

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİVDE BOYAMA TEKNOLOJİSİ VE BOYA
KURUTMA FIRINININ EKSERJİ ANALİZİ**

Makina Mühendisi Çağrı PAŞA

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olcay KINCA Y

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
2. BOYAMA VE BOYA HAKKINDA GENEL BİLGİLER	6
2.1 Boyanın Kısa Tarihçesi	6
2.2 Çevreyle Etkileşimleri Açısından Organik Kaplama Türleri	8
2.2.1 Çözücü İçeren Boyalar	8
2.2.2 Çözücü İçermeyen Sıvı Boyalar	9
2.2.3 Sulu Boyalar	9
2.2.4 Toz Boyalar	11
2.3 Uygulanan Organik Kaplamaların ve Yardımcı Malzemelerin Türleri	12
2.3.1 Boyalar	12
2.3.1.1 Astarlar	12
2.3.1.2 Ara Kat Boyalar	13
2.3.1.3 Son Kat Boyalar	13
2.3.2 Renklendiriciler	14
2.3.3 Vernikler	14
2.3.3.1 Dolgu Vernikleri	14
2.3.3.2 Son Kat Vernikler	14
2.3.4 Macunlar	15
2.3.5 Sertleştiriciler ve Katalizörler	15
2.3.6 İncelticiler	16
2.3.7 Yalıtım Amaçlı Macunlar ve Mastikler	16
2.4 Kuru Film Oluşturma Süreçleri Açısından Organik Kaplama Türleri	17
2.4.1 Çözücü Buharlaşmasıyla Film Oluşturan Kaplamalar	18
2.4.2 Hava Oksijeniyle Sertleşen Kaplamalar	19
2.4.3 Fırında Kuruyarak Sertleşen Kaplamalar	20
2.4.4 İki (veya Daha Çok) Bileşenli Kaplamalar	22
2.4.5 Işıma İle Sertleşen Kaplamalar	23
2.4.6 Nemle Sertleşen Kaplamalar	23
2.4.7 Kaynaşma İle Sertleşen Kaplamalar	24
2.5 Organik Kaplamaların Uygulanma Teknikleri	25
2.5.1 Fırça ve Rulo Uygulamaları	25

2.5.2	Püskürtme Uygulamaları	26
2.5.2.1	Konvansiyonel Havalı Püskürtme Uygulamaları	26
2.5.2.2	Yüksek Hacimli Düşük Basıncılı Püskürtme Uygulamaları	28
2.5.2.3	Havasız Püskürtme Uygulamaları	29
2.5.2.4	Elektrostatik Püskürtme Uygulamaları	29
2.5.2.5	İkili Beslemeli Püskürtme Uygulamaları	32
2.5.2.6	Sıcak Püskürtme Uygulamaları	32
2.5.2.7	Sıvılaştırılmış Karbon Dioksitle Püskürtme Uygulamaları	32
2.5.2.8	Robotik Uygulamalar	33
2.5.3	Daldırma ve Akıtma Uygulamaları	33
2.5.4	Elektroforetik Uygulamalar	34
2.6	Metal Yüzeylerin Organik Kaplama Uygulamasına Hazırlanması	35
2.7	Otomotiv Oem Boyaları	37
2.7.1	Araç Yüzeylerinin Boyaya Hazırlanması	38
2.7.2	Elektroforetik Astarlar	39
2.7.3	Püskürtme Edilerek Uygulanan Astarlar	39
2.7.4	Tek Kat Uygulanan Düz Renkli Son Katlar	41
2.7.5	Yaş Üzerine Yaş Uygulanan Baz Kat + Vernik Biçimindeki Son Katlar	42
2.8	Boya Atma Kabinleri	43
3. KURUTMA PROSESİ		45
3.1	Kurutmanın Tanımı	45
3.2	Kurutma Prosesinin Teorisi	46
3.2.1	Hava Sıcaklığının Etkisi	48
3.2.2	Hava Nem Miktarının Etkisi	48
3.2.3	Hava Akış Hızının Etkisi	48
3.2.4	Nem Miktarının Tanımı	49
3.3	Kurutucu Verimi	49
3.4	Kurutmada Kullanılan Yöntemler	49
3.4.1	Konveksiyon Kurutması	49
3.4.2	Temas Kurutması	50
3.4.3	Radyasyon Kurutması	50
3.4.4	Dielektrik Kurutma	50
3.5	Kurutma Çeşitleri	50
3.5.1	Operasyon Metodu	50
3.5.2	Nemin Buharlaşması İçin Gerekli Isıyı Temin Eden Metot	51
3.6	Kurutmada Enerji ve Kütle Dengesi	51
3.6.1	Kütle Dengesi	51
3.6.2	Enerji Dengesi	52
3.7	Çözücü Buharları İçin Nem Tabloları	53
3.8	Otomotivde Boya Kurutma Prosesi	53
3.8.1	Kuruma Zamanları	53
3.8.2	Boyaların Kuruma Prensibi	54
3.8.3	Boya Filminin Sertleşmesini Etkileyen Faktörler	55
3.8.3.1	Nem	55
3.8.3.2	Sıcaklık	56
3.8.3.3	Ön Buharlaşma	56
3.8.3.4	Hava Sirkülasyonu	57
3.8.4	Boya Filminin Kuruması	57
3.9	Boya Kurutma Fırını	59

4. İNSİNERASYON VE TERMAL İNSİNERATÖRLER	61
4.1 Doğrudan Alevli İnsineratörler	61
4.2 Termal İnsineratörler	61
4.3 Hava Kalitesinin Kontrolü	66
4.4 Hava Kirleticileri ve Egzost Havaasının Arıtılması	66
4.4.1 Egzost Havaasının Arıtılmasının Temel Prensipleri	66
4.4.2 Boyahane Emisyon Kaynakları	67
4.4.3 Duman ve Koku Emisyonu	68
4.4.4 Oksidasyon	68
4.4.4.1 TNV Santrali	68
4.4.4.2 RNV Santrali	70
5. TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI	73
5.1 Kapalı Sistemler İçin Birinci Yasa Analizi	73
5.2 Açık Sistemler İçin Birinci Yasa Analizi	74
5.2.1 Süreklilik Denklemi	74
5.2.2 Açık Sistemler İçin Birinci Yasa Genel İfadesi	75
6. TERMODİNAMİK SİSTEMLERDE İKİNCİ YASA KAVRAMI	76
6.1 Entropi	77
6.1.1 Mükemmel Gazların Entropi Değişimi	78
6.1.2 Mükemmel Gazların Tersinir Politropik Hal Değişimi	78
6.2 Entropinin Artışı İlkesi	78
6.2.1 Kapalı Sistemlerde Entropi Üretimi	80
6.2.2 Açık Sistemlerde Entropi Üretimi	81
6.3 Ekserji (Kullanılabilir Enerji) Kavramı	81
6.3.1 Kapalı Sistemlerde İkinci Yasa Çözümlemesi	82
6.3.2 Açık Sistemlerin Sürekli Akışlı İkinci Yasa Çözümlemesi	84
6.3.3 Zamanla Değişen Açık Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlemesi	85
6.3.4 Termodinamik Sistemlerde İkinci Yasa Verimi	87
6.3.5 Kimyasal Ekserji	87
7. OTOMOTİVDE KULLANILAN BOYA KURUTMA FIRINININ EKSERJİ ANALİZİ	90
7.1 Boya Kurutma Fırını	93
7.2 Termal İnsineratörün Yanma Odası	98
7.3 Termal İnsineratörün Reküperatörü	105
7.4 Sirkülasyon Havaası Eşanjörü	108
7.5 Fırın Giriş Havaası Eşanjörü	111
8. SONUÇLAR	115
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ	119

SİMGE LİSTESİ

A	Yüzey alanı (m ²)
c	Özgül ısı (kJ/kg.K)
E	Enerji (kJ)
\dot{E}_1	Birim zamanda kurutucuya giren maddelerin enerjileri
\dot{E}_2	Birim zamanda kurutucudan çıkan maddelerin enerjileri
e^{Kim}	Kimyasal ekserji (kJ/kmol)
e_k^{Kim}	k Gazının kimyasal ekserji (kJ/kmol)
e_y^{Kim}	Yakıtın kimyasal ekserji (kJ/kmol)
G	Toplam Gibbs fonksiyonu (kJ)
g	Özgül Gibbs fonksiyonu (kJ/kg)
H	Entalpi (kJ)
h	Özgül entalpi (kJ/kg), Yanma entalpisi (kJ/kmol)
h^0	Çevre şartlarındaki standart entalpi (kJ/kmol)
h_c	Yanma entalpisi (kJ/kmol)
h_f^0	Oluşum entalpisi (kJ/kmol)
h_h	Havanın özgül entalpisi
h_b	Buharın özgül entalpisi
h_s	Sıvının özgül entalpisi.
I	Toplam tersinmezlik (kJ)
\dot{I}	Özgül tersinmezlik (kJ/kg)
k	Isı transfer katsayısı (J/m ² s°C)
ke	Özgül kinetik enerji (kJ/kg)
m	Kütle (kg)
\dot{m}	Kütle debisi (kg/s)
n	Politropik üs
P	Basınç (kPa)
pe	Özgül potansiyel enerji (kJ/kg)
Q	Isı geçişi (kJ)
\dot{Q}	Birim zamanda kurutucu ile çevresi arasındaki ısı alışverişi
R	Gaz sabiti (kJ/kg.K)
S	Entropi (kJ/K)
s	Özgül entropi (kJ/kg.K)
T	Sıcaklık (K)
t	Zaman (s)
U	İç enerji (kJ)
u	Özgül iç enerji (kJ/kg)
V	Hacim (m ³)
v	Hız (m/s)
\dot{V}	Hacimsel debi (m ³ /h)
W	İş (kJ)
\dot{W}	Birim zamanda kurutucuya dışardan verilen iş
Z	Yükseklik (m)
ω	Özgül nem (kgH ₂ O/kg kuru hava)
ν	Özgül Hacim (m ³ /kg)

Yunan Harfleri

λ	Çözücü buharlaşma ısısı (J/kg)
ε°	Standart kimyasal ekserji (kJ/kmol)
Φ	Kapalı sistem kullanılabilirliği (kJ)
ϕ	Kapalı sistemin birim kütle için kullanılabilirliği (kJ/kg)
Ψ	Açık sistem akış kullanılabilirliği (kJ)
η	Verim (%)
Σ	Toplam

Alt İndisler

a	Akış, araba
b	Buhar
ç	Çıkış
d	Bozunum
g	Giriş
h	Kurutmak için fırına alınan taze hava
l	Kayıp
p	Sabit basınç
s	Sıvı (çözücü)
sis	Sistem
tr	Tersinir
üret	Üretilen
v	Sabit hacim
0	Ölü hal, çevre hali
1	Başlangıç veya giriş hali
2	Son hali veya çıkış hali

Üst İndisler

.	Birim zamanda
–	Birim mol için
o	Standart referans hal

KISALTMALAR

AED	Anodik elektro kaplama
BF	Benzoguanamin formaldehit
CED	Katodik elektro kaplama
CO	Katalitik oksitleyici
EB	Elektron ışını
EO	Elektro oksitleyici
HC	Hidrokarbon
HVLP	Yüksek hacimli düşük basınçlı
KM	Katı madde
KE	Kinetik enerji (kJ)
LEL	Alt alev alma noktası
MBT	Mercedes-Benz Türk A.Ş
MF	Melamin formaldehit
NC	Nitroselüloz
OEM	Orijinal araç üretimi
PE	Potansiyel enerji (kJ)
RNV	Rejeneratif ısı oksitleyici
RTO	Rekuperatif ısı oksitleyici
SASA	Sürekli akışlı sürekli açık
TNV	Isıl sonradan yakma
TO	Isıl oksitleyici
TPA	Termoplastik akrilik
UEL	Üst alev alma noktası
UF	Üre formaldehit
UV	Ultraviyole
ÜİD	Üst ısı değer
VOC	Uçucu organik bileşik

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıvı boyalardaki başlıca film oluşturma mekanizmaları	18
Şekil 2.2 Bir havalı püskürtme devresinin temel elemanlarının görünümleri	27
Şekil 2.3 Tipik bir havalı püskürtme tabancasının kesit görünümü	27
Şekil 2.4 Elektrostatik püskürtme uygulamalarında kullanılan araçlar	30
Şekil 2.5 Gerilim farkına bağlı olarak çan (veya disk yada tabanca) ile yüzey arasında oluşan elektrik alan çizgilerinin şematik olarak gösterimi	31
Şekil 3.1 Tipik kurutma prosesi grafiği	47
Şekil 3.2 Süreksiz kurutucuda madde akışı	52
Şekil 3.3 Süreksiz kurutucuda enerji akışı	52
Şekil 3.4 Boya ile metal yüzey arasında suya maruz kalan ara yüzey	55
Şekil 3.5 Boya filminin kuruması	58
Şekil 3.6 Sentetik boyanın kuruma prensibi	58
Şekil 3.7 Selülozik boyanın kuruma prensibi.....	59
Şekil 3.8 Boya kurutma kabınınin içinin görünümü	59
Şekil 3.9 Fırın sıcaklık göstergesi	60
Şekil 3.10 Analog fırın sıcaklık göstergesi	60
Şekil 4.1 Doğrudan alevli insineratörün şematik gösterimi	61
Şekil 4.2 Doğrudan alevli bir insineratör için çok jetli bir tip yakıcı	62
Şekil 4.3 Rejeneratif termal insineratör ve reküperatif termal insineratörün şematik gösterimi	64
Şekil 4.4 Reküperatif termal insineratörün kısımları	69
Şekil 4.5 Termal insineratör ünitesi tesisatının tüm ekipmanlarıyla birlikte sistem şeması	70
Şekil 4.6 Rejeneratif termal insineratörün uygulama örneği.....	71
Şekil 4.7 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan termal insineratörler	71
Şekil 4.8 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan bir başka termal insineratör cihazı ve sıcak hava kanalları	72
Şekil 4.9 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan termal insineratör cihazının tüm üniteleriyle birlikte dış ortama yerleştirildiği bir uygulama.....	72
Şekil 6.1 Kapalı sistemin şematik şekli.....	80
Şekil 6.2 Açık sistemin şematik şekli.....	81
Şekil 6.3 İzotermal genişlemeyle sistemin hal değişimi	88
Şekil 6.4 Yanma odasındaki akış	89
Şekil 7.1 Ekserji analizi yapılacak sistemin şematik gösterimi.....	91
Şekil 7.2 Ekserji analizi yapılacak sistemdeki tüm giren ve çıkanların numaralı akım şeması	92
Şekil 7.3 Boya kurutma fırınına giren ve çıkanların numaralı akım şeması	94
Şekil 7.4 Termal insineratörün yanma odasına giren ve çıkanların numaralı akım şeması	98
Şekil 7.5 Termal İnsineratörün Reküperatörüne giren ve çıkanların numaralı akım şeması .	105
Şekil 7.6 Sirkülasyon havası eşanjörüne giren ve çıkanların numaralı akım şeması	108
Şekil 7.7 Fırın giriş havası eşanjörü giren ve çıkanların numaralı akım şeması	111

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Çeşitli organik buhar ve gazların hava ile karışımının tutuşma aralıkları (Müezzinoğlu, 2000)	62
Çizelge 4.2 Bazı organik toksik maddelerin tutuşma sıcaklıkları	65
(Müezzinoğlu, 2000)	65
Çizelge 4.3 Termal insineratör tasarım ilkeleri(Müezzinoğlu, 2000)	65
Çizelge 7.1 Sistemin numaralı akım şemasında karşılık gelen kısımların sıcaklık değerleriyle beraber gösterilişi	92
Çizelge 7.2 Sistemin numaralı akım şemasında karşılık gelen kısımların hacımsal ve kütleli debi, sıcaklık, özgül ısı, öz kütle değerleri (Çengel, 2000)	93
Çizelge 7.3 Sistemde reaksiyona giren ve çıkan bileşiklerin oluşum, yanma ve çevre şartlarındaki standart entalpi değerleri (Kotas, 1995)	100
Çizelge 7.4 Sistemde reaksiyona giren ve çıkan bileşiklerin Gibbs oluşum fonksiyonu ve standart kimyasal ekserji değerleri (Kotas, 1995)	103
Çizelge 8.1 Sistemin enerji ve ekserji analiz sonuçları	115

ÖNSÖZ

Enerjinin korunumu prensibini ifade eden termodinamiğin birinci yasası her ne kadar enerji analizlerinde gerekli ise de, yapılan bu analiz bir enerji sisteminin çeşitli bileşenlerinin potansiyelleri ile kullanım sınırlamaları hakkında tam bir fikir vermez. Bu durum enerji sistemlerinin tasarım ve imalatında istenen uyumluluğu sağlayamaz. Oysa termodinamiğin ikinci yasası veya ekserji analizi enerji sistemlerinin tasarımında ve performans analizinde daha iyi sonuç verir.

