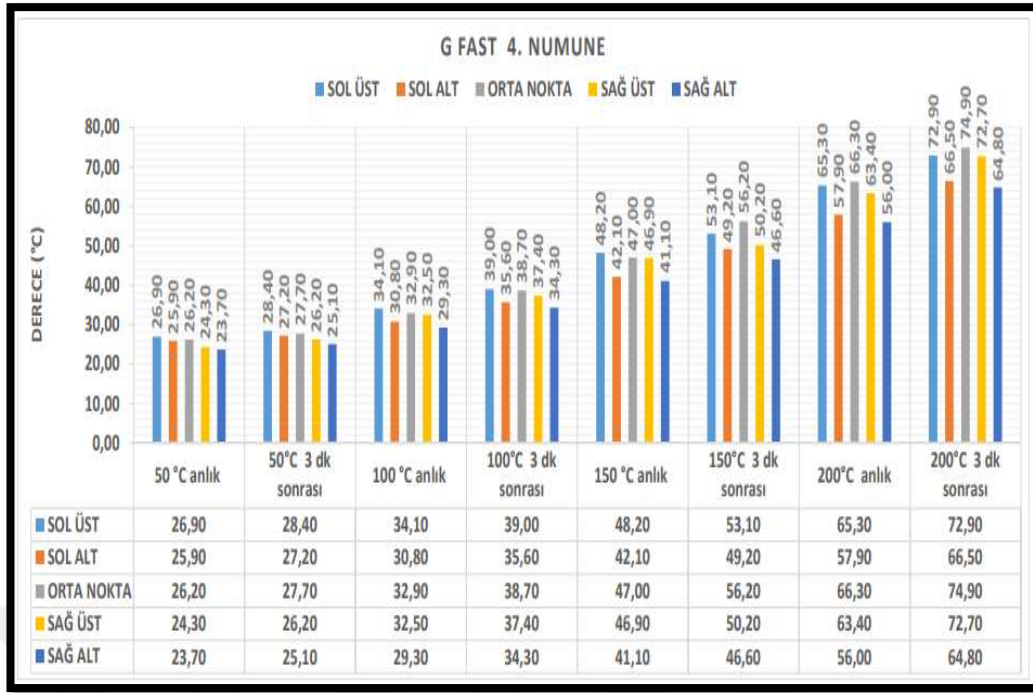
Şekil 5.19 G Fast camı 2. numune deney sonuçları

Şekil 5.19’da G Fast camı 2. numune deney sonuçları verilmiştir.



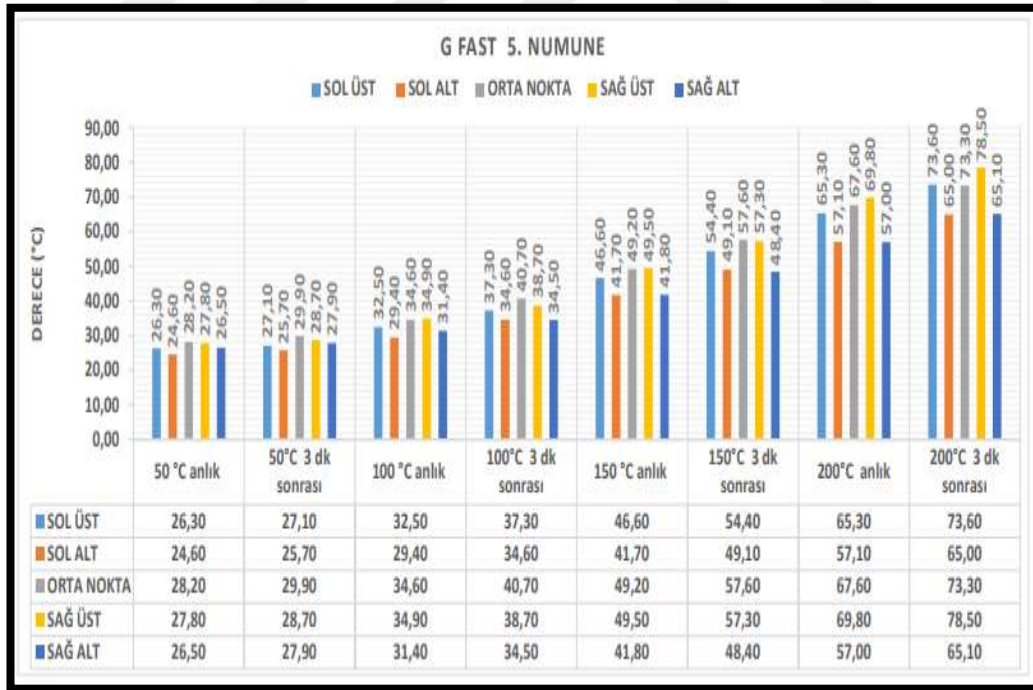
Şekil 5.20 G Fast camı 3. numune deney sonuçları