Ekserji diye adlandırdığımız kullanılabilir enerji, bir sistemin çevresi ile denge haline gelirken yapabileceği en fazla faydalı işi belirtir. Bu bakımdan ekserji, belirli bir çevre hali için sistemin iş yapabilme potansiyelinin bir ölçüsüdür. Ekserji analizi ısı sistemlerinin değerlendirilmesinde ve tasarımında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yapılmış olan bu çalışmada, ekserji analizi metodu kullanılarak boya kurutma fırınının ekserji analizi yapılmıştır.

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde çok büyük desteği ve emeği olan, ayrıca yönlendirmeleriyle bana yardımcı olarak çalışmalarım sırasında bana gösterdiği anlayış ve sabırlarından ötürü saygı değer tez danışmanı hocam Sayın Prof. Dr. Olcay KINCA'ya, bugüne kadar bende emeği olan tüm hocalarıma, sabır ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Lisansımı da tamamladığım ve daima büyük onur duyduğum okulumuzda yüksek lisans da bitirmiş olmaktan sonsuz mutluluk duymaktayım.

ÖZET

Genellikle hava, endüstride kullanıldıktan sonra atmosfere geri verilmektedir. Egzost havasının bileşimi dikkate alınarak minimum gereklilikle çevreyi korumak için atmosfere dönüş havasını korumalıyız. Yanabilir organik bileşikleri uzaklaştırılması ile ilgili olarak oksidasyon egzost havasının veya havadaki gazın temizlenirken kullanılan en güvenli ve en yaygın metodudur. Kirli hava yüksek sıcaklığa ısıtılıp içerisindeki organik bileşiklerin yakılarak karbondioksit ve suya ayrıştırılır. Havayı temizlemek için mali etkenler gibi ihtimallerin kapsamlı ısı kazanımlarında büyük önemi vardır. Isıl egzost havası arıtımının yüksek sıcaklık seviyelerinde genellikle ısının geri kazanılması bir gerekliliktir. Isıl oksidasyonlu cihazları modern enerji maliyet anlayışı karşısında ısı geri kazanımsız düşünülemez. Egzost havasının arıtılması esasen bir maliyet faktörüdür. Bu faktör mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Her bir problem için en iyi çözüm aşamalı olarak geliştirilmelidir.

Bu optimum kurutma koşullarını sağlamak için ekserjiyi en etkili araçlardan biri yapmaktadır. Ekserji analizleri, özellikle endüstride (geniş ölçekte) yüksek sıcaklıkta kurutma uygulamaları için daha önemli hale getirmektedir.

Bugün ısı sistemlerinin tasarımında Termodinamiğin birinci yasası'nın esasları artık yeterli bulunmamaktadır. Bunun nedeni, ısı kaynaklarının ve sistemlerinin etkin kullanımlarının, enerji niceliğinden çok niteliğinin göz önünde tutularak sağlanabilmesidir. Prosesin termodinamiğin ikinci yasa analizi yapılarak ikinci yasa verimleri hesaplanmaktadır. Ekserji, bir sistemden elde edilebilecek maksimum teorik iş olarak tanımlanmaktadır.

Endüstri sektörü için sürekli gelişmek, büyümek çok önemlidir. Buna paralel olarak mühendislik tasarımında, maliyetleri minimum veya kazancı maksimum yapmak ana hedefdir.

Anahtar Kelimeler: Boyama, boya kurutma, termal insineratör, ısı geri kazanımı, ekserji.

ABSTRACT

Usually the air used in industry returns later to the atmosphere. In order to protect the environment minimum requirements with regard to the composition of exhaust air which is returned to the atmosphere must be kept. Where the removal of flammable organic substances is concerned, oxidation is the most universal and safest method of exhaust air or gas purification. The polluted air is heated to such high temperatures that the organic substances burn to water and carbon dioxide. Extensive heat recovery is of great importance in order to make the purification as cost effective as possible. The high temperature levels of thermal exhaust purification usually makes heat recovery a must. Thermal oxidation installations without heat recovery are unthinkable in the face of the modern energy and cost situation. Because exhaust air purification basically is a cost factor. It must be in one's interest to keep the expenses as low as possible. The best solution for each problem must be developed in stages.

This makes exergy one of most powerful tools to provide optimum drying conditions. Exergy analysis becomes more crucial, especially for the industrial (large-scale) high-temperature drying applications.

Nowadays , the principles of the first law of thermodynamic, which is used in the thermal systems design, is not found sufficiently enough. The reason for this conclusion is, the efficient use of thermal resource and systems is maintained by the quality of the energy, not by quantity of the energy. The second law of thermodynamics analysis has been made for the process, and the second law efficiency has been examined. Exergy is defined as the theoretical maximum work that can be acquired from a system.

Development and growing up is very important for industry sector. In parallel to this, in engineering design, making the costs minimum or the gain maximum is the main target.

Keywords: Coating, coat drying, thermal incinerator, heat recovery, exergy.

1. GİRİŞ

Modern yaşamın temel ihtiyaçlarından olan enerji, günlük yaşamda kullanılmadığı herhangi bir saha yoktur. Günümüzde enerji kullanımı toplumlar için gelişmişlik ölçütü olarak kullanılmaktadır. Özellikle elektrik ve ısı enerjisinin hayatımızda önemli bir yeri vardır. Sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen bu enerji, talep artışına bağlı olarak daha değerli hale gelmektedir. Kıymetli olan bu enerjilerin değerlendirilmesinde son kullanım noktasındaki makinelerin verimi ne kadar önemliyse elde edilmek amacıyla uygulanan enerji dönüşümleri de o kadar önemlidir. Kullanılan yakıtın enerjisinin, elde edilmek istenen enerji türüne en yüksek oranda dönüştürülmesi istenir. Çevre faktörleri ve dönüşümü gerçekleştiren sistemlerin verimleri düşünüldüğünde yakıtın enerjisinin tamamının mekanik ya da ısı enerjisine dönüştürülmesi mümkün değildir. Bu durumda yakıttan elde edilebilecek maksimum enerji (ekserji) sınırlıdır. Bütün enerji dönüşümleri tersinmezliklerin sebep olduğu bu sınırlar dahilinde gerçekleşmektedir. Enerji üretim sistemlerinin ve bu sistemleri oluşturan elemanların bu sınırlara göre değerlendirilmesi yapılmalıdır. Bu şekilde yapılan analiz yöntemi ekserji analizi olarak adlandırılmıştır. Ekserji analizi ile sistem yada elemanların ekserji bozunumu ya da ekserji kaybından kaynaklanan tersinmezliklerin miktarları ve yerleri tespit edilir. Enerji analizinde, çevre faktörleri tamamen göz ardı edildiğinden dolayı benzer sistemler karşılaştırılırken enerji yönünden karşılaştırma yeterli olmayacaktır. Oysa sistemin etkileşimde olduğu çevre, çalışma şartlarını değiştirmektedir. Bu sebeple ekserji analizi ile elde edilen ekserji verimi yönünden sistemlerin karşılaştırılması daha yerinde olacaktır. Ekserji analizinin sonucunda sistem veriminin artırılması hedeflenir. Ekserji veriminin artırılabilmesi için tersinmezliklerin azaltılması gerekmektedir. Analiz ile belirlenen tersinmezliklerin azaltılabilmesi için alınabilecek önlemler belirlenir. Bu tedbirler çerçevesinde verim mümkün olan en yüksek değere çıkartılır. Ekserji analizi sayesinde sistemdeki tersinmezliklerin yerleri belirlenip bunların azaltılması ile verimi artırmak mümkündür.

Isıl sistemlerin büyük bir çoğunluğuna direkt veya dolaylı fosil yakıtların yakılması sonucu ekserji girişi olur. Ekserji yıkım ve kayıpları yanma sonucu atık kaynaklar neticesinde oluşur. Bu kayıpları azaltmak için yakıttan daha üst düzeyde faydalanma yolları aranmalıdır. Ekserji dengesi, atık enerji kaynaklarının yerlerini, tiplerini ve büyüklüklerini tanımlama imkanı verir. Ekserji kayıp ve yıkımlarının irdelenmesi daha verimli yakıt kullanımı için stratejiler geliştirmede bizlere önemli ipuçları verir.

Dünya hızlı bir şekilde yıpratıcı bir gelişim sürdürmektedir. Ve bu sebeple dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması gerçeğinin giderek daha geniş kesimlerce anlaşılması, hükümetleri enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerji savurganlığını önlemeye yöneltmiştir. Bu olgu, bilimsel çevreleri de enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve varolan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye itmiştir. Doğal kaynaklar hızla tükenmekte ve ekolojik denge bozulmaktadır. Bu durum sebebiyle geri kazanma yöntemleri zorunlu ve istenilen bir durum haline gelmiştir. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin niceliğiyle ilgilidir, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular, bir hal değişimi sırasında enerjinin korunumunu gerektirir. Bu yasa, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve uygulamada mühendis için bir zorluk çıkarmaz. Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir. Hal değişimlerinin hangi yönde gerçekleşebileceklerini belirler ve enerjinin niceliği yanında niteliğinin de olduğunu vurgular. Daha açık söylenirse, bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma olanağının değerlendirilememesi bu yasanın inceleme alanı içindedir. Enerji kaynağından maksimum verimle yararlanmanın yolu entropinin minimum seviyede arttığı bir sistemin dizayn edilmesidir. Mühendislik sistemlerinde enerjinin niteliğini öne çıkaran yönde iyileştirmeler yapılması, mühendisin bilgi ve becerisinin sınırlarını zorlayan bir konudur.

Termodinamik sistemlerin analizlerinde birinci yasa analizi ile elde edilecek sonuçların değerlendirilmesi bazı hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle birinci yasa analizi ile birlikte ikinci yasa analizinin de yapılması daha doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. Bir hal değişimi ancak termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına uyarak gerçekleşebilir. Termodinamiğin ikinci yasası, karmaşık termodinamik sistemlerin optimizasyonu için güçlü bir araçtır.

Kimyasal reaksiyona girmeyen sistemler söz konusu olduğu zaman, sıcaklık ve basınç değişimleriyle ilişkili ısı enerjisi ve faz değişimleriyle ilişkili gizli ısı enerjisi göz önüne alınır. Fakat kimyasal reaksiyona giren sistemler söz konusu olduğunda, atomlar arasında kopan ve oluşan bağlarla ilişkili kimyasal ısı enerjisinin de göz önüne alınması gerekir. Kimyasal reaksiyona girmeyen sistemler için geliştirilen, enerjinin korunumu bağıntıları kimyasal reaksiyonların olduğu sistemler için de geçerlidir. Fakat bu bağıntılarda sistemin kimyasal enerjisiyle ilgili düzenlemelerin yapılması gerekir.

Yapılan bu tez çalışmasının içerisinde, organik kaplamalarla ilgili tanım ve kavramlara, malzeme bilgilerine ve uygulama alanlarına ayrıntılı olarak değinilmiştir. Uygulama

süreçlerine ilişkin bilgilerle yani tüm organik kaplamaları kapsayacak biçimde açıklanmış, kurutmayla uygulanacak ısıl sürece kadar olan aşamalar açıklanarak uygulanacak olan ısıl sürecin üretimdeki önemi ve enerji kullanımının bu süreçlerdeki önemi vurgulanmak istenmiştir.

Kurutma, çeşitli ısıl enerji uygulamalarının oldukça geniş bir alanda kullanıldığı ve en çok enerji gerektiren proseslerinden birisidir.

1.1 Literatür Araştırması

Çok sayıda çalışmayı kapsayan ısıl sistemlerin termodinamik analizleri, bir çok araştırmacı tarafından yapılmıştır. Bununla beraber literatürde kurutma proseslerinin enerji ve ekserji analizleri üzerine olan araştırmalar ve bilgiler sınırlıdır. Buna göre bu konuda bahsedilen ve yapılan belli başlı çalışmalar aşağıdaki gibi sunulmuştur.

Bunlardan , Dinçer ve Şahin (2003), nemim kurutma prosesindeki ekserji analizi için yeni bir termodinamik model geliştirmiş, ısı ve kütle transferi parametrelerinin fonksiyonuna göre enerji verim oranı tanımlamışlardır. Tanımlayıcı bir örnek sunularak oluşturdukları modelin önemini vurgulayarak, kurutma prosesinin analizi ve optimizasyonu için nasıl önem gösterdiğini belirtmişlerdir. Oluşturdukları bu modelde, enerji verim oranı ve ekserji modelindeki ısı ve kütle parametrelerinin birleştirildiği ilk çalışmadır.

Sieniutycz ve Kubiak (2002), Termodinamik tersinmezliği kullanarak tanımlama ve mühendislikteki sonlu elemanların önemiyle birlikte ardışık gelişmelerin çalışmayı destekleyen prosesler için dinamik limitlerin analizini yapmışlardır. Dinamik limitler klasik ekserji değişimi açısından ve dağılmış ekserjinin minimum kalması veya bazı genişlemeleri kapsamasını ifade etmektedir. Proseslerdeki ısı ve kütle transferleriyle birlikte dikkate alınarak sonlu zamanda ve sonlu boyuttaki gereçlerden meydana getirmişlerdir. Böyle proseslerin mekanik ısı , ayrı operasyonlar ve kütle değiştiricilerinin, ısıl şebekelerin, enerji çeviricilerin, enerji geri kazanım ünitelerinin, depolama sistemlerinin, kimyasal reaktörler ve kimyasal fabrikaların kurulmasını içerdiğini belirtmişlerdir.

Syahrul (2002), giriş ve çıkış koşullarının optimizasyonu için nem partiküllerinin akışkan yataklı kurutma prosesinin termodinamik analizini yürütmüştür. Enerji ve ekserji modelleri, giriş havasının sıcaklığı, akışkanlaştırma hızı, enerji ve ekserji verim oranlarındaki başlangıç nem içerikleri gibi hidrodinamik ve termodinamik koşulların etkilerinin çalışması kullanılır. Analiz farklı malzemeler için tatbik edilmiştir. İyi bir mutabakat (uyuşma) deneysel veri ve model tahminleri arasında başarıya ulaşmıştır.

Demirel and Sandler (2001), lineer dengede olmayan termodinamiği entropi üretimi ve güç kaybı fonksiyonlarının gerçek kuvvetlerle çok bileşenli akışlarda ısı ve kütle transferi için akışlar gösterilmesinin ifade edilmesi için kullanmışlardır.

Horlock vd. (2000) , kapalı sistemlerin ısıl veriminin; elde edilen net işin verilen ısıya oranı olduğunu, açık çevrimlerde ise elde edilen net işin ideal şartlarda elde edilebilecek tersinir işe oranı olduğuna işaret etmişlerdir. Bu tanımdan hareketle literatürde kurutma prosesleri için benzer verim ifadesi olduğu belirtilmiştir.

Miguel (2000), gözenekli yapı içerisindeki kütlenin değişimi ve gözenekli yapıya doğru olan akışkan akışı için bir termodinamiksel model kullanarak ve gözenekli yapıya olan kütle taşınımı alanındaki teorik ve deneysel araştırmaları sunar. Deneysel çalışma,gözenekli yapıların termodinamik grafikleri sağlayarak ve teorik yaklaşımlarla gerekli parametreler çıkarılarak tatbik edilir.Nem içeriğinin etkisi ve akışkan taşıma özelliklerindeki sıcaklık da incelenmiştir.

Topic (1996), yüksek sıcaklıklı yiyecek kurutucularda endüstriyel sistemlerin ekserji analizi için matematiksel bir model sunulmaktadır. Hem özel bileşenlerin nitel analizinde hem de sistemin tamamında bir bilgisayar yazılımı kullanımına izin vermektedir. Modelin uygulanması, yiyecek kurutma için yazılım, ekserji değişimleri, basit elementler ve değer parametrelerine bağlı olarak sistemin çalışma kalitesinin göstergelerini de sunmaktadır.

Sieniutycz (2000), ardışık çalışmalarla desteklenmiş ısıtma ve kurutma operasyonlarının optimizasyonları için ekserji ve entropi kriterleri oluşturdukları bu çalışmada içten tersinir ısı makinalarıyla ortak olarak işletilmiş ve kurutma operasyonları ve bunların alışagelmiş ısıtma tanımlamalarıyla birlikte bunların kriterlerinin yapıları karşılaştırılmıştır.

Dinçer (2001), yaptığı çalışmada kurutma sistemlerini ve uygulamaları için enerji, ekserji ve çevre açısından etkilerini kapsamlı olarak sunmuş, ve ekserji kavramının kullanılmasındaki çeşitli karmaşıkların çevre problemlerinde analiz edilmesi ve çözümlenmesi için bu yönde faydalı uygulamalar için önemini vurgulamak istemiştir. Bazı teorik ve pratik limitlerin enerji ve ekserji verimlerini enerji ve ekserji arasındaki bağlantıları üzerinde tartışarak sunmuştur.

Bejan (1982), sistemdeki kayıp işin azaltılması sistemin daha verimli bir sistem yapacağını belirtmiştir. Ayrıca, Bejan ve Szargut (1988), sistem verimi üzerinde kayıp işin analiz edilmesi için işletme koşulunun etkisinin çok büyük olması ısı dengesi analizi için olduğunu vurgulamıştır. Bu açıklamalar kurutma esnasındaki verimsiz proses, donanım veya işletme prosedürlerini belirlemede gerekmektedir.

Yukarıda açıklanan literatür çalışması; "Boya kurutma fırınının ekserji analizi" konusunda yapılmış olan herhangi bir çalışmaya rastlanmadığını göstermektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, araç kurutma fırınının temiz, homojen ve tam yanma özelliklerine sahip doğal gazın yakılmasıyla ve boyalı metal yüzeylerin fırınlanması sırasında oluşan çözücülerin doğal gazla beraber yakılması sonucu sisteme olan ekserji girişinin analizinin yapılmasıdır. Bunun için, çözücülerini içeren sıcak havanın büyük bir kısmı dışarı atılmadan termal insineratörden geçirilerek, çözücülerin büyük çoğunluğunun yakılması ve sıcak havanın dışarı atılmadan eşanjörler vasıtasıyla ısının geri kazanılması ile hem ısı verim sağlanacak, hem de baca gazı daha temiz olarak atmosfere atılacaktır.

Burada ayrıca aracın kurutulması sırasında kullanılan sistemle toplam entropi artışının önüne geçilerek mevcut sistemin nasıl verimli bir şekilde kullanıldığı, hem ürün kalitesinin artışında hem de gelecek nesillere bırakabileceğimiz en önemli mirasımız olan çevrenin nasıl korunduğunu gösterebilmektir.

Otomotiv sektöründe kullanacağımız boya kurutma fırınının ekserji analizini yapabilmek için aracın üzerine uygulayacağımız boyadan ve bu boyanın uygulama şekillerinin, kurutma fırını ve kurutma üzerinde etkili parametrelerin incelenmesi, en önemli uygulama olarak kurutma işlemini gerçekleştirmek için elde ettiğimiz ısı enerjisini ve termal insineratörlerin işleyişinin incelenmesi gerekmektedir.

2. BOYAMA VE BOYA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 Boyanın Kısa Tarihçesi

İnsanoğlu tarafından üretildiği bilinen en eski boya örneklerine ilişkin ilk bulgular buzul çağı mağara resimlerine dayanmaktadır. Zamanımızdan 60.000 yıl öncesine kadar eski mağara resimleri bilinmekle birlikte, Fransa'daki Chauvet-pont-d'arc mağarasında bulunan ve 32.000 yıl kadar önce yapıldıkları anlaşılan mağara resimleriyle, yaklaşık 15.000 yıl önce yapıldıkları anlaşılan, İspanya'daki Altamira ve yine Fransa'daki Lascaux yakınlarındaki mağaraların iç yüzeylerinde bulunan resimler en çok bilinen örneklerdir. Bu resimler üzerinde yapılan kimyasal analizler, mağara insanların, resim yapmada, kömür başta olmak üzere, bitki öz suyu, kan, böğürtlen ve farklı renklerde çamurlar kullandıklarını göstermektedir. Renklendirmenin çoğunlukla çamurlara renklerini veren sarı, kırmızı ve kahverengi doğal demir oksitlerle yapıldığı anlaşılmaktadır.

Ancak, boya ile ilgili ilk büyük ilerlemelerin zamanımızdan 5.000 yıl öncesinden itibaren Eski Mısır Uygarlığı döneminde yaşandığını anlıyoruz. Bağlayıcı olarak kazeinin kullanılmaya başlanıldığı; bakır oksit ve aluminadan yola çıkarak yapılan bir mavi pigmentin, karbon siyahının, tebeşirin, kurşun beyazının, mangan oksitin, demir oksit karışımlarının, indigonun ve kermes, karmen gibi çeşitli böcek özütlerinin karışımlarıyla değişik renklerin elde edildiği arkeolojik bulgulardan anlaşılmaktadır. Bezir yağının M.Ö. 4. yüzyılda boya yapımında kullanıldığına ilişkin belgeler mevcuttur.

Roma uygarlığı döneminde süsleme amaçlı boya yapımında başta kurşun oksit kırmızısı, sülüğen olmak üzere çeşitli renklendiricilerin, reçinelerin ve kuruyan yağların bulunduğu anlaşılmaktadır.

Bunların yanı sıra, günümüzden üç bin yıl önce, Güney Doğu Asya'da bulunan laccifer lacca adlı bir böceğin salgısından elde edilen gomalak reçinesi ve bu böceğin kabuklarından özütlenen lak kırmızısı, boya üretiminde, yakın zamanlara kadar yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak, ilk gerçek verniğin yine günümüzden 3000 yıl önce sumak ağacının öz suyundan yola çıkılarak Japonlar tarafından üretildiği belirtilmektedir. Yaygın kullanımı halen süren bezir yağının günümüzden yaklaşık bin yıl önce vernik yapımında kullanılmaya başlanması da önemli bir kilometre taşı olmuştur.

O zamana kadar resim ve süslemede kullanılan boyanın geniş yüzeyler üzerine uygulanmaya başlanması 1700'lü yıllarda başlamış ve boya üreten atölyeler önce Avrupa'da daha sonra da Kuzey Amerika'da yaygınlaşmıştır. Ardından, pigment sanayi

diyebileceğimiz etkinliğin yeni yeni başladığını, prusya mavisi ve kobalt mavisinin, Alman kimyacı Scheele'nin yeşil pigmentinin ve krom sarısı gibi pigmentlerin keşfedildiğini görüyoruz. 19. yüzyılın ilk yarısında yaşanan sanayi devrimi sırasında birçok temel kimyasal madde daha sınıai uygulamaya sokulabilmiştir. Yirminci yüzyılın ilk kırk yılı içinde ard arda gelen Birinci ve İkinci Dünya Savaşları, tarafların kazanabilmek için kimya sanayinin gelişimine olağanüstü önem verdikleri dönemler olmuştur. Bu dönemde yalnızca silah ve patlayıcı geliştirme çalışmalarıyla sınırlı kalınmamış, bu çalışmaların paralelinde, barış zamanında kullanılacak kimyasal buluşlar da hızla çoğalmıştır. Birinci Dünya Savaşından 50 yıl kadar önce bulunan trinitroselüloz esaslı patlayıcıların yapımı çalışmalarında yarı ürün olarak elde edilen selüloz nitrat (yaygın kullanılan yanlış isimlendirmeye söylenecek olursa nitroselüloz) reçinelerinin organik kaplamalarda kullanılabileceğini ilk olarak İngiliz kimyacılar Wilson ve Green bulmuşlardır. Ancak büyük boyutlu üretim ve boya sanayinde kullanımı 1923'ten sonra yaygınlaşmış olup halen önemli ölçüde sürmektedir. Günümüzde en yaygın kullanılan boya bağlayıcıları olan alkid reçineleri de ABD'li kimyacılar Kienle ve Fergusson (1928) tarafından geliştirilmiş, büyük boyutlu üretimlerine de 1933'te başlanmıştır. Diğer taraftan, İkinci Dünya Savaşı sonrasında, boya üretiminin, hızla bilimsel bir uygulama disiplini olmaya yöneldiği görülmektedir. Zanaattan bilime doğru bu geçiş, 1930-1970 yılları arasında polimer kimyasında yaşanan büyük gelişmelerin paralelinde, farklı özelliklerde bağlayıcıların ve buna bağlı yeni boya türlerinin ortaya çıkmasına yol açtı. Bu dönemde, amino reçineleri, polivinil klorür (PVC), akrilik reçineler, silikon reçineleri, epoksi reçineleri, polyester reçineleri, poliüretan reçineleri gibi bağlayıcıların organik kaplama dünyasında kullanıma girdiği görülmektedir (Seymour ve Mark, 1990).

Biraz daha günümüze yaklaştığımızda, gelişen sanayileşmenin en yoğun olduğu Batı Avrupa ve Kuzey Amerika'da, boyanın kuruma sürecinde çevreye salınan organik çözücülerin çevre ve halk sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin bilincine varılmaya başlandığını görmekteyiz. Bu bölgelerden başlanarak, organik çözücü yayımını azaltacak önlemleri içeren alternatif boya türlerine ve alternatif uygulama yöntemlerine ilişkin arayışlar 1970'li yıllarda yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu arayışlar, organik çözücülerde çözünen mevcut polimerlerin su içine alınabilmesinin nasıl sağlanabileceği çalışmalarının ve su ile inceltililebilecek yeni polimer geliştirme çalışmalarının önem kazanmasına yol açmıştır. Ayrıca çözücüyle inceltilmeden ya da çok az çözücü kullanılarak yeterince akışkan olabilen bağlayıcıların geliştirilmesi çalışmaları da hızlanmıştır. Polimer geliştirme alanındaki bu çalışmalar ve bunu izleyen boya araştırma çalışmaları, çevre dostu

boya ürünlerinin çoğalmasına yol açmıştır. Bu çerçevede, az miktarda organik çözücü içeren yüksek katılı boyalar, çözücüsüz sıvı boyalar, sulu boyalar ve toz boyaların uygulanma alanları giderek genişlemektedir.

2.2 Çevreyle Etkileşimleri Açısından Organik Kaplama Türleri

Boyanın üretimi ve uygulanması süreçlerinde, boyanın akışkanlığının ayarlanmasına sık sık ihtiyaç duyulur. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan organik çözücülerin, sanayileşmenin yoğun olduğu ülkelerde artan boya tüketimine bağlı olarak yarattıkları hava kirliliği değişik arayışları gündeme getirmiştir. Günümüzde, organik kaplamaları, çevre üzerindeki etkileri açısından dört farklı sınıfa ayırabiliriz (Lewis, 1995).

2.2.1 Çözücü İçeren Boyalar

Organik kaplamaların bileşiminde, uygulandıktan sonra sertleşen kaplamanın yüzeye iyi yapışan ve sağlam bir film oluşturması için bağlayıcı olarak adlandırılan bir ham maddeye yer verilir. Organik kaplama bağlayıcıları, çok büyük oranda organik polimerlerden ve organik oligomerlerden seçilirler. Polimerik bağlayıcılar kullanılarak üretilen boyaların akışkanlıklarının ayarlanması için en kullanışlı malzemeler de organik çözücülerdir. Çeşitli aromatik hidrokarbonlar, alifatik hidrokarbonlar, terpenler, alkoller, esterler, ketonlar, glikol eterler, glikol eter esterleri bu amaçla yaygın olarak kullanılan çözücü gruplarıdır. Çözücü (solvent) içeren boyaların atmosfere salınan çözücü buharları dolayısıyla neden oldukları atmosfer kirliliği, Batı Avrupa ve Kuzey Amerika'daki bazı yoğun sanayi havzalarında insan yaşamını, tarımı, yer altı sularını tehdit eder boyutlara ulaşabilmiştir. Bu nedenle, yine çözücülü olup, çözücü içeriği düşük, dolayısıyla da katı madde oranı yüksek boya teknolojilerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Standart çözücülü boyalar "düşük katılı boyalar" olarak (katı madde oranı, KM ağırlıkça %40 veya daha az) adlandırılırken, "orta katılı boyalar" (ağırlıkça KM %40 ile %70 arası) ve "yüksek katılı boyalar" (ağırlıkça KM %70 veya daha yüksek) son otuz yılda kullanıcının hizmetine sokulmaya başlanmıştır. Dolayısıyla, %60 civarındaki çözücü içeriğinin sırasıyla %60-%30 aralığına ve %30'un altına çekilmesi hedeflenmiş olmaktadır. Çözücü içeriğinin %30'un altına çekilebilmesi nedeniyle daha fazla önemsenen yüksek katılı boyalarda, başta akma ve krater yapma yatkınlıklarındaki artma eğilimi yani Yüksek katı madde sağlamak için yapılan düşük molekül ağırlıklı polimer seçimi, polimerin düşük camsı geçiş sıcaklığı T_g , nedeniyle akma eğiliminde artışın yanı sıra uygulanan boyanın ön kuruma (flash-off) sürecinde toz toplama eğiliminde de

artışa neden olmaktadır. Yine polimer molekül ağırlıklarının düşüklüğü nedeniyle molekül içindeki oranı otomatik olarak artan polar fonksiyonel gruplar, bağlayıcı polaritesinin artmasına ve buna bağlı olarak yaş boya yüzey geriliminin düşmesinden kaynaklanan krater ve diğer yüzey sorunlarının artmasına yol açmaktadırlar. Ancak, yine de yüksek katılı-çözücü içeren boyalar, çevre dostu seçeneklerden biri olarak cazibesini koruyan bir gelişme doğrultusu olmayı sürdürmektedirler.

2.2.2 Çözücü İçermeyen Sıvı Boyalar

Çözücü yayımının tamamen önlenmesi için araştırmacıların üzerinde çalıştıkları bir diğer yaklaşım da şu olmuştur. Boya formülünde, çözücülerle inceltmeden de oda sıcaklığında akışkan olan organik bağlayıcılar kullanmak, dolayısıyla akışkanlığı sağlamak için çözücü kullanmak zorunda olmamak; sonra da bu bağlayıcıları uygun tekniklerle kimyasal tepkimelere sokup sert filmler elde etmek.

Bu yaklaşımla geliştirilen organik kaplama grubunun başında, son 15 yılda giderek yaygınlaşan "ışığa (radyasyon) ile sertleştirilen kaplamalar" gelmektedir. Kaplamanın sertleştirilmesinde uygulanan ışığa türleri arasında mor ötesi (ultraviyole) ışınlarının kullanımı en fazla yaygınlığa sahip olduğundan bu grup kaplamalar içinde "UV ile sertleştirilen kaplamalar" başı çekmektedirler.

Aynı yaklaşımla geliştirilen bir başka ürün grubu da, yaş boyanın çözücü içermeyen iki ya da daha çok bileşen halinde ambalajlandığı ve uygulama öncesinde karıştırılan bileşenlerin tepkimeye girmeleriyle sert filmlerin elde edildiği "çok bileşenli çözücsüz kaplamalar"dır. Kalın katlar halinde uygulanabilen ve üzerine uygulandıkları metallerin sürekli su altında kalmaları durumunda da paslanmalarını önleyebilen " çözücsüz epoksi kaplamalar" bu grubun yaygın uygulanan örneklerindedir. Bu tür kaplamalarda, kimi zaman boya formülünde, boyayı inceltebilen ancak daha sonra sertleştirici bileşeni ile tepkimeye girerek filmin içinde kalan ham maddelere de yer verilebilmektedir. "Reaktif seyreltici" de denilen bu girdiler, film içinde bağlanarak kaldıklarından buharlaşıp atmosferi kirletmezler.

2.2.3 Sulu Boyalar

Çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için başvurulan seçenekler içinde en fazla yaygınlaşanı, akışkanlığı ayarlamak için organik çözücüler yerine suyun kullanıldığı sulu

boyalar olmuştur. Sulu boyalar, lateks boyalar, suyla inceltilen boyalar ve sulu emülsiyon boyalar gibi üç alt gruba ayrılırlar.

Katı polimer parçacıklarının su içindeki asıltıları olan lateks bağlayıcılar kullanılarak üretilen lateks boyalarının büyük bir kısmı inşaat boyalarıdır. Uygulanan yaş boya filminden suyun buharlaşmasıyla birbirlerine yakınlaşarak temas eden polimer parçacıkları kaynaşarak kesintisiz bir katı filme dönüşürler. Kaynaşma (koalesans) yoluyla kurumanın düşük ortam sıcaklıklarında da yürüebilmesi için lateks esaslı inşaat boyası formüllerine bir miktar glikol türü çözücü girişine sıklıkla başvurulur. Dış cephe amaçlı inşaat boyalarında akrilik stiren/akrilik ya da stiren/büladien gibi dış dayanımı yüksek polimer lateksleri kullanılırken iç cephe boyalarında dayanımı görece daha düşük, buna karşın daha ekonomik olan polivinil asetat gibi polimerlerin lateksleri kullanılır. İnşaat boyalarının içinde yaşanan kapalı mekân duvarlarına uygulanmaları ve üstelik bu uygulamaların profesyonel olmayan kişilerce yaygın olarak yapılıyor olması nedeniyle, bu sektörde lateks esaslı sulu boyalar çözücülü boyaların yerini büyük ölçüde almışlardır. Sanayi boyaları alanında da, sınırlı ölçüde bir lateks boyası kullanımı vardır.