Şekil 5.20’de G Fast camı 3. numune deney sonuçları verilmiştir. Şekiller 5.18-5.20 incelendiğinde en düşük sıcaklığın 1. numunede olduğu görülmektedir. Sıcaklık değerlerine göre 1. numunede en yüksek sıcaklık 77,0 °C çıkarken, 2. numunede bu değer 83,20 °C, 3. numunede ise 80,70 °C olmuştur.



Şekil 5.21 G Fast camı 4. numune deney sonuçları

Şekil 5.21’de G Fast camı 4. numune deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.22 G Fast camı 5. numune deney sonuçları

Şekil 5.22’de G Fast camı 5. numune deney sonuçları verilmiştir.



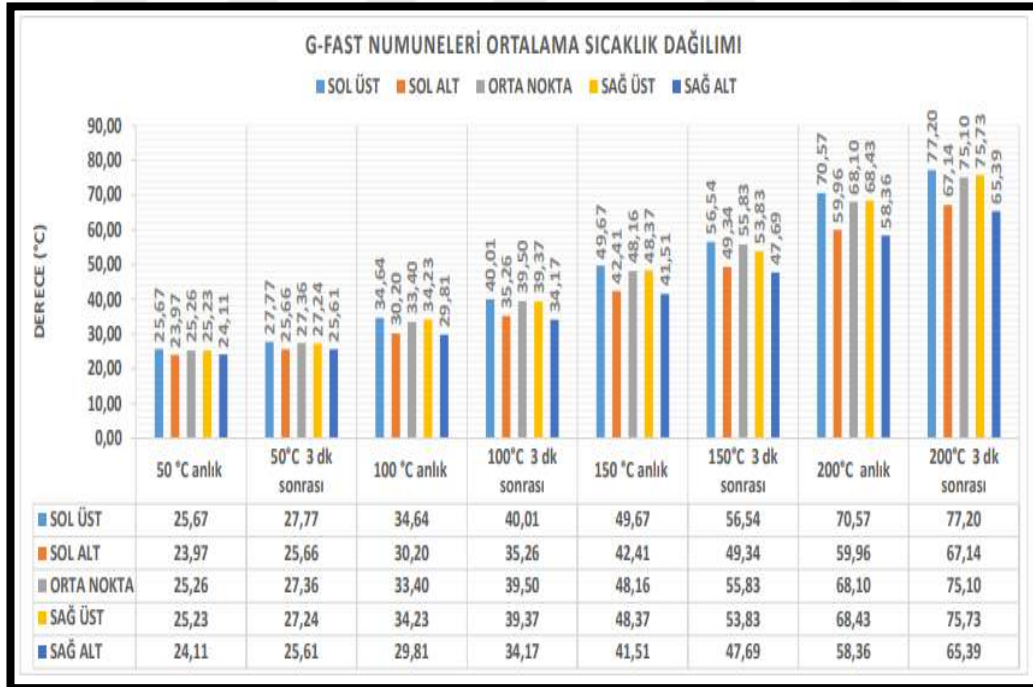
Şekil 5.23 G Fast camı 6. numune deney sonuçları

Şekil 5.23’de G Fast camı 6. numune deney sonuçları verilmiştir. Fırın iç sıcaklığının 200 °C’de 3 dakika bekletilmesi ardından en yüksek sıcaklık değerinin 81,90 °C olduğu en düşük sıcaklık değerinin ise sağ alt noktada 63,60 °C olduğu ölçülmüştür. Sağ alt noktada ölçülen sıcaklık değeri diğer numunelere kıyasla daha düşük çıkmaktadır. Bu durumun sebebi olarak yerleştirilen probun cama tam temas etmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.24 G Fast camı 7. numune deney sonuçları