Suyla inceltile boyalar büyük ölçüde son otuz yıl içinde geliştirilmişlerdir. Asıl kullanım alanı sanayi boyalarıdır. Çözücülü boyalarda kullanılan bağlayıcıların büyük bir kısmının (akrilik, polyester, alkid, epoksi ester vd.) uygun modifikasyonlar yapılarak suyla inceltile boyaya yapımında kullanılmaları mümkündür. Bu grup boyalara, yaygın yapılan bir yanlışlıkla "suda çözünen boyalar"da denmektedir. Oysa, kimyasal anlamda bir çözünme söz konusu değildir. Buna karşın, reçine üzerine yeterli sayıda "su seven (hidrofilik)"grup ekleyerek, suyla inceltilebilme özelliği verilmektedir. Modifiye edilen bağlayıcılar, bir miktar suyla karışan organik çözücüde (glikol, alkol gibi) çözünürler; asidik ya da bazik yapıda oluşlarına göre, uygun amin ya da asitle nötrleştirilirler; pigmentler bu ortamda ezilirler ve kullanımdan önce su eklenip boya viskozitesi uygun değere düşürülerek uygulanırlar. Oluşacak kuru filmin metali pastan koruması bekleniyorsa kullanılacak suyun saflığı önem kazanır. Suyun içinde bulunabilecek çözünen tuzlar, kaplamanın kurummasının ardından film içinde kalacak, kuru filmin sonradan nem ya da suya maruz kalması durumunda da bünyelerine alacakları suyun yaratacağı ozmotik basınçla boya filmde içi tuzlu su dolu kabarcıklara dolayısıyla da alttaki metalin korozyonuna yol açacaklardır. Sınaî pratikte, kendisinden çok yüksek antikorozyif işlev beklenen kataforetik astarlarda en fazla 2-5 mikrosiemens, genel amaçlı metal astar ve boyalarında ise en fazla 30-40 mikrosiemens su iletkenliğine yol açacak miktarda tuz içeriği uygun bulunmaktadır.

Bu tür boyalar, genel olarak toplam formül içinde %10 ile %20 düzeyinde organik çözücü içerirler. Bu yolla, farklı sınaî kullanımlar için çeşitli hava kurumalı ve fırın kurumalı boyalar üretilmektedir. Ayrıca, 1990'lı yıllarda geliştirilen sulu iki bileşenli poliüretan boyalar da genel sanayi, otomotiv ve oto tamir boya alanlarında giderek yaygınlaşma eğilimi göstermektedirler.

Sulu boyaların üçüncü alt grubu sulu emülsiyon boyalarıdır. Su içinde katı polimer parçacıklarının kararlı asıltıları olan lateks boyalarından farklı olarak, sulu emülsiyon boyalar sıvı polimer çözültüsü küreciklerinin su içindeki kararlı asıltılarından oluşurlar. Diğer iki alt gruba oranla daha sınırlı uygulamaları olan bu tür boyaların başlıca örnekleri arasında, sınaî amaçla kullanılan, iki bileşenli ya da fırında sertleşen sulu alkid emülsiyon boyalar, sulu nitroselüloz boyalar ve sulu epoksi boyalar sayılabilirler. Kararlı emülsiyonlar elde etmek amacıyla bu boyaların bileşiminde yer alan ve kuruma sonrasında film içinde kalan emülsiyon katkıları, korozyon performanslarının beklenebileceği ölçüde yüksek olmasını önler.

2.2.4 Toz Boyalar

Toz boyalar hiç çözücü içermezler. Boya bağlayıcısı olarak seçilen polimerler, yüksek sıcaklığa ısıtılıp eritilmek suretiyle akışkanlaştırılarak pigment ve dolguların bu akışkan ortamda dispersiyonu sağlanır. Daha sonra, varsa diğer bağlayıcı ve katkıları da eklenerek homojen hale getirilen karışım ince tabakalar halinde soğutulur. Soğuyan ince tabakalar birkaç aşamada giderek azalan boyutlardaki tane iriliklerine parçalanıp öğütülerek (standart tiplerde 40-100 mikrometre, ince taneli özel tiplerde 20-40 mikrometre çapında) tozlara dönüştürülürler.

Toz boyalarda, halen estetik ve koruyucu özellikler açısından yağ boyalarla elde edilebilen çeşitliliğin elde edilmesi mümkün olamamaktadır. Isıtılmış polimer ortamında, yağ boyalardaki kadar iyi yapılamayan pigment dispersiyonu çok yüksek parlaklıkların elde edilmesine olanak vermez; toz boyanın tane irilikleri ince filmde iyi yayılmalarının gerçekleşmesini önler; ayrıca üretim sırasındaki sıcaklıklar ve dispersiyon etkinliğine göre düşük olması bazı organik pigmentlerin kullanımını, kullanılan vidalı dispersiyon yöntemi de bazı metalik ve sedef pigmentlerin kullanımını sınırlar. Ayrıca, toz boyada kullanılan üretim teknikleri nedeniyle, yağ boyada elde edilebilen hassasiyette renk yapımı da bugünkü teknik imkanlar açısından güçtür. Bağlayıcı türü açısından gerek tepkimeyle sertleşen ve gerekse soğumayla sertleşen bağlayıcılar kullanılarak toz boya yapılması mümkündür. Ancak, toz boya üretim ve uygulama süreçlerine uygunluk

açısından bağlayıcı seçiminde, yaş boyadaki kadar çok seçenek söz konusu değildir. Buna karşın, sıfır çözücü yayımı gerek çevre etkisi açısından, gerekse yangın emniyeti bakımından artan bir kullanım arzusuna yol açmaktadır. Dolayısıyla, toz boyanın genel sanayi, oto yan sanayi amaçlı kullanımında hızlı artan bir yaygınlık söz konusudur. Elektrostatik püskürtme yöntemiyle ve nesneyi akışkan yatak içinde boyama yöntemiyle uygulanmaları mümkündür.

2.3 Uygulanan Organik Kaplamaların ve Yardımcı Malzemelerin Türleri

2.3.1 Boyalar

Bileşiminde pigment adı verilen renk verici maddelerin bulunduğu organik kaplamalara boya adı verilir. Boyalar, tüm organik kaplama türleri içinde en çok ve en yaygın kullanılanları olduğu için çoğu kez "boya" sözcüğü "organik kaplama" sözcüğünün yerini alacak biçimde de kullanılır (Paksoy, 1999)

Boya bileşimlerinde yer alan pigmentler, boya bağlayıcısı ve çözücüleri içinde çözünmeyen, genellikle örtücü (saydam olmayan) renk verici maddelerdir. Boyanın bileşiminde, pigmentlerin yanı sıra, bağlayıcılar, katkılar ve bazı durumlarda da çözücüler yer alırlar. Boyanın kullanım yerine ve amacına göre, yukarıdaki ham madde grupları içinden uygun özelliklerde ham maddeler seçilerek ürün tasarımı ve üretimi yapılır.

2.3.1.1 Astarlar

Boyanın uygulanacağı yüzeye ilk uygulanan pigmentli kaplama türüne astar adı verilir. Eğer uygulama yüzeyi, astarın kapatamayacağı çukur ve tümseklikler içeriyorsa, astardan önce macun uygulamasına da başvurulabilir.

Astarların önemsenen işlevleri şöyle sıralanabilir: Yüzeye iyi yapışma, olumsuz dış etkenlerin etkileriyle boya gamının zamanla yüzeyden ayrılmasına direnebilme, metal yüzeyleri pastan ahşap yüzeyleri küf ve çürümeden koruyabilme, uygulama yüzeyinin görüntüsünü gizleyecek örtücülükle olma, üzerine uygulanacak katların iyi yapışabileceği özellikte olma, boya gamının diğer katlarıyla uyumlu esneklikte olma, üzerine uygulanacak katların pürüzsüz görüntü verebilmesi için yüzey üzerinde iyi yayılan ve kolay zımparalanabilen özellikte olma. Astarlarda kullanılan bağlayıcı ve pigmentlerin yüksek UV direncine sahip olmaları gözetilmez.

Özel bir astar türü de, yüzeyi dönüştürerek yüzeye astar arasında kuvvetli bir yapışma sağlayan ve çok ince (2-5 mikrometre kuru film kalınlığında) bir kat halinde uygulanan astarlardır.

2.3.1.2 Ara Kat Boyalar

Özellikle çok yüksek korozyon direnci istenen uygulamalarda, boya gamının toplam kalınlığının 150 mikrometre ile 500 mikrometre kuru film kalınlığında olması istenir. Bu durumlarda, bir astar boya katıyla bir son kat boyanın yanı sıra, bir de ara kat boya uygulamasına gerek duyulabilir. Bu durumlarda hem astar hem de son katla esneklik, ara kat yapışması, polimerik uyuşma gibi özellikleri uygun bir ara kat kullanımı gerekli olabilir. Ara katların rengi, dış dayanımı çok yüksek olmayan ekonomik pigmentler kullanılarak son katın rengine yakın olacak şekilde seçilebilir. Böylece, dış dayanımı yüksek pigmentler içerecek son katların, daha az miktarda pigment kullanılarak da yeterli örtücülükte olması sağlanıp boya gamı toplamında daha ekonomik çözümler elde edilebilir.

Ayrıca, otomotiv ve oto tamir boyalarında astarın üzerine bir ara kat boya uygulamak ve gamı, son kat vernik ile tamamlamak yaygın bir yaklaşımdır. Bu boya sisteminde kullanılan ara kat boyalar ya sadece renk pigmentleri ya bunlarla birlikte alüminyum metalik pigmentler ya da inci/sedef görünümlü pigmentler kullanılarak formüle edilirler.

2.3.1.3 Son Kat Boyalar

Son kat boya, boya gamının gözle algılanan en üst tabakasını oluşturur. Dolayısıyla hem ilk uygulama sonrasında hem de kullanım ömrü boyunca albenili görünümde olması önemlidir. Bu nedenlerle, son kat boyalarda kullanılan pigment, bağlayıcı ve katkıların hem boyaya beğenilen estetik özellikler katabilmesi hem de bu özellikleri uzun kullanım süreleri boyunca koruması istenir. Bu estetik özelliklerden önde gelenleri arasında renk, parlaklık, sertlik, esneklik, çizilme direnci sayılabilir. Son kat boyanın istenen renkte üretilmesi ve rengini uzun süre koruması uygun pigmentlerin ve bağlayıcıların seçimiyle koruyucu katkıların kullanılmasını gerektirir. Boyanın parlaklığı ise, kullanıcı beklentilerine göre ayarlanır. Parlaklığın baştan ayarlandığı düzeyde kalacak şekilde korunması da dış dayanımı yüksek bağlayıcı seçimiyle sağlanır. Sertlik ve esneklik özellikleri de özellikle uygun bağlayıcı seçimiyle belirlenirler. Çizilme direnci ise kısmen bağlayıcı seçimine, kısmen de yüzeyin sürtünme kat sayısını düşüren katkıların kullanımına

bağlı olarak iyileştirilebilir. Ayrıca, son katların altlarında kalacak astar veya ara katlar üzerine kolayca uygulanabilir olmaları ve iyi yapışmaları da önemle istenir.

2.3.2 Renklendiriciler

Renklendiriciler (stains), bileşiminde pigment ya da boyar madde (dyestuff) bulunan ve uygulandığı yüzeyin dokusuna nüfuz ederek onu renklendiren organik kaplamalardır.

Renklendiricilerin genel olarak, renklendirici bileşiminde boyar madde kullanılması durumunda çok saydam ve canlı renkler elde edilir. Renklendiriciler, dış dayanımı yüksek buna karşın saydam olan pigmentler kullanılarak da tasarlanıp üretilebilirler. Böylelikle elde edilen renklendiricilerin renk derinliği, boyar madde kullanılması durumundakine göre biraz daha az olur. Ancak sonuç pek çok durumda tatmin edicidir. Ek olarak, dış dayanım renk kusması gibi sorunlar aşılmış olur.

2.3.3 Vernikler

Verniklerin boyalardan temel farkları saydam olmaları ve bir iki istisna dışında renksiz olmalarıdır. Bisiklet, motosiklet boyalarıyla, bazı otomotiv boyalarında, metalik ya da inci/sedef baz katların üzerine saydam fakat renkli vernik uygulaması yapılabilmektedir. Bu amaçla, vernik bileşimine az miktarda dış dayanımı yüksek saydam pigmentler eklenmektedir.

2.3.3.1 Dolgu Vernikleri

Dolgu vernikleri, esasen astar boyanın saydam olan karşılığıdır. Dolgu verniklerinin saydam olmaları, doldurucu olmaları, hızlı kurumaları, kolay zımparalanabilmeleri, yapışma, esneklik gibi özellikleri açısından son kat vernikle uyumlu olmaları gerekli olur.

2.3.3.2 Son Kat Vernikler

Son kat vernikler saydam son katlardır. Son kat vernikler, kaplama sisteminin maruz kalacağı çevre koşullarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanıp üretilirler. Dayanıklılık gerektiren koşullar, vernik uygulanacak nesnenin kullanılacağı ortama göre değişirler. Örneğin, mobilya verniklerinin alkollü içkiler, kahve, çay, salça, sirke, ve diğer ev kimyasallarının etkilerine karşı dayanıklı olması istenirken, kablo verniklerinin yüksek sıcaklıklarda da korunan elektrik

yalıtma özelliğine, otomotiv verniklerinin ise UV direncinin yanı sıra, su ve benzin direncine, kuş pisliği direncine, çizilme direncine sahip olmaları istenir.

2.3.4 Macunlar

Uygulama yüzeylerinin iri pürüzlülükler ve çukurlar içermesi durumunda yüzeylere dolduruculuğu çok yüksek bir kaplama cinsi olan macunların uygulanmasına başvurulabilir. Macunlar genellikle, spatula veya macun silindiri ile uygulanacak kadar yüksek viskozitede olurlar.

Macunların formüle edilmesinde bağlayıcı olarak suyla inceltilebilen polivinil alkol, polivinil asetat, poliakrilat gibi polimerlerin yanı sıra, uzun yağlı alkid, nitroselüloz, doymamış polyester, epoksi-poliamid, poliüretan gibi çözücülerle inceltilebilen polimerler kullanılır. Macunların yüzeye yapışmaları, mekanik veya ısıl şoklar sonucu dökülmeleri önleyecek kuvvette olmayabilir. Bu yüzden, alt uygulama katı olarak macun içeren gamlarda, uzun süreli bir performans alabilmek için macunun doğrudan yüzeye uygulanmasından kaçınılmalıdır. Buna karşılık, yüzeye iyi yapıştığı bilinen bir astarın ince bir kat halinde uygulanması, kurummasının ardından da macun uygulamasına geçilmesi uygun olur.

Macun uygulanan yüzeye doğrudan son kat boya uygulanması da olumsuz sonuçlar verir. Yine macunun bağlayıcı açısından fakir olmasına bağlı olarak, bu bölgeye uygulanan son kat boyanın bağlayıcısının bir bölümü macun tarafından emilir. Dolayısıyla bu kısımlarda bölgesel matlıklar gözlenir.

2.3.5 Sertleştiriciler ve Katalizörler

Kimyasal tepkime yoluyla sertleşen organik kaplamaların bir bölümünde, tepkimeye giren bağlayıcılardan biri "sertleştirici" adı altında ayrı ambalajda paketlenir. Bazen de tepkimeyi hızlandıracak "katalizör" birinci ambalaja konduğu takdirde "raf ömrü"nü kısaltacağından ayrı ambalaja alınabilir. Yardımcı malzemeler denilen sertleştirici ve katalizörler çoğunlukla renksiz ve saydam olurlar. Bazı durumlarda ise, bunların birinci bileşenle homojen karışım karışmadığını gözle izleyebilmek için renklendirilmeleri yoluna gidilebilir. Bu yöntem, özellikle, yüksek viskozite nedeniyle homojen karıştırmanın güç olduğu macunlar için kullanılan sertleştirici ve katalizörlerde başvurulur.

2.3.6 İncelticiler

İncelticiler (Tinerler), yaş boyanın uygulama için uygun viskoziteye getirilmeleri amacıyla kullanılan çözücü karışımlarıdır. çözücülü boyalar için kullanılan incelticiler organik çözücülerden oluşurlar. İnceltici karışımlarının hazırlanmasında, çözücülük, ekonomi, buharlaşma hızı, kaynama noktası, koku, parlayıcılık, zehirlilik, göz önüne alınması gerekli parametrelerdir. Organik çözücülerden oluşan inceltici karışımlarının hazırlanmasında, en son uçacak kadar "ağır" olan çözücü bileşenin iyi çözücü olmasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde filmin kurummasına yakın aşamada polimer çözünürlüğü kaybolacak ve polimer çökecektir. Bu, boya filminin sürekliliğini tehlikeye sokan olumsuz bir durumdur.

Hızlı kuruyan hava kurumalı boyalarda, boya kururken yüzey soğuyacağından hava neminin yoğunlaşarak yaş boya filmine karışması söz konusu olabilir. Bu durumlarda "sütlenme (blushing)" kusurunun oluşmaması için incelticinin yanı sıra boyanın %1-2'si oranında su seven ağır çözücü esaslı bir "geciktirici (retarder)" kullanılmalı ya da inceltici bileşimine bu yönde bir ilâve yapılmalıdır.

Ayrıca, fırın kurumalı boyalar için inceltici tasarlarken de pinhol kusurunun oluşmaması için, seçilen çözücülerin kaynama noktaları ve fırın sıcaklığı birlikte değerlendirilmelidir.

Sulu boyalarda inceltici olarak yalnızca su ya da suyun yanı sıra, az miktarda da, suyla karışabilen organik çözücü kullanılır. Kuru filmin ömrü açısından, kullanılan suyun suda çözünen ve uçucu olmayan iyon içeriğinin düşük olması önemli bir gerekliliktir. Bu konu, suyun iletkenliği dikkate alınarak denetlenir.

2.3.7 Yalıtım Amaçlı Macunlar ve Mastikler

Yalıtım amaçlı macunlar ve mastiklerin temel kullanım amaçları, eklemlerdeki ve birleşme noktalarındaki boşlukları esnek bir biçimde doldurarak su, nem, kimyasal, gaz geçişini önlemek yani maddi yalıtımı sağlamak esnek ve (bazı türlerde) gözenekli yapısıyla titreşimleri emerek ses yalıtımını sağlamak ve bazı durumlarda da düşük ısı iletkenliğiyle ve (bazı türlerde) gözenekli yapısıyla ısı yalıtımını sağlamaktır.

Yalıtım amaçlı macunlar, yüzey düzeltme amaçlı macunlardan farklı olarak esneklerdir. $\pm\%10$ dolayında genişip büzülme mümkün olur. Daha yüksek esneklik gerektiğinde ise mastikler kullanılırlar.

Bazı yalıtım mastikleri önceden şekil verilmiş şeritler, levhalar, fitiller halinde pazarlanıp gerek duyulan eklem boşluklarının ya da birleşme bölgelerindeki boşlukların doldurulmasında

kullanılmaktadırlar. Kıvamlı sıvılar olarak pazarlanan türler de spatula ile, özel basınçlı tabancalar yardımıyla, özel tüplerden sıkılmak suretiyle kullanılabilirler.

2.4 Kuru Film Oluşturma Süreçleri Açısından Organik Kaplama Türleri

Özellikle yaş boya söz konusu olduğunda, bir nesnenin boya veya vernik ile kaplanmasındaki en ilginç aşama sıvı kaplama malzemesinin sert, iyi yapışan ve dayanıklı bir ince kaplama tabakasına (diğer bir deyişle bir filme) dönüşmesi sürecidir. Bu sürece, yaygın olarak "film oluşumu" veya "kuru film oluşumu" süreci denir.

Yaş boyalarda, kuru film oluşumu süreci, boyanın omurgasını oluşturan bağlayıcıların sertleşme mekanizmalarına göre sınıflandırılabilir (Rivero, 2002).

Birinci grubu, büyük molekül (birkaç on bin ile birkaç yüz bin arası molekül ağırlığında olan) polimerlerin, içinde çözüldükleri çözücülerin buharlaşmasıyla sert bir filme dönüştükleri sistemler oluştururlar.

İkinci grubu, daha küçük molekül yapısında olan (birkaç bin dolayındaki polimer ağırlıkları söz konusudur) ve tepkime verme yatkınlığına sahip olan polimerlerin, içinde çözüldükleri çözücülerin buharlaşmasının yanı sıra, girdikleri kimyasal tepkimeler sonucunda da büyüyerek sert bir film yaptıkları sistemler oluştururlar.

Üçüncü grubu ise, su içinde yayılmış (disperse edilmiş) büyük molekül ağırlıklı (birkaç yüz binden birkaç milyona kadar molekül ağırlığı aralığındaki polimerler) polimer asıltılarının yer aldığı sistemler oluştururlar. Bu asıltılar, suyun buharlaşmasının ardından kaynaşarak film oluşumuna yol açarlar.

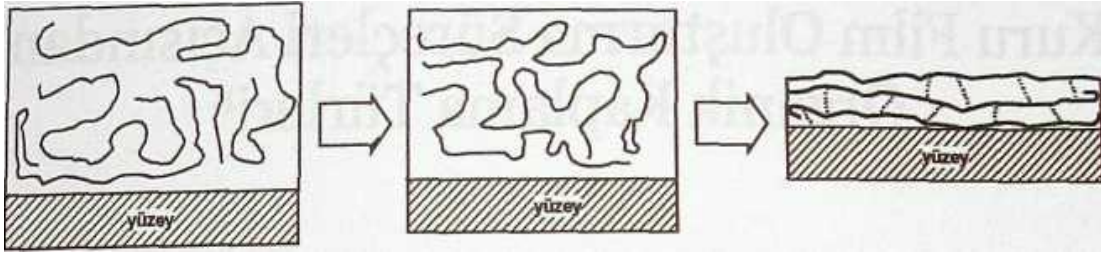
Bu üç gruptaki film oluşumlarının şematik gösterimine Şekil 2.1'de yer verilmiştir.

Toz boyalardaki film oluşumunda ise yukarıda anılan üç seçenektan ilk ikisindeki temel mekanizma geçerli olur.

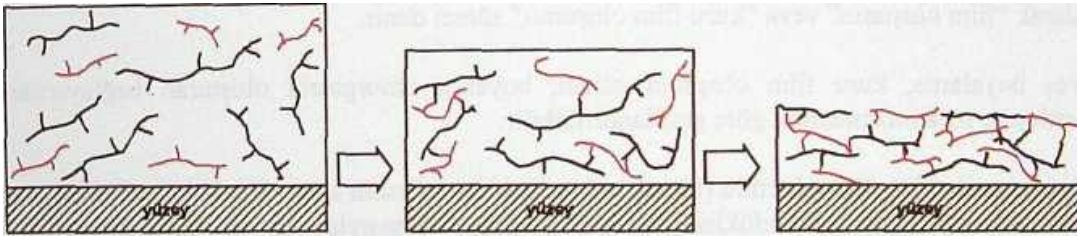
Termoplastik toz boyalar, çözücü buharlaşmasıyla film oluşturan yaş boyalarda kullanılan türden termoplastik polimerler kullanılarak formüle edilirler. Bu grup toz boyalarda, termoplastik polimer, bu kez sıcaklığın etkisiyle fırınlarda yumuşayarak akışkanlaşır, yüzeye kaplanır ve nesne soğuduğunda sert bir filme dönüşür.

İkinci grubu ise reaktif gruplar içeren termoset polimerlerin kullanıldığı toz boyalar oluşturur. Bu grup için geçerli olan temel film oluşturma süreci, boya pişirme fırınlarında sıcaklık uygulanarak eriyip yüzeye yayılan malzemenin yine sıcaklığın etkisiyle tepkimeye giren

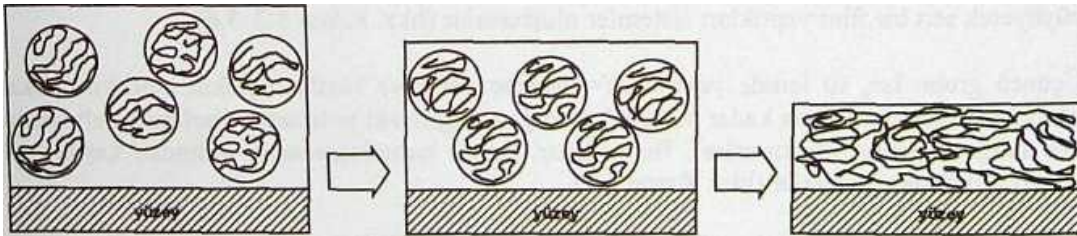
reaktif gruplar nedeniyle, kimyasal bağlarla büyüyen sert bir polimerik yapıya dönüşmesiyle gerçekleşmektedir. Ayrıca, yine reaktif gruplar içeren toz verniklerin UV ışınları kullanılarak sert filmlere dönüştürülmesi uygulamaları da sınırlı olmakla birlikte mevcuttur.



a) Çözücü buharlaşmasıyla film oluşumunda, çözücü molekülleri nedeniyle başlangıçta aralarında büyük mesafeler olan büyük molekülü polimerler, çözücülerin buharlaşmasıyla, birbirlerine ikincil bağlarla tutundukları bir kuru film oluştururlar.



b) Çözücü buharlaşmasının yanı sıra, uygulama yüzeyi üzerinde süren polimerleşmenin etkisiyle film oluşturan sistemlerde, sertleşme sonunda, polimer molekülleri arasında, çözücülere ve çeşitli kimyasallara karşı daha dayanıklı kimyasal bağlar oluşur (Çapraz bağlanma)



c) Sıvı boya halindeyken miseller halinde su içinde asılı duran lateks parçacıkları, su buharlaştıkça, önce birbirleriyle temas ederler, daha sonraki aşamada da kaynaşarak (koalesans) film oluştururlar.

Şekil 2.1 Sıvı boyalardaki başlıca film oluşturma mekanizmaları (Paksoy, 1999)

2.4.1 Çözücü Buharlaşmasıyla Film Oluşturan Kaplamalar

Bu kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan polimerler, oda sıcaklığında sert katı halde ve reaktif yapıda değildirler. Bunların uygun çözücülerde çözünmesi ve diğer boya girdilerinin (pigmentlerin, dolgu ve katkıların) eklenmesiyle yaş boya formüle edilmiş olur. Yaş boyanın uygulanmasının ardından çözücülerin buharlaşmasıyla, boya uygulanan yüzeyde ince ve katı bir film oluşmuş olur. Bu boya filminin ince, homojen ve yüzey kusuru içermeyen bir kuru

film olması için çözücü ortamın, özellikle de çözücünün önemli bir bölümü buharlaştıktan sonra kalan çözücülerin iyi çözücü olması önemlidir (McBane,1999).

Bu tür film oluşturan boyalarda kullanılan başlıca polimerler arasında selüloz nitrat (nitroselüloz), klorlu kauçuk, termoplastik akrilik (TPA) ve vinil reçineleri sayılabilir. Bu bağlayıcılar, reaktif yapıları olmadıkları için ısıtıldıklarında sıcaklık etkisiyle tepkimeye girip sertleşmezler, tersine yumuşarlar. Sadece çözücü buharlaşmasıyla oluşan kuru filmler çok iyi mekanik özelliklere sahip olsa da, film çözücüye maruz kaldığında çözünürler. Yani, çözücü direncine sahip değildirler. Ayrıca, büyük molekül ağırlıklı polimerlerden oluştuklarından bu polimerlerden uygulama viskozitesinde boyalar oluşturmak için fazla miktarda çözücü kullanımı gerekli olur. Bu da hem insan ve çevre sağlığı hem yangın riskleri hem de kullanım ekonomisi açısından sakıncalar içermektedir.

Bu grubun içindeki en yaygın kullanılan ürün ailesini nitroselüloz kaplamaların oluşturmaları nedeniyle, çözücü buharlaşmasıyla film oluşturan sistemler "selülozik sistemler" olarak da anılırlar. Bu sistemlerin temel kullanım nedenleri arasında, ayrıntılı kullanım tarifleri, fırın ve diğer donanım gerektirmemeleri ve de çözücülerin uçmasıyla hızla sert bir film yapmaları sayılabilir. Hızlı çözücü buharlaşması bazı film kusurlarına da yol açabilmektedir. Bu film kusurlarının önüne geçmek için çözücü dengelerinin özenle kurulması gereklidir.

Bu sistemlerde büyük termoplastik polimerlerin kullanılması, çok sert ve kırılğan kaplama filmlerinin oluşmasına yol açabilir. Dolayısıyla, oluşan kuru filmlerin olası kırılğanlıklarının azaltılması için, sistemlerin mevcut ana polimerlerle uyumlu olan küçük moleküllü bazı bağlayıcılarla takviye edilmesi sık başvurulan bir yaklaşımdır.

2.4.2 Hava Oksijeniyle Sertleşen Kaplamalar

İlk tarih öncesi boya örneklerinde de, orijinal hali sıvı olan ve havayla temas ettikçe giderek kuruyan doğal yağların boyalarda bağlayıcı olarak kullanıldığına rastlamaktayız. Boya filmi oluşturmada bu en eski teknoloji, keten yağı, ayçiçek yağı, mısır özü yağı, soya yağı, çam yağı gibi çeşitli yağların hava oksijeniyle tepkimeye girerek polimerleşmesi temeline oturmaktadır. Bu yağları kullanarak, daha kullanışlı sentetik bağlayıcılar olan "kuruyan yağlı alkid" reçinelerinin 1933'ten itibaren yaygınlaşan kullanımları başlamıştır. Günümüzde de en yaygın kullanılan organik kaplama türünü, "hava kurumalı" adıyla da anılan ve kuruyan yağlı alkidler kullanılarak üretilen kaplamalar oluşturmaktadır (McBane,1999).

Hava kurumalı sistemlerde, bir yandan, buharlaşan çözücüler filmin kurumasına yol açmaktadır. Öte yandan da, hava oksijeninin bir çapraz bağlayıcı gibi davranması sonucunda,

alkid reçinesinin yapısında mevcut olan yağ asitleri üzerinden bir polimerleşme gerçekleşmektedir. Oksijenle kuruma (kullanılan bir başka deyişle oksidatif kuruma) bir katalizör kullanılmadığı durumda, oda sıcaklığında yavaş ilerleyen bir süreçtir. Bu nedenle, hava kurumalı boya formüllerinde bu süreci katalizleyen ve kurutucu adı verilen katkıları yer verilir. Kurutucuların önemli bir bölümünü metal sabunları oluştururlar. Hava oksijeniyle sertleşen kaplamalar, fiziksel kurumalarını birkaç saatten bir-iki güne kadar değişen aralıklarda yapmalarına karşın, sahip olmaları beklenen mekanik ve kimyasal dayanıklılıklarına erişmeleri bir ile dört hafta arasında değişen sürelerde gerçekleşir.

Hava kurumalı alkid boyaların kuruma hızlarını ve nihai mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyen en önemli unsur; içerilen alkid reçinesinde bulunan yağ asitlerinin niteliği ve miktarıdır. Yağ asitlerinin içerdikleri doymamışlığın oranına göre alkidle hava oksijeninin çapraz bağlanması sonucunda filmde oluşan "kafes" in gözenek sıklığı belirlenmiş olur. Diğer taraftan, alkid reçinesinin yapısında bulunan yağ asidi oranının artması da aynı türde yağ asidini daha az oranda içeren alkid reçinesiyle yapılan boyaya göre daha yumuşak filmler veren boyalara yol açar.

Çözücü buharlaşmasıyla film oluşturan boyaların olduğu gibi, hava oksijeniyle sertleşen boyaların da, gerek ayrıntılı kullanım bilgisi, gerekse karmaşık uygulama donanımı (örn: pişirme fırını) gerektirmemeleri; bunun yanı sıra en ekonomik boya seçeneğini oluşturmaları kullanımlarının temel nedenlerini oluşturmaktadır.

Hava kurumalı boyaların büyük bölümü halen, kuruyan alkid reçinesi esaslı ve çözücülü sistemler olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. Ancak, benzer alkid reçineleri içeren sulu sistemlerin de formüle edilmeleri mümkündür. İnsan ve çevre sağlığına ilişkin duyarlılıklara bağlı olarak, son 30 yıl içinde hava kurumalı sulu sistemlerin kullanımı giderek artmaktadır.

2.4.3 Fırında Kuruyarak Sertleşen Kaplamalar

Molekül ağırlıkları birkaç bin dolayında olan "küçük" polimerler, içinde buldukları çözücü buharlaştıktan sonra da tırnakla kolayca çizilebilecek yumuşaklıkta kalan kuru filmler verirler. Dolayısıyla, bu molekül büyüklüğündeki bir termoplastik polimer kullanılarak uygun bir organik kaplama oluşturulamaz. Öte yandan, küçük molekül ağırlıklı polimerlerle hazırlanan yağ boyalar, az miktarda çözücü girilerek uygulama kıvamına (viskozitesine) getirilebilirler. Bu özellik iki açıdan önemli ve yararlıdır. Daha az çözücü, dolayısıyla da daha çok katı madde içeren boya, daha az sayıda kat uygulanarak yani daha kısa sürede

istenen kalınlıkta bir kuru film verebilir; diğer taraftan uygulama sonunda çevreye yayılan çözücü miktarı daha az olacağından çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etki azalır.