Şekil 5.24’de G Fast camı 7. numune deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.25 G-Fast camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı

Şekil 5.25’de G Fast camı için 7 numunenin ortalama sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekilde 5.25’de verilen değerler her nokta için ölçüm yapılan yedi farklı sıcaklık değerinin ortalamasını ifade etmektedir. G Fast camı için verilen şekiller 5.18- 5.26 incelendiğinde diğer tüm deneylerde olduğu gibi camın üst noktasında ölçülen değerlerin alt noktaya kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Low-e kaplı olan G Fast camının Tec-15 ve Planibel G camlarına oranda yüzey sıcaklığı olarak daha düşük değer verdiği görülmüştür. Fırın 200 °C’de 3 dakika beklemesinin ardından camın sol üst noktasında 77,2 °C, sol alt noktada 67,14 °C orta noktada 75,10 °C, sağ üst noktada 75,73 °C ve sağ alt noktada 65,39 °C olduğu ölçülmüştür. Camın üst köşelerindeki sıcaklık farkı %1,9 çıkarken camın alt sağ ve sol köşelerindeki sıcaklık farkı %2’dir.



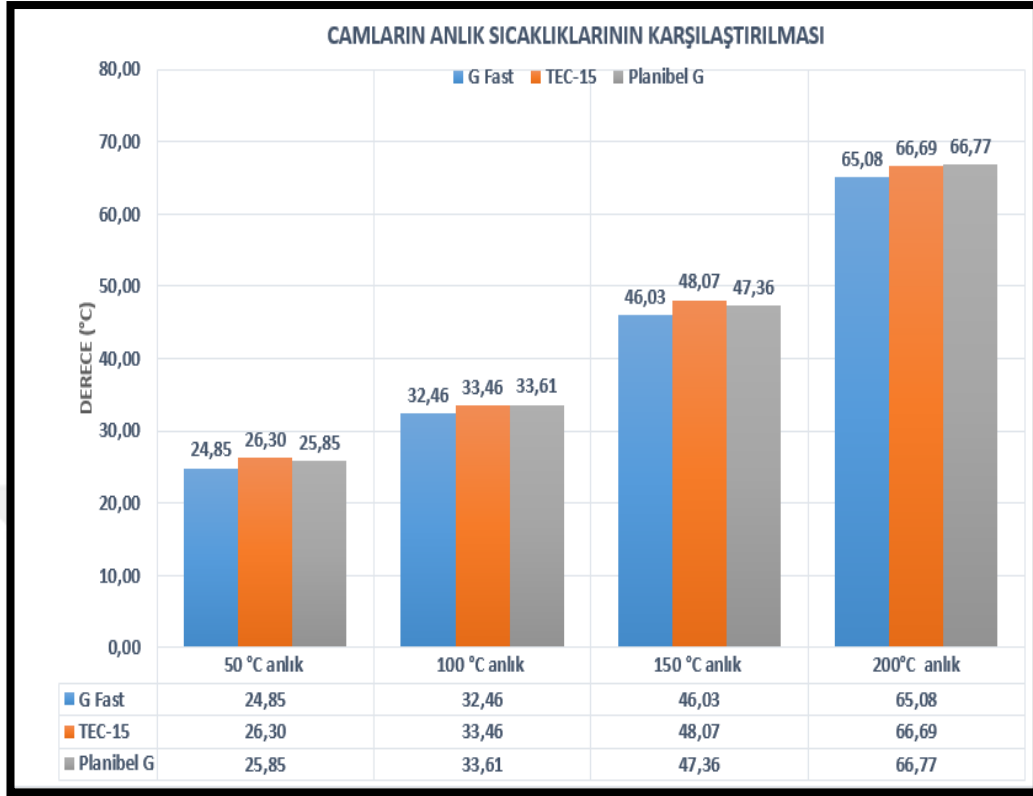
Fotoğraf 5.16 EDTM RC2175 cihazı temperleme öncesi G Fast camı yüzey direnç ölçümü sonucu