Yukarıdaki dezavantajı aşabilmek ve fakat avantajı da saklı tutmak amacıyla, boya bileşimlerinde, küçük ve reaktif polimerlere yer verilir. Söz konusu reaktif gruplar üzerinden yürüyecek "çapraz bağlanma" tepkimesinin başlaması için bir eşik enerjisine ihtiyaç vardır ve tüm kimyasal tepkimelerde olduğu gibi, bu tepkimenin hızı da ortam sıcaklığı yükseldikçe artar. Dolayısıyla bu biçimde hazırlanan boyalar yüzey üzerine uygulandıktan sonra, boyalı nesne ısıtılır. Bu amaçla kullanılan polimerler, "termoset (ısıyla sertleşen) polimerler" olarak; bu polimerler kullanılarak kullanılan kaplamalar da "termoset (ısıyla sertleşen) kaplamalar" olarak anılırlar (McBane,1999).

Termoset kaplamalarla kaplanan nesnelere boya pişirme ya da boya kurutma fırınları olarak anılan fırınlarda 80°C ile 300°C arasında değişebilen sıcaklıklarda, bir dakika ile bir saat arasında değişen sürelerde tutulurlar. Boya pişirme/kurutma fırınları ya mazot, fuel oil gibi bir yakıtın yanmasıyla oluşan yanma gazlarının doğrudan fırına beslenmesiyle (dolaysız ısıtma) ya da bu gazlarla ısıtılan temiz havanın fırına beslenmesiyle (dolaylı ısıtma) sağlanan sıcak hava dolaşımı (Konveksiyon) ile ısıtılırlar. Yanma sonucunda oluşan azot oksitlerin (NO_x), serbest radikal tepkimelerini tetikleyerek, dolaysız ısıtılmayla pişirilen boya filminin yüzeyinde polimerik parçalanma ürünleri oluşturabildiği belirtilmektedir. Film yüzeyine tutunmayan bu parçalanma ürünlerinin bir kalıp ayırıcı gibi davranması sonucunda, astar boyaların dolaysız ısıtılmalı fırınlarda sertleşmesinin ardından uygulanan son katların astar yüzeyine yapışmasında bölgesel zayıflıklar oluşabilmektedir. Kıızıl ötesi (infrared) ışınlarının kullanımıyla da ısıtma sağlamak, uygulanan yöntemler arasındadır.

Isıyla sertleşen kaplamalarda kullanılan reaktif polimerler genellikle iki grup altında toplanırlar: Asıl bağlayıcılar (main binders) ve çapraz bağlayıcılar (crosslinkers). Asıl bağlayıcı olarak, genellikle, reaktif grup olarak hidroksil (-OH) grupları içeren polimerler (kurumayan yağlı alkid, doymuş polyester, akrilik reçineleri gibi) kullanılırlar. Seyrek kullanılanlar arasında, karboksil (-COOH) grupları içeren polimerler (karboksil fonksiyonlu doymuş polyesterler gibi) ve epoksi grupları içeren polimerler (epoksi reçineleri, epoksi modifiye akrilik reçineleri gibi) de sayılabilirler.

En yaygın olarak kullanılan çapraz bağlayıcı sınıfını, metilol (-CH₂OH) ve metiloleter (-CH₂OR) gruplarını içeren formaldehit reçineleri oluştururlar. En fazla kullanılan formaldehit reçinesi türlerini melamin formaldehit (MF) reçineleri oluşturur. MF reçineleri, amino reçineleri içinde en iyi dış dayanımı sağlayan grubu oluşturur. İkinci sık kullanılan

reçine grubu üre formaldehit (UF) reçineleridir. UF reçineleri, en ucuz çapraz bağlayıcıları oluştururlar. Ancak elastikiyet ve su direnci zayıflıkları nedeniyle dış dayanım gerektiren kaplamalarda kullanılmazlar. Üçüncü olarak da alkali ve su direnci yüksekliği nedeniyle fırın astarlarda tercih edilen benzoguanamin formaldehit (BF) reçinelerinden söz edilebilir. BF reçinelerinin ışık dayanımları az olduğundan dış amaçlı son katlarda kullanımları önerilmez.

Yüksek sıcaklıkta sertleşen boya ve verniklerde, yani fırın kurumalı boya ve verniklerde çapraz bağlayıcı olarak, bloklanmış izosiyanat prepolimerleri ve bloklanmış poliamid reçineleri de kullanılmaktadır. Normal olarak oda sıcaklığında da tepkime yatkınlığında olan bu bağlayıcılar, yüksek sıcaklıkta çözülecek bir bloklamayla sadece fırında tepkimeye girecek özelliğe kavuşturulurlar.

Fırında kuruyan kaplamalar, yüksek fiziksel ve kimyasal dayanımın gerekli olduğu, öte yandan da üretim hızının yüksek olmasının önem taşıdığı sektörlerde kullanılırlar. Orijinal otomotiv boya, genel metal sanayi boya, beyaz eşya boya, bobin boya ve metal ambalaj boya, ısıyla sertleşen boya türlerinin başlıcaları olarak sayılabilirler.

2.4.4 İki (veya Daha Çok) Bileşenli Kaplamalar

Boyanacak nesneyi yüksek sıcaklığa maruz bırakmanın mümkün olmadığı uygulamalarda, fırın boya kullanılamaz. Buna rağmen, yine de yüksek dayanımlı kaplama filmleri elde edilmek isteniyorsa, isabetle seçilmiş reaktif kimyasal gruplar üzerinden oda sıcaklığında da polimerleşebilen sistemlerin tercih edilmesi gerekir. Ancak, bu reaktif gruplar boya ambalajı içinde de tepkime verecekleri için her birinin ayrı ambalaj içine alınmaları gerekli olur. Bu amaçla, genellikle en kritik iki reaktif bağlayıcıyı ayırmak gibi uygulamalara başvurulur. Böylece oluşan kaplama sistemleri de "iki bileşenli sistemler" olarak anılırlar. Daha seyrek olmak üzere, üç bileşenli sistemler de kullanılmaktadır (McBane,1999).

İki bileşenli sistemlerde en fazla kullanılan bağlayıcı türleri şöyle sıralanabilirler:

- a. Hidroksil (-OH) ile izosiyanat (-NCO) grupları üzerinden üretilen (-NH-CO-O-) bağları oluşmasıyla dayanıklı filmler veren alkid poliüretan, polyester poliüretan ve akrilik poliüretan kaplamalar.
- b. Epoksi (-OH) grupları ile amin (-NH₂) grupları üzerinden polimerleşen epoksi poliamid kaplamalar.

İki bileşenli kaplamalar oda sıcaklığında sertleştikleri gibi, boyanan nesnenin dayanabileceği düşük sıcaklıklı (60°C ile 80°C gibi sıcaklıkların 30-60 dakika süreyle uygulandığı) fırınlarda da sertleştirilirler.

2.4.5 Işıma İle Sertleşen Kaplamalar

Işımayla sertleştirilen kaplamalarda, film oluşturacak olan malzemeler ışımaya (radyasyon) enerjisi yardımıyla tepkimeye girerek film oluştururlar. Işımayla sertleştirilen kaplamaları aşağıdaki biçimde sınıflandırmak mümkündür (McBane,1999):

a. UV ile sertleştirilen kaplamalar: Bu kaplamalarda mor ötesi (UV) bölgesinde ışımaya veren lambalar yardımıyla, bazı bağlayıcı tipleri kullanılarak serbest radikal polimerleşmesi yoluyla; bazı bağlayıcılar kullanılarak da katyonik polimerleşme yoluyla sert ve dayanıklı filmler elde edilirler. UV ile sertleşen kaplamalarda kullanılan UV enerjisi, serbest radikal polimerleşmesine veya katyonik polimerleşmeye yol açan fotobaşlatıcıların (photo initiators) aktiflenmelerini sağlar.

b. Elektron ışını (electron beam, EB) ile sertleştirilen kaplamalar: EB'yle sertleştirilen kaplamalarda elektron ışını, bağlayıcıyı önce iyonlaştırır ve aktif hale getirir. Bu Kapamalarda da bir miktar fotobaşlatıcı kullanılır. Aktif hale gelen iyonlaşmış bağlayıcılar, fotobaşlatıcının da etkisiyle oluşan katyonik serbest radikaller üzerinde çapraz bağlanmaya uğrarlar. Her türlü pigmentli sistemin de sertleştirilmesinin mümkün olması, EB tekniğinin üstünlüğünü oluşturmaktadır. Ancak başka bazı teknik engeller, yöntemin yaygınlaşmasını önlemektedir.

Işımayla sertleştirilen kaplamalarda, çapraz bağlanmaya uğramak üzere oligomer adı verilen molekül ağırlıkları birkaç yüz ile birkaç bin arasında değişen organik yapı taşları ve daha da küçük moleküllu olan monomerler kullanılırlar. Dolayısıyla, bu yaş boya ve vernikleri uygulama kıvamına getirmek için ayrıca çözücü ve inceltici kullanmaya gerek duyulmaz.

UV'yle sertleştirilen kaplama formüllerinde, bağlayıcı olarak stiren içindeki doymamış polyester reçineleri, akrilat oligomerleri, epoksi reçineleri ve daha az olmak üzere de vinil eterler; EB'yle sertleşen kaplamalardaysa, en çok akrilik oligomerler kullanılmaktadır.

2.4.6 Nemle Sertleşen Kaplamalar

Boya bileşiminde yer alan ve reaktif gruplar içeren bağlayıcıların yüzeye uygulanmalarından sonra, kimyasal tepkimelere girerek sert bir film oluşturmalarının örnekleri geride kalan üç

kısımda ele alınmıştı. Ayrıca, hava oksijeniyle tepkimeye girerek sertleşen kaplamalardan söz edilmişti. Benzer biçimde, havanın nemiyle polimerleşme tepkimesi veren bağlayıcılar kullanılarak tasarlanan organik kaplamalar da, daha seyrek de olsa, kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan nemle sertleşen iki kaplama türü aşağıda ele alınmıştır (McBane,1999).

Nemle sertleşen poliüretan kaplamalar, üzerinde izosiyanat grupları bulunan bağlayıcılar kullanılarak, tek bileşenden oluşacak biçimde üretilirler. Boya, yüzeye uygulandığında aktif izosiyanat gruplarının havanın nemiyle tepkimeye girip polimerleşmesi sonucu sert ve dayanıklı bir film oluşur. Nemle sertleşen poliüretan kaplamalar özellikle yüksek su ve korozyon direnci gerektiren ortamlar için önerilmektedirler. Kuruma ve sertleşme süreci, ortam nemi yükseldikçe hızlanır. Öte yandan, sertleşme sürecinde gerçekleşen gaz çıkışının, özellikle 50 mikrondan daha yüksek film kalınlıklarında pinhol riski yaratması olasılığı dikkate alınmalıdır. Bu konudaki önleyici etkinlik, kaplamanın tasarımı sırasında tepkime hızını denetleyecek önlemlerin alınmasıyla sağlanabilir.

Nemle sertleşen epoksi kaplamalar, epoksi reçinelerinin ve ketimin reçinelerinin, suyun veya nemin mevcut olduğu ortamlarda sertleşirler. Epoksi ve ketimin, nemin olmadığı ortamlarda tepkimeye girmemelerine rağmen, pigment, dolgu, çözücü gibi boya girdilerinden gelebilecek az miktardaki suyun raf ömrünü kısaltma riski dikkate alınarak, nemle sertleşen epoksi esaslı kaplamaları iki ayrı bileşen halinde ambalajlama yolu tercih edilmektedir. Bu durumda birinci ambalajı, tipik bir epoksi esaslı boya veya vernik, ikinci bileşeni de ketimin esaslı sertleştirici oluştururlar. Epoksi-ketimin esaslı kaplamaların sertleşme hızları ortam neminden bir miktar etkilenirler. Bu tür kaplamalar, yüksek hava neminin veya nemli yüzeylerin söz konusu olduğu ağır hizmet boyası gerektiren durumlarda çelik ve beton yüzeylere başarıyla uygulanırlar. Öte yandan birinci bileşende sıvı epoksi reçineleri kullanılıp çözücülere yer verilmez ve ikinci bileşen de çözücü içermeden formüle edilirse, su altında sıvamayla uygulanabilen pas önleyici, beton koruyucu özel boyaların da hazırlanması mümkün olabilmektedir.

2.4.7 Kaynaşma İle Sertleşen Kaplamalar

Bağlayıcı küreciklerinin, çözücü olmayan sıvı ortamında (ki bu çoğunlukla sudur) kararlı asıltılar halinde olduğu emülsiyonların kullanıldığı kaplamalarda, film oluşumu bu parçacıkların birbirleriyle kaynaşarak sert bir kuru film meydana getirmeleriyle sağlanır.

Bunun için öncelikle, bağlayıcı moleküllerini içeren küreciklerin birbirleriyle temas yakınlığında olmaları gerekir. Boya yüzeye uygulandıktan sonra, suyun önemli bir kısmının buharlaşmasına bağlı olarak oluşan hacim azalması, küreciklerin temas edecek kadar yakınlaşmalarını sağlar. Ancak, temas haline gelen polimer parçacıklarının kaynaşarak sürekli bir film oluşturmaları için de yeterince akışkan durumda olmaları gereklidir. Bu da ortam sıcaklığının, küreciklerin camsı geçiş sıcaklığından (T_g) daha yüksek olmasıyla mümkündür. Oysa oluşacak filmin, aynı ortam sıcaklığında yeterince sert ve istiflenmeyle yapışmayacak nitelikte olması da gereklidir. Bunun sağlanabilmesi için ise, oluşacak kuru filmin camsı geçiş sıcaklığının ortam sıcaklığından 20°C 'den daha yüksek olması gerekmektedir. Boya formüllerinde, suyla karışabilen ve sudan daha geç buharlaşan glikol sınıfından organik çözücülere %5–15 arası oranlarda yer verilerek bu sorunlar aşılabilmektedir. Kaynaşma yoluyla sertleşen kaplamalarda en yaygın olarak, vinil polimerleri ve akrilik polimerler kullanılmaktadır. Seçilen polimerler, genellikle 60°C 'nin üzerinde camsı geçiş sıcaklıklarına sahip büyük polimerler olmakta ve reaktif gruplar içermemektedirler (McBane,1999).

2.5 Organik Kaplamaların Uygulanma Teknikleri

Sıvı bir karışım olarak üretilip satılan sıvı organik kaplamalar, ince bir kuru filme dönüşerek uygulanma yüzeyi üzerinde görev yaparlar. Kuru filmin kusursuz oluşabilmesi, estetik beklentilerin, koruma beklentilerinin ve ekonomik beklentilerin karşılanması; insan sağlığı, çevre sağlığı ve iş yeri güvenliğinin risk altında olmaması açılarından, anılan değişik uygulama süreç ve teknikleri vardır (Goldschmidt ve Streitberger, 2003).

2.5.1 Fırça ve Rulo Uygulamaları

Fırça ve rulo kullanımına, en yaygın olarak inşaat boyalarında ve şantiye ortamında yapılan sanayi boyası uygulamalarında başvurulur.

Boya fırçaları naylon (sulu boyalar için), polyester (gerek sulu gerekse çözücülü boyalar için) ve hayvan kılı (çözücülü boyalar için) liflerinden yapılırlar. Kullanılan liflerin uçlarının, fırçanın uç kısmında daha çok boya tutulabilmesi için saçaklı olmaları önemlidir. Fırça uygulamalarında, uygulamanın hemen ardından fırça izleri oluşur. Boyanın, bu izler yayılıp kayboluncaya kadar yaş kalması önemlidir. Bu açıdan hem boya viskozitesinin uygun bir aralıkta olması ($25-75/\text{D4}/20^\circ\text{C}$ aralığında) hem de uygulama tinerinin çok uçucu olmaması önemlidir. Uygulamaya başlandığındaki viskozite (yani kıvam) çok yüksek

olursa, fırça izlerinin yayılarak kaybolması için gereken süre geçmeden uygulanan yaş film, yayılmayı engelleyecek ölçüde kıvam artışına uğrayacaktır. Öte yandan uygulama viskozitesi fazla düşük olursa, akma izlerinin kaybolması süresince oluşan kıvam artışı yayılmayı engelleyecek düzeye yükselmeyeceği gibi boyanın yer çekimi etkisinde akmasına da yol açabilecektir. Bu nedenle, uygulamalar, iki uç durumda oluşan iki kusurun da oluşmasına yol açmayacak uygulama viskozitelerinde yapılmalıdır.

Rulo uygulamaları hızlı iş yapma açısından tercih edilir. Uygulama viskozitesi aralığı fırça uygulamasındaki değerlerde olmalıdır. Ruloların dönen ana silindirleri genellikle elyaf takviyeli plastiklerden ya da metalden yapılırlar. Dış kısmında yer alan tüyler ise polyesterden, naylondan, moherden ya da kuzu yününden olabilirler. Lif boyları 5 mm ile 20 mm arasında olurlar. Rulo ile uygulama, en az teknik beceri gerektiren uygulama yöntemidir.

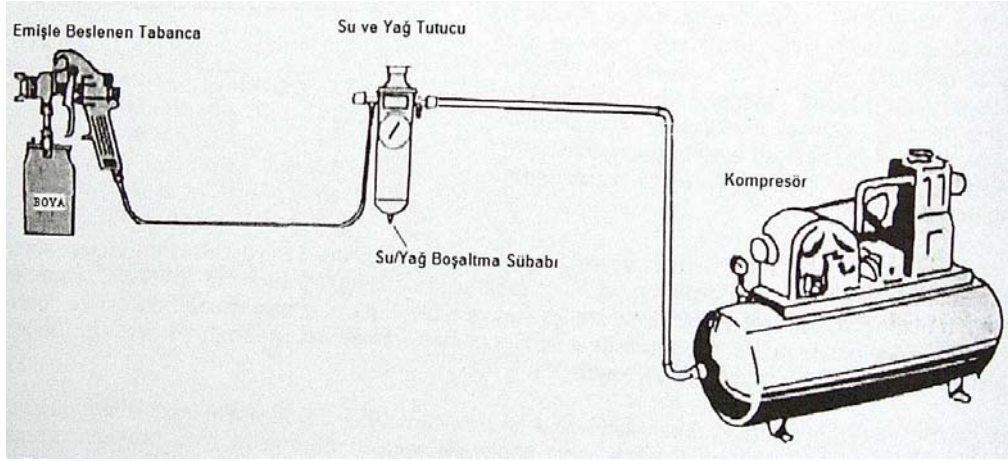
2.5.2 Püskürtme Uygulamaları

Boyanın küçük damlacıklar halinde atomize edilecek biçimde püskürtülerek (sprey) uygulanmasıyla düzgün bir kalınlık dağılımına sahip olan ve iyi yayılan yüzeylerin elde edilmesi, bu yöntemin sanayi boyası uygulamalarında çeşitlenip yaygınlaşmasına yol açmıştır.

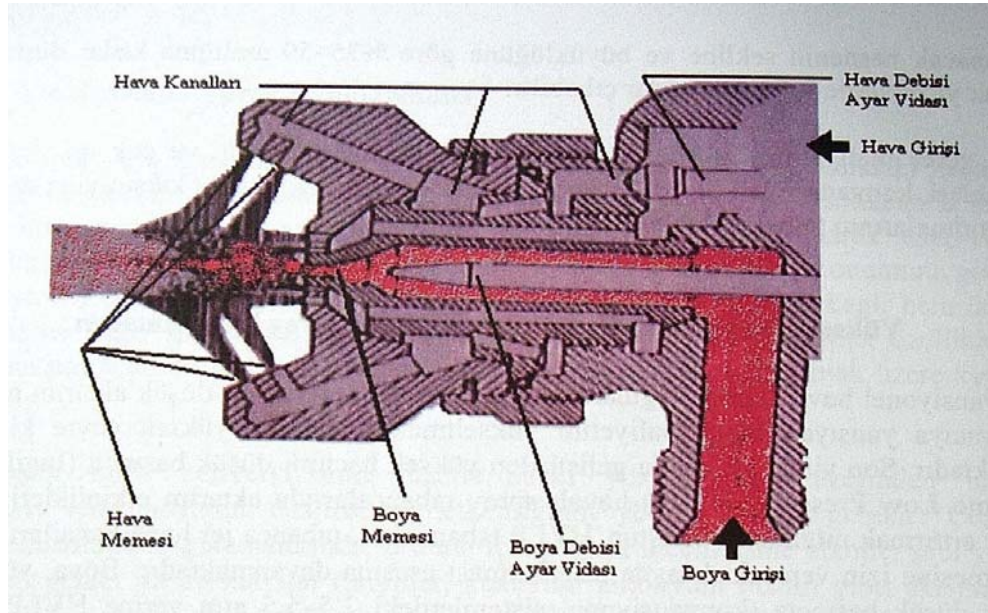
2.5.2.1 Konvansiyonel Havalı Püskürtme Uygulamaları

Bu uygulamalar, sıvı boyanın 2,5-5,5 atm basınçtaki hava kullanılarak havalı püskürtme tabancaları aracılığıyla dar tabanca memesinden çok düşük damlacıklar halinde püskürtülmesi esasına dayanır. Tabancaya boya beslemesi ya düşük bir basınçla (0,1-0,5 atm) itme sağlanarak ya tabancanın üzerine takılan bir hazneden yer çekimi etkisiyle ya da tabanca altına takılan bir hazneden emiş etkisiyle yapılır. Hava ise bir kompresör yardımıyla basınçlandırılır. Hava basınçlandırılınca içerdiği nem yoğuşabileceği için, ayrıca kompresör yağının havaya karışması olası olduğundan, kompresörle tabanca arasına "su ve yağ tutucu" takılır. Tipik bir devre, Şekil 2.2 'deki gibi olur.

Havalı püskürtme tabancalarına beslenen boya, tabanca içindeki kanallardan geçerek tabancanın ucundaki boya memesine (nozzle) ulaşır. Vida başı tabancasının arka kısmında olan iğne uçlu bir vida, memeden püskürtülecek boyanın debisini ayarlar. Benzer biçimde bir başka ayar vidası da hava kanallarına beslenen hava miktarını ayarlama kullanılır. Tipik bir havalı püskürtme tabancasının kesit görünümü Şekil 2.3 'te görülmektedir.



Şekil 2.2 Bir havallı püskürtme devresinin temel elemanlarının görünümü (Paksoy, 1999)



Şekil 2.3 Tipik bir havallı püskürtme tabancasının kesit görünümü (Paksoy, 1999)

Boyanın, atomizasyon da denilen çok küçük damlacıklara parçalanması, aşağıdaki değişkenlere bağlı olarak belirlenir:

- Boyanın uygulama viskozitesi (boya viskozitesi arttıkça damlalar irileşir)
- Meme deliğinin çapı (meme deliğinin çapı küçüldükçe damlalar küçülür)
- Boya basıncının hava basıncına oranı (bu oran küçüldükçe damlalar küçülür)
- Boyayı meme deliğine sürükleyen boya basıncı (boya basıncı/hava basıncı oranının sabit kalması koşuluyla, boya basıncı arttıkça damlalar küçülür)
- Boyanın yüzey gerilimi (yüzey gerilimi düştükçe damlacıklar küçülür)

İyi bir atomizasyondan kastedilen, damlacıkların olabildiğince küçülmesidir. Havallı püskürtme uygulamalarında 20 mikrometre ile 50 mikrometre arasında damlacık çaplarına

erişilebilir (yani 50 ile 20 adet damlacık yan yana konulduğunda, çaplarının toplamı ancak 1 milimetreye ulaşır). Bu, çok iyi bir boya yayılmasına olanak sağlayan bir atomizasyondur. Bu noktada, istisnai bir uygulama olarak pürüzlü boya (structured paint) uygulamasından söz edilebilir. Pürüzlü boya uygulamalarında, hava basıncı azaltılıp büyük çaplı püskürtme memeleri seçilerek boyanın iri damlacıklar halinde püskürtülmesi sonucunda iyi yayılmayan, girintili çıkıntılı bir pürüzlü yüzey elde edilmesi hedeflenir. Bazı makinelerin ve oto bagaj içlerinin bu görünüme sahip olacak biçimde boyanması özellikle tercih edilir.

Havalı püskürtme uygulamalarında, 1 hacim boya için yaklaşık 600 hacim hava kullanılır. Dolayısıyla püskürtülen malzeme, içinde çok miktarda hava bulunan bir boya-hava karışımıdır. Karışım içinde havanın bu derece fazla olması iki önemli sonuca yol açar:

1. Havalı püskürtmelerde malzeme, sınırları belirsiz bir bulut halinde hedefe doğru gider;
2. Yüzeye yaklaşan sıvı damlacıklarıyla yüzey arasında bir hava yastığı oluşur; dolayısıyla damlacıkların önemli bir kısmı bu esnek yastığa çarpıp geriye sıçrama eğiliminde olurlar. Buna "geri sıçrama etkisi" adı verilir.

Bu iki nedenden ötürü havalı püskürtme uygulamalarında kayıplar çoktur, başka bir deyişle de "aktarım etkinliği"([Yüzeye ulaşan boya miktarı/püskürtülen toplam boya miktarı] x 100) düşüktür. Havalı püskürtme uygulamalarında, boyanacak nesnenin şekline ve büyüklüğüne göre %25–50 aralığına kadar düşen bu değer büyük yüzeylerde %70'lere kadar çıkabilir.

Araç gereç maliyetinin görece düşük oluşu, uygulama pratikliği ve çok iyi yayılan filmler vermeleri, konvansiyonel havalı tabancaların kayıpların fazlalığına karşın yinede çok yaygın kullanılmalarının temel nedenlerindedir.

2.5.2.2 Yüksek Hacimli Düşük Basınçlı Püskürtme Uygulamaları

Konvansiyonel havalı püskürtme uygulamalarındaki temel sorun olan düşük aktarım etkinliği hem kullanıcıya yansıyan boya maliyetini yükseltmekte hem de yüksek çevre kirliliğine yol açmaktadır. Son 20 yıl içinde geliştirilen yüksek hacimli düşük basınçlı (high volume low pressure) havalı püskürtme tabancalarıyla aktarım etkinliklerini iki katına kadar arttırmak mümkün olmuştur. HVLP tabancaları, tabanca içi hava kanallarının bol hava beslemesine izin verecek detayda tasarlanması esasına dayanmaktadır. Boya, yüksek debide ancak düşük basınçta (konvansiyonel sistemlerdeki 2,5–5,5 atm yerine HVLP sistemlerde 0,2–0,7 atm) hava ile püskürtülmektedir. Düşük hava basıncının geri sıçrama etkisini çok azaltması,

aktarım etkinliğinin artmasına yol açmaktadır. HVLP sistemlerinin kullanım yaygınlığı, başta oto tamir boyaları olmak üzere giderek artmaktadır. HVLP uygulamalarında, konvansiyonel uygulamalarda elde edilene yakın bir atomizasyon ve yayılma kalitesi sağlanabilmektedir.

Bir diğer yaklaşım olarak denenen Düşük Hacimli ve Düşük Basıncılı (low volume low pressure) hava tabancalarında ise yine 0,7 atm'den düşük basınçta hava kullanılarak, hava ile boyanın tabanca içinde karışmasıyla atomizasyonunun daha az miktarda hava kullanılarak yapılması hedeflenmektedir.

2.5.2.3 Havasız Püskürtme Uygulamaları

Havasız püskürtme uygulamalarında, boya 5 atm ile 35 atm arasında basınçlandırılarak havasız püskürtme tabancasının memesinden püskürtülür. Memeden ince bir perde halinde ve yüksek hızla çıkan boya huzmesi tabancanın dışındaki durgun hava moleküllerine çarptıkça yırtılıp damlacıklara dönüşür. Boya çıkış hızı ve boya basıncı arttıkça; buna karşın boya viskozitesi ve boyanın yüzey gerilimi azaldıkça damlacıklar küçülür. Ancak, havasız püskürtme uygulamalarında, havalı uygulamaların atomizasyon kalitesine erişilemez (havalı püskürtme uygulamalarında 70–150 mikrometre aralığındaki damlacık çaplarına karşılık, havasız uygulamalarda 70–150 mikrometre aralığının altındaki damlacık çaplarına inilememektedir). Öte yandan, havalı uygulamadaki boya huzmesinin merkezinden kenarlarına doğru gidildikçe boya damlacıklarının giderek azalması uygulamalar sırasında yumuşak geçişlere olanak vermekte, dolayısıyla homojen kalınlıkta uygulamalar yapmak kolaylaşmaktadır. Havasız püskürtme huzmeleri ise, hava içermedikleri için bu olanak yoktur. Havasız püskürtme uygulamalarıyla homojen kalınlık uygulamak daha zordur.

Havasız püskürtme uygulamalarında, boya yüzeye daha yaş düşeceği için hem boya formülü içindeki çözücülerin seçiminde hem de uygulama incelticisinin seçiminde daha hızlı buharlaşan türler kullanılmalıdır.

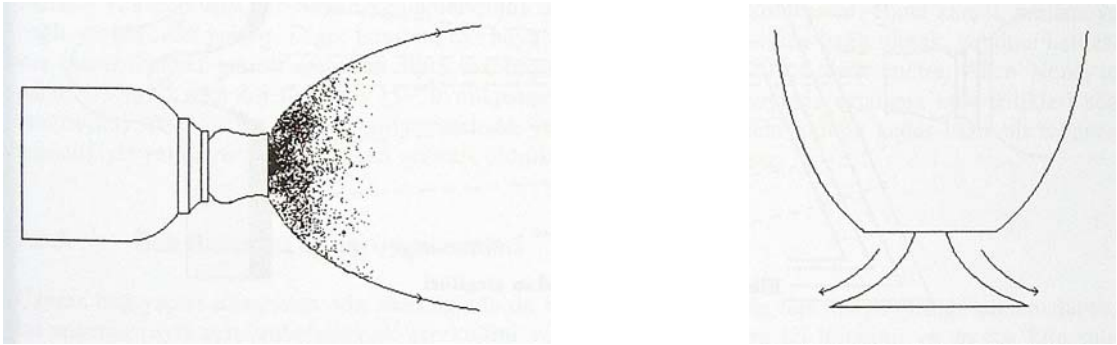
2.5.2.4 Elektrostatik Püskürtme Uygulamaları

Elektrostatik püskürtme uygulamalarında, boyanın püskürtüldüğü noktanın civarındaki hava 50-125 kV elektrik gerilimi uygulanarak iyonlaştırılır. Havanın iyonlaşması sonucunda serbest kalan elektronlar, bu bölgeden geçen boya zerreciklerinin yüzeylerine tutunarak onları eksi (-) yüklerle yüklerler. Öte yandan, boyanacak nesne topraklanarak artı (+) uç konumuna getirilir. Yüzeyin boya zerreciklerine uyguladığı elektriksel çekim hem serpintiye bağlı hem de geri sıçrama etkisine bağlı püskürtme kayıplarını büyük ölçüde azaltır. Bu yöntemle,

özellikle çok püskürtme kaybına yol açan boru, profil ve bazı nesnelere, arka yüzleri de dahil olmak üzere kayıpsız boyanabilirler.

Yüze ulaşan boya zerreciklerinin, üzerlerindeki yükü yüzey üzerinden toprağa aktarabilmeleri için boyanın elektriksel iletkenliğinin yeterli olması gerekir. Çözücülü boyaların elektrostatik uygulamalarında, ürünün içine ya da incelticisine alkol gibi yüksek iletkenlikli çözücüler ya da katkıları (aminler, kuaterner amonyum tuzları gibi) eklenir. Yaş boya iletkenliği için uygun olan en geniş aralık 0,05-20 MΩ arasındadır. Ancak, uygulamaların pek çoğu için 0,5-5 MΩ arasında bir iletkenlik tercih edilir.

Elektrostatik püskürtme uygulamalarında, itici olarak havanın kullanıldığı püskürtme tabancaları yaygın olarak kullanılır. Bu uygulamalarda hem havalı püskürtmenin yayılma düzeyi elde edilir hem de püskürtme kayıpları en alt düzeye indirgenir. Elektrostatik püskürtme uygulamalarında, boyanın merkezkaç kuvveti etkisiyle çok küçük damlacıklara parçalandığı disk ya da çan biçimli, döner başlıklı uygulama araçları da kullanılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Elektrostatik püskürtme uygulamalarında kullanılan araçlar (Paksoy, 1999)

Döner disklerde dakikada 1000 devir (1000 d/d) ve üzerinde dönme hızları uygulanması olağandır. Çok yüksek devirli çanlarda ise 25000 d/d ile 60000 d/d arası dönme hızları uygulanır. Bu ölçüde yüksek devirlerde uygulanan boyalarda parlaklık düşüklüğü sorunlarıyla karşılaşılması olasıdır. Dolayısıyla, yüksek devrin yol açabileceği matlaşma eğilimine karşı önlemlerin, boyanın tasarımı sırasında alınması gerekir.