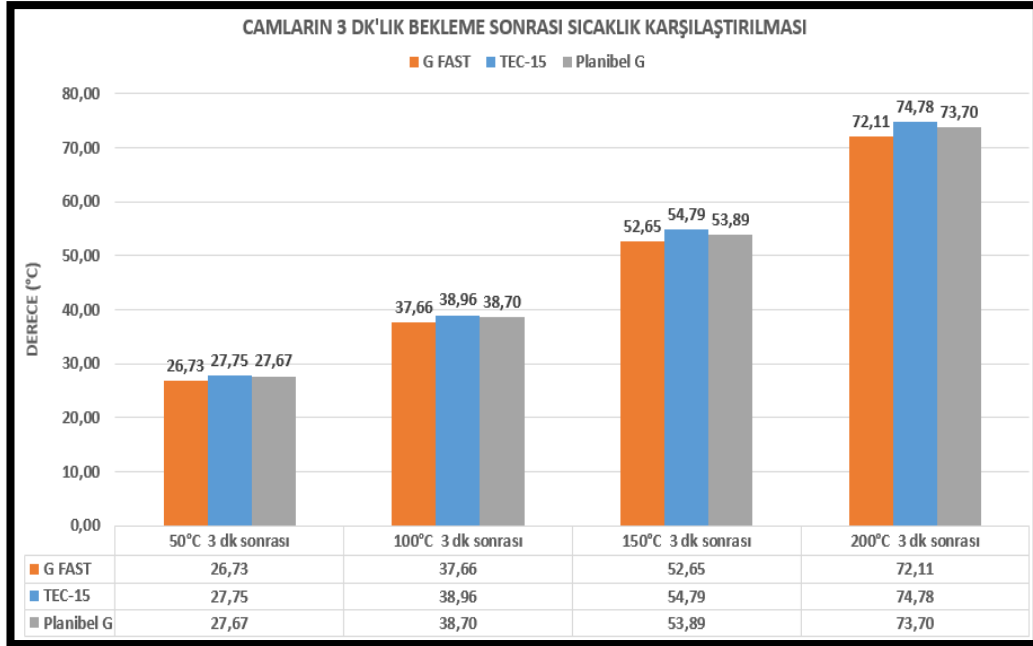
Fotoğraf 5.17 EDTM RC2175 cihazı temperleme sonrası G Fast camı yüzey direnç ölçümü sonucu

Fotoğraflar 5.16,5.17’de G Fast numunesinin akredite edilmiş yüzey direnç cihazı ile ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Temperlenmemiş G Fast numunesinin yüzey direnci 0,14 ohm/cm² olarak ölçülürken. Temperleme sonrasında ise 0,12 ohm/cm² olarak ölçülmüştür.

5.2.4. Camların Karşılaştırılması



Şekil 5.26 Camların anlık sıcaklıklarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.27 Camların 3 dk bekleme sonrasında sıcaklıklarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması

Ölçüm yapılan 3 farklı numunenin sıcaklık ortalama değerleri Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de verilmiştir. Şekillerde yer alan her bir değer 35 tane sıcaklık değerinin ortalamasını göstermektedir. Bu değer hesaplanırken camın 4 köşesi ve orta noktası olmak üzere 5 farklı noktanın ortalaması alındı. Yapılan bu işlem aynı cam türünde aynı sıcaklık altındaki 7 farklı numune için hesaplandı daha sonra numunelerin ortalaması alınarak 35 farklı sıcaklık değeri ortalaması tek bir değer olarak elde edildi.

Camların sıcaklık ortalamaları karşılaştırıldığında fırın iç sıcaklığı anlık olarak 50 °C’ye ulaştığında en yüksek sıcaklık değeri 26,30 °C ile TEC-15 camına aittir. En düşük sıcaklık ise 24,85 °C G Fast camına aittir. İki cam arasında %5.8 sıcaklık farkı oluşmaktadır. Fırın iç sıcaklığı 3 dakika boyunca 50 °C de sabit tutulduğunda camda oluşan en yüksek sıcaklık 27,75 °C ile yine TEC-15 camında aiten en düşük sıcaklığın ise 26,73 °C ile G Fast camına aittir. Planibel G camının sıcaklık ortalaması iki camın ortasında bir değer olarak çıkmaktadır. Planibel G camı ise 50 °C’de 3 dakika bekleme ardından 1,82 °C ısınmıştır.

Fırının iç sıcaklığı anlık olarak 100 °C ye ulaştığında en yüksek değer 33,61 °C ile Planibel G camına aittir. En düşük sıcaklık değeri ise 32,46 °C ile G Fast camında görülmektedir. Burada sıcaklık farkı %3 olarak hesaplanmıştır. Fırın iç sıcaklığı 100 °C de 3 dakika boyunca bekletildiğinde TEC-15 camı Planibel G camından daha yüksek sıcaklığa ulaşarak 38,96 °C’ye ulaşmıştır. En düşük sıcaklık değeri ise G Fast camına ait olup 37,66 °C’dir. G Fast camı ile Tec-15 camı arasındaki sıcaklık farkı 1,3 °C’dir. Planibel G camının sıcaklığı ise 38,70 °C ile TEC-15 camına oldukça yakın bir değer göstermektedir.

Fırının iç sıcaklığı anlık olarak 150 °C olduğunda camın dış yüzey sıcaklığı TEC-15 için 48,07 °C, Planibel G camında 47,36 °C, G Fast camında ise 46,03 °C’dir. Burada TEC-15 ile G Fast camı kıyaslandığında %4,4’lük bir sıcaklık farkı vardır. Fırının iç sıcaklığı 150 °C de 3 dakika bekletildiğinde ise TEC-15 camı 54,79 °C’ye yükselerek %14’lük sıcaklık artışı olmuştur. Planibel G camında ise 53,89 °C ile %13,7 artış olmuştur. Artış değeri ise TEC-15 ile çok yakındır. G Fast camı 150 °C de 3 dakika bekleme sonunda 52,65 °C ile %14 sıcaklık artışı yaşamıştır. Fırın iç sıcaklığı 3 dakika bekleme ardından en verimli sonuç yine G

Fast camında olmaktadır. G Fast camı ile Tec-15 camı arasında hesaplanan sıcaklık farkı %4'tür.

Fırın iç sıcaklığı anlık olarak 200 °C olduğunda TEC-15 camı 66,69 °C, Planibel G camı 66,77 °C, G Fast camı ise 65,08 °C olduğu görülmektedir. Diğer sonuçlarda olduğu gibi G Fast camı diğer camlardan daha iyi bir sonuç vermektedir. Fırın sıcaklığı sabit tutularak 3 dakika beklendiğinde TEC-15 camında sıcaklık ortalamasının 74,78 °C ile %12 sıcaklık artışı olduğu, Planibel G camında 73,70 °C ile %10,3 artış olduğu, G Fast camında ise 72,11 °C ile %10,8'lik artış olduğu hesaplanmıştır. Camların sıcaklıkları kendi aralarında kıyaslandığında anlık sıcaklık olarak TEC-15 camı ile Planibel G camının çok yakın sonuç verirken 3 dakika bekleme ardından TEC-15 camının daha yüksek sıcaklığa ulaştığı, en iyi sıcaklık sonucunun ise G Fast camında olduğu görülmektedir. G Fast camı ile Tec-15 camı arasında %3,7 fark oluşmaktadır.

Tablo 5.3 Camların temperleme işlemi öncesi ve sonrası yüzey direnç değerleri

ISIL İŞLEM/ CAM TÜRÜ	G Fast ohm/cm ²	Planibel G ohm/cm ²	TEC-15 ohm/cm ²
Temperleme Öncesi	14	14	13
Temperleme Sonrası	12	13	12

Tablo 5.3'e bakıldığında, camlara temperleme işlemi yapılmadan önce G fast ve Planibel G camlarının yüzey direnç değerleri 14 ohm/cm², TEC-15 camının ise 13 ohm/cm² olduğu ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler camların teknik verileri ile uyusmaktadır. Temperleme işlemi sonrasında ise Planibel G numunesi 13 ohm/cm²'ye düşerken G Fast numunesi 12 ohm/cm²'ye düşerek TEC-15 ile aynı değeri almaktadır.

1900'lerin başlarında alman fizikçi Paul Drude, metalde bulunan serbest elektronların optik davranışını serbest elektronların kinetik teorisi temelinde açıklamıştır. Bu teori günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hagen ve

Rubens 20.yy'ın başlarında kütleli metallere gelen ısı yayılımının emisivite ve iletkenlik arasında güçlü bir şekilde ilişkilendirildiğini keşfettiler (Ding & Clavero, 2017).

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{8 \varepsilon_0 w}{\sigma}} \quad (1)$$

ε = Emisivite

ε_0 = Boşluğun Permittivitesi $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (F/m)}$

w = Açısal frekans (rad/s)

σ = Malzemenin elektrik iletkenliği (S)

$R = 1/\sigma$ Elektrik direnci (ohm)

Yukarıdaki formüle bakıldığında emisivite değerini hesaplanırken elektrik iletkenliği ile doğrudan bir bağlantı vardır. Malzemenin elektrik direnci ne kadar düşükse elektrik iletkenliği de o kadar yükselmektedir. Dolayısıyla elektrik direnci ne kadar düşerse emisivite değeri de o kadar düşer. Camların temperleme işleminden sonra G Fast camının 12 ohm/cm^2 olduğu Planibel G camının ise 13 ohm/cm^2 olduğu ölçülmüştür. Aynı üretici tarafından üretilen bu iki cam formüle uyarlandığında da G Fast camının neden Planibel G camına kıyasla daha düşük sıcaklıkta olduğunu göstermektedir (Ding & Clavero, 2017).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fırınlarda yaygın olarak low-e cam kullanılmasının sebebi ısı performansının diğer (kaplamasız) camlara oranla daha iyi olmasıdır. Üretim maliyetinin standart camlara göre fazla olmaması yaygın kullanılma nedenlerinden biridir. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde standart cam yerine low-e cam kullanıldığı durumda enerji korunumunun önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

- Yapılan deneylerde diğer tüm literatür çalışmalarında olduğu gibi cam yüzeyinin low-e ile kaplandığında ısı geçişin azaldığı bu sayede enerjiden tasarruf edildiği görülmüştür.
- Camların sıcaklık değerleri incelendiğinde fırın sıcaklığı arttıkça camın köşelerinde oluşan sıcaklık farkının arttığı görülmüştür. Buna ek olarak fırın 50 °C'ye ısıtıldığı zaman 3 dakika bekleme sonrasında G fast camının ortalama sıcaklık değeri 26,73 °C olmakta, fırın sıcaklığı iki kat artırılarak 100 °C'ye çıkarıldığında bu değer 37,66 °C olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 200 °C ye bakıldığında G fast camının ortalama sıcaklığın 72,11 °C olduğu görülmüştür. Bu duruma göre fırın sıcaklığı 2 katına çıkmasına rağmen camın sıcaklığı %40 artmıştır. Fırın sıcaklığı 4 kat artmasına rağmen cam yüzey sıcaklığı 2,69 kat arttığı görülmektedir.
- Alman fizikçiler Hagen ve Rubens tarafından bulunan formüle göre emisivite ile camın elektrik direnci arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Bu bağlantıya göre aynı üretici tarafından üretilen G Fast ve Planibel G camları karşılaştırıldığında temperleme sonrası daha düşük dirence sahip olan G Fast camının daha düşük emisivite oranına sahip olduğu dolayısıyla ısı ve enerji performansın daha iyi olduğu görülmüştür.
- Fırın iç sıcaklığı 200 °C'ye ulaştığında camların ortalama sıcaklık dağılımına baktığımızda TEC-15 camının 66,69 °C olduğu, Planibel G camının 66,77 °C olduğu ve G Fast camının 65,08 °C olduğu görülmüştür. Fırın sıcaklığının 3 dakika boyunca 200 °C de bekletildiğinde ise TEC-15 camının %12 artış sağlayarak 74,78 °C, Planibel G camının %10 artış sağlayarak 73,70 °C, G Fast camının ise %10,8 artış ile 72,11 °C olduğu

görülmüştür. Fırın sıcaklığı 3 dakika beklediğinde TEC-15 camı ile G fast camı arasında %3,7'lik fark olduğu hesaplandı. Aynı şekilde TEC-15 ve Planibel G camı kıyaslandığında ise %1,5'lik sıcaklık farkı olduğu görülmektedir.

- Yapılan deneyler sonucunda fırın genel kullanım sıcaklığı olan 200 °C'de G Fast camı TEC-15 camına kıyasla %3,7 daha düşük sıcaklık sonucu verirken fiyat olarak %12 daha pahalıdır. Planibel G camı TEC-15 ile kıyaslandığında %1,4 daha düşük sonuç verirken %6,8 daha pahalıdır. G Fast camı Planibel G camı ile kıyaslandığında sıcaklık bakımından %2,2 daha düşük çıkarken %5 daha pahalıdır. Bu durumlar göz önünde bulundurularak mühendis yaklaşımı ile bakıldığında TEC-15 camı ticari açıdan daha iyidir.
- Yapılan tez çalışması göz önünde bulundurulduğunda ileride çift cam kullanılması ve camın yüzeyinde kaplama kalınlığı optimize edilerek low-e cam kullanımının performansı arttırmasına yönelik çalışmalar yapılabilir. Ayrıca kullanılan camlarda birden çok gümüş kaplama yapılmasıyla oluşan sıcaklıklar daha da düşürülerek fiyat performans değerlendirmesi yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.

Akışkaloğlu, E. (2019). *Farklı Türde Camların PV/T Sistem Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*.

Albaşkara, M. (2017). *Er₂O₃ ve CeO₂ Katkılı Borosilikat Camların Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Chiba, K., Takahashi, T., Kageyama, T., & Oda, H. (2005). *Low-emissivity coating of amorphous diamond-like carbon/Ag-alloy multilayer on glass*. *Applied Surface Science*, 246(1-3), 48-51.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.10.046>

Ding, G., & Clavero, C. (2017). *Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy- Saving Window Applications*. *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*. InTech. <https://doi.org/10.5772/67085>

Doğru, K. (2018). *Krom Oksit (Cr₂O₃) Katkılı Borosilikat Camların Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

DPT. (1990). *VI. Beş Yıllık Kalkınma Planı Ö.İ.K. Raporu*.

Ferrara, M., Castaldo, A., Esposito, S., D'Angelo, A., Guglielmo, A., & Antonaia, A. (2016). AlN–Ag based low-emission sputtered coatings for high visible transmittance window. *Surface and Coatings Technology*, 295, 2-7.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.015>

Finley, J. J. (1999). *Heat treatment and bending of low-E glass*.

FLUKE. (2022). <https://www.fluke.com/tr-tr/urun/sicaklik-olcumu/ir-termometreleri/fluke-52-ii>.

Gültekin, B., & Bagherdi, E. (2015). *Cam Yapı Malzemelerinin Enerji Performanslarının Değerlendirilmesi*. 824-831.

Harmancı, F. (2018). *Camın Delinmesinde Kullanılan Delme Parametrelerinin İstatistiksel Yöntemlerle Optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Huang, S., Wang, Z., Xu, J., Lu, D., & Yuan, T. (2008). *Determination of optical constants of functional layer of online Low-E glass based on the Drude theory. Thin Solid Films, 516*(10), 3179-3183.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.08.137>
- Kim, I., Frenzl, A., Kim, T., Min, S., & Blumm, J. (2018). *Determination of Thermal Transmittance of Insulated Double Low-E Glazing Panel Using Portable Uglass Measuring Technique. International Journal of Thermophysics, 39*(1). <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2334-3>
- Leitch, K. K. (2005). *Structural Glass Technology: Systems and Applications* [MSC Thesis]. Massachusetts Institute of Technology.
- MEB. (2013). *Seramik ve Cam Teknolojisi Cam Türleri ve Camı Oluşturan Oksitler*.
- MEGEP. (2008). *Seramikler ve Cam Teknolojileri Camın Kimyasal Yapısı*. MEB.
- Öbelik, Y. (2011). *Cam Hammaddesi Mineralojisi ve Cam Teknolojisi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özgül, F. (2009). *Temperlenmiş Otomobil Camlarının Darbe Dayanımının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Schaefer, C., & Suer, G., & Szczyrbowski, J. (1997). *Low emissivity coatings on architectural glass. İçinde Surface and Coatings Technology (C. 93)*.
- Şenkal, F. Ş. (2005). *Farklı Cam Türlerinin Performans Kriterlerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Dergisi, 10*(1), 15-21.
- Taştemür, E. (2017). *Arkeolojik Veriler Işığında Camın Tarihsel Süreci. Trakya Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi, 7*(13), 67-91.
- Teber, C. (2018). *Düşük Yayınlı Kaplamalı Camların Çizilme Dirençlerinin Belirlenmesi ve Geliştirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turhan, E. (2007). *Mimari Tasarımda Cam Kullanımı ve Alışveriş Merkezlerinde Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- UNİT. (2022). <https://www.uni-t.com.tr/unit-ut-320d-mini-termometre>.