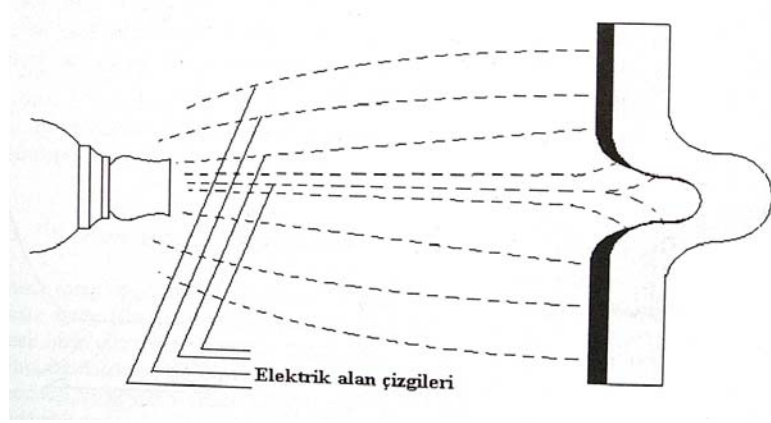
Bir miktar organik çözücü girişiyle ve uygulama donanımı üzerinde uygun elektriksel yalıtımların yapılmasıyla sulu boyaların da elektrostatik yöntemle uygulanmaları mümkün olmaktadır.

Öte yandan kendisi iletken olmayan plastik, ahşap gibi yüzeylere önce ince bir kat iletken astar, normal havalı püskürtme yöntemiyle uygulanarak yüzeyler iletken hale getirilebilirler. Daha sonraki kaplama katları elektrostatik püskürtme yöntemiyle yapılabilir.

Gerek tabanca ile gerekse döner disk ya da çanlarla yapılan elektrostatik püskürtme uygulamalarıyla hem püskürtme kayıpları azaltılabilmekte hem de son derece iyi yayılmış boya yüzeyleri elde edilebilmektedir. Buna karşın, bu yöntemin de bazı dezavantajları vardır.

Özellikle yüzey üzerindeki girintili kısımlar "Faraday Kafesi Etkisi" nedeniyle yeterince boya alamayabilirler. (Şekil 2.5)

İkinci olası sorun kaynağı yangın riskidir. Çözücülü boyalarda kullanılan çözücülerin önemli bir kısmı oda sıcaklığında ve altındaki sıcaklıklarda parlayıcı olabilir. Elektrostatik uygulamalarda, uygulanan gerilim dolayısıyla oluşabilecek kıvılcımlar bu çözücülerin parlamasına neden olabilir. Yangın riskini azaltmak için, inceltmiş boyanın parlama noktasının 26°C ve üzerinde olacak şekilde ayarlanması gereklidir.



Şekil 2.5 Gerilim farkına bağlı olarak çan (veya disk yada tabanca) ile yüzey arasında oluşan elektrik alan çizgilerinin şematik olarak gösterimi (Paksoy, 1999)

Son olarak, toz boyaların elektrostatik yöntemle uygulanmalarına da, havayla karıştırılarak akışkanlaştırılan toz boya, ucunda bir meme bulunan tüp biçimindeki toz boya tabancasından püskürtülür. Memeye yerleştirilen bir eksi (-) elektroda 40-100 kV civarı yüksek gerilim uygulanır. Eksi elektrot, hava moleküllerini iyonlaştırır. Oluşan bu iyon bulutu, "korona" olarak adlandırılır. Oluşan eksi yüklü iyonların bir bölümü toz boya parçacıklarının yüzeylerine tutunarak onları eksi yüklerle yüklerler. Topraklama yoluyla artı (+) elektrot konumuna geçen boyanacak nesne bu toz parçacıklarını kendine çeker. Yüzeyle ulaşan toz boya zerrecikleri yüzeyle temas sonucu yüksüzleşirler. Dolayısıyla, yüzeydeki kaplama kalınlığı arttıkça elektriksiz çekim etkisi azalır. Yüzeyle iyi tutunamayıp dökülen toz boya zerrecikleri bir toplama kabini içinde biriktirilip geri kazanılırlar. Yüzeyle tutunan zerreciklerle birlikte boyanan nesne fırına sokulur, toz boya zerrecikleri eriyip akışkanlaşıp yüzeye düzgün biçimde yayılırlar. Eğer uygulanan toz boya termoplastik karakterli ise, fırın

çıkışında soğuyunca sert bir film oluşturur. Eğer kimyasal olarak sertleşen yani termoset karakterli ise içerdiği bağlayıcılar yüksek sıcaklıkta birbirleriyle tepkimeye girerek sert bir film oluştururlar.

2.5.2.5 İkili Beslemeli Püskürtme Uygulamaları

Çapraz bağ yapıcı unsurların oda sıcaklığında da birbiriyle tepkimeye girdiği kaplamalarda, bu tip kaplamaların bileşenlerini birbirine karıştırıp normal püskürtme tabancalarıyla uygulamak mümkündür. Ancak, bileşenler çok süratle tepkimeye giriyorsa haznedeki boya, uygulama sırasında jel olup hem malzeme kaybına hem de püskürtme cihazının hasarlanmasına yol açabilir.

Ya da boya henüz jel olmasa da viskozitesinin giderek artması, elde edilecek film özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, bileşenlerin tabancanın girişindeki küçük bir karışma haznesine kadar ayrı hatlardan geldikleri püskürtme tabancaları yapılmıştır. Bu tür tabancalarda uygulamaya ara verildiğinde, hazneyi, hazneyle tabanca arasındaki boruları ve tabancayı otomatik olarak boşaltıp yıkayan bir mekanizma çalışır. Bu tür tabancalar, sınırlı da olsa iki bileşenli poliüretan ve epoksi vd. boyaların uygulanmasında kullanılırlar.

2.5.2.6 Sıcak Püskürtme Uygulamaları

Bir akışkanın sıcaklığı yükseldikçe, viskozitesi düşer. Bu genel özellikten yola çıkılarak, püskürtme uygulamaları 40°C ile 65°C arasına ısıtılmış boyalarla da yapılabilir. Böylece, daha az miktarda inceltici kullanılarak uygulama viskozitesine ulaşılabileceği için hem atmosfere çözücü yayımı sınırlanmış olur hem de daha az kat uygulayarak kalın kaplama filmleri elde edilebilir. Ayrıca, uygulanan yüzeylerin sıcaklığının boya sıcaklığından düşük olması nedeniyle, boya yüzeye çarptıktan sonra soğur, viskozitesi yükselir, buna bağlı olarak da akma riskleri azalır.

Buna karşın bir ısıtma düzeneğinin gerekli olması ve ısıtmanın parlama, yangın risklerine yol açmayacak yöntemlerle yapılmasının gerekli olması, sıcak püskürtme uygulamalarının çok sınırlı yapılmasına yol açan etkenlerdir.

2.5.2.7 Sıvılaştırılmış Karbon Dioksitle Püskürtme Uygulamaları

Yüksek basınç altında süper kritik hale getirilip sıvılaştırılan karbondioksit (CO₂), sıvı organik kaplama malzemesini bir organik çözücü gibi çözer. Bu amaçla özel havasız püskürtme tabancaları kullanılır. Boya + CO₂ karışımı tabancayı terk eder terk etmez, CO₂

şiddetli bir kaynamayla gaz haline döner ve atmosfere yayılır. Bu yayılma bir atmosfer kirliliğine yol açmadığı için sorun yaratmaz. Öte yandan, CO₂'nin şiddetle kaynarak boya + CO₂ karışımını terk etmesi aynı zamanda etkin bir atomizasyona yol açar. Dolayısıyla, havasız tabancayla yapılmasına karşın uygulamayla elde edilen yüzey kalitesi havalı püskürtmeyle elde edilen düzeyde olur. Uygulamanın havasız yapıyor olması, havalı yüzeylerde görülen geri sıçrama etkisini de ortadan kaldırdığından, elde edilen aktarım etkinliği havasız uygulamalarda elde edilene yakın olur. Ayrıca, CO₂ boyayı hızla terk ettiği için, tabancadan yüzeye ulaşan boyanın viskozitesi hızla yükselir, dolayısıyla akma, sarkma gibi boya kusurlarıyla karşılaşılma riskleri minimum düzeyde kalır. Sonuç olarak, sıvılaştırılmış CO₂ ile yapılan havasız püskürtme uygulamalarında, çeşitli püskürtme uygulamalarında elde edilen olumlu özelliklerin tümünü bir araya getirmek mümkün olur. Sorun, sıvılaştırılmış CO₂'nin ve uygulama cihazının maliyetidir.

2.5.2.8 Robotik Uygulamalar

Gerek tabancayla, gerekse çan ya da disklerle yapılan püskürtme uygulamaları, bu cihazların bilgisayar kumandasında hareket eden mekanik aygıtlara monte edilmeleriyle robotik olarak da yapılmaktadırlar. Seri üretim hızının çok yüksek olduğu "orijinal cihaz üretimi" tesislerinde robotik uygulamalar yaygın olarak yapılmaktadırlar

2.5.3 Daldırma ve Akıtma Uygulamaları

Daldırma uygulamalarında boyanacak nesne, uygulama viskozitesine inceltilmiş yaş boya kabına daldırılıp çıkarılarak kaplanır. Bazı uygulama değişkenleri, aşağıda belirtilen etkilere yol açar (Goldschmidt ve Streitberger, 2003):

- Boya viskozitesinin artırılması, akma ve çökme dirençlerinin ve film kalınlığının artmasına;
- Çözücülerin buharlaşma hızının artması, film kalınlığının ve akma direncinin artmasına;
- Nesnenin daldırma kabından çıkarılma hızının yavaşlatılması da film kalınlığının artmasına ve akma direncinin yükselmesine.

Çökmenin denetlenmesi için ayrıca, boya formülü içinde çökme önleyicilerle yapılacak ayarlamalara ve uygulama kabı içindeki boyanın bir karıştırıcı yardımıyla ya da dipten hava kabarcıkları verilerek homojenliğinin sağlanmasına da başvurulur.

Daldırma uygulamaları, kullanan işletmenin ihtiyaçlarına göre varil gibi basit bir kap içinde olduğu gibi, özel olarak tasarlanmış büyük daldırma kazanlarında da yapılır. Özellikle büyük kazanlarda karıştırma veya hava kabarcıklarıyla çökme önleme mutlaka yapılmalıdır. Bu durumda köpük oluşumu riski gündeme gelebilir. Köpüğün kaplanan boya yüzeyini tahrip etmemesi için boya formülü içinde önlemler alınması gerektiği gibi daldırma kazanı tasarımında da dikkate alınacak ayrıntılar vardır.

Seri üretilen nesnelerin daldırmayla boyanması uygulamalarında hem düşey doğrultuda bir miktar kalınlık farkı hem de dipte damla sarkması gözlemlenebilir. Sarkan damlalar ya boya fırına girmeden önce eşyanın alt kısmı çözücü emdirilmiş bir bezle silinerek ya da fırın çıkışında bıçakla kesilerek giderilirler. Çözücülü boyaların daldırma uygulamalarında karşılaşılan önemli bir sorun da, daldırma kazanı yüzeyinden yoğun biçimde yükselen çözücü buharlarının yol açtığı yangın riskidir. Bu riskin ortadan kaldırılması için en uygun seçenek sulu boyaların kullanılmasıdır. Bu nedenle, sanayi boyalan alanında sulu boyaların en yaygın uygulanmaları daldırmayla boyama yapılan tesislerde oluşmaktadır.

Akıtma uygulamaları, daldırma uygulamalarına çok benzeyen bir yöntemle yapılır. Daldırılmayacak kadar büyük nesnelerin boyanmasında akıtma yöntemine başvurulur. Bir hortumla nesne üzerine akıtılan boyanın fazlası dip havuzunda toplanıp pompayla tekrar basılır. Akıtmayla boya uygulamalarında, düşey doğrultuda kalınlık farkı daldırma uygulamalarındakinden daha az şiddette gözlenir. Buna karşın, boyanan eşyanın geometrisine ve akıtma hızına bağlı olarak yüzeyde köpük oluşması yatkınlığı olabilir

2.5.4 Elektroforetik Uygulamalar

Elektroforetik uygulamalar da daldırma tanklarında gerçekleştirilirler. Ancak bu kez, boyanın yüzeyde toplanmasında ve yüzeye tutunmasında elektriksel çekim kuvvetleri etkili olurlar.

Elektroforetik kaplamalarda, boyanacak nesne bir elektrik devresine katot ya da anot olarak bağlanır ve devreye akım verilir. Bu arada, daldırma tankında %80-90 oranında deiyonize su, az miktarda glikol ve % 10-20 oranında pozitif ya da negatif elektrik yükü taşıyan boya asıltıları (emülsiyonları) bulunmaktadır. Uygulanan elektriksel gerilimin etkisiyle bir yandan pozitif ya da negatif yüklü boya asıltıları katot ya da anot konumundaki boyanacak nesneye doğru hareketlenirler (bu olguya "elektroforez" adı verilir). Öte yandan da, su elektrolize uğrar (yani H^+ ve OH^- 'e ayrışır). Boyanacak nesnenin yüzeyine gelen yüklü boya asıltıları, suyun elektroliz ürünleriyle etkileşerek boyanacak nesnenin yüzeyinde yüksüzleşir ve çok

sağlam bir şekilde tutunur. Daha sonra durulanan nesne, yüksek sıcaklıktaki boya fırınına girer (160°C-180°C) ve bu sıcaklıkta, kaplamanın sert ve dayanıklı film vermesi için çapraz bağlanma tepkimeleri gerçekleşir.

Boyanacak eşyanın devreye anot olarak bağlanması durumunda, oluşan sürece "anaforez", elde edilen kaplamaya "anoforetik elektro kaplama" veya "anodik elektro kaplama" (AED) adı verilir. Boyanacak eşya elektrik devresinin katodu haline getirilirse, oluşan sürece "kataforez", elde edilen kaplamaya ise "kataforetik elektro kaplama" veya "katodik elektro kaplama" (CED) denilir.

Elektroforetik yöntemle her tür bağlayıcı içeren kaplamaları uygulamak mümkün değildir. Uygun miktarda suda çözünen grup içerebilen ve su içinde kararlı asıtlılar (emülsiyon) oluşturan bağlayıcılarla yapılan kaplamalar kullanılır. Anaforetik uygulamalarda epoksi ester esaslı veya akrilik esaslı kaplamalar; kataforetik uygulamalarda ise epoksi-izosiyanat veya akrilik-izosiyanat kaplamalar kullanılmaktadır.

Anaforetik uygulamalarda, aynı tür bağlayıcının normal daldırma uygulamalarında elde edilen korozyon direncinin iki ile üç kat üzerinde korozyon dirençleri elde edilebilmektedir.

Ancak, kataforetik uygulamalarla ve özellikle de epoksi-izosiyanat bağlayıcılı kataforez sistemleriyle elde edilen korozyon dirençleri anaforetik kaplamalarının yaklaşık iki katı olabilmektedir ve emsalsizdir. Bu nedenlerle, son 25 yıl içinde, özellikle otomotiv sanayinde ve oto yan sanayinde kataforetik astar kullanımı dünya çapında çok büyük yaygınlık kazanmıştır.

2.6 Metal Yüzeylerin Organik Kaplama Uygulamasına Hazırlanması

Boya uygulaması öncesinde metal yüzeylere yapılan işlemlerin ilki yüzeyde bulunan kir tabakasının ve oksit tabakasının uzaklaştırılması işlemidir. Metal yüzeylerin hemen hemen tümünde metalin hava oksijeni ve nemle etkileşmesi sonucu oluşan bir metal oksit ve hidratlarıyla metal tuzundan oluşan bir tabaka bulunur. Çok az miktarda serbest metal de içeren bu tabakanın gözenekleri arasında; metalin türüne göre farklılık gösteren diğer kirlilikler de yer alır. Karbonlu çeliklerde bu kirlilik unsurlarını, hadde kabuğu kalıntıları, tavlama işlemi sırasında yüzeye göçen karbon zerrecikleri metal tozları, karbürler, hadde yağı, gres vb. kalıntıları ve bu yağ tabakasına yapışmış halde bulunan çeşitli çevre kaynaklı, kir zerrecikleriyle bakteri, mantar ve küf kalıntıları oluşturur. Çinko yüzeylerde, yukarıdaki ek kirliliklerden metal tozlarına, yağlara, çevre kaynaklı kirliliklere ve

korozyon ürünlerine rastlanır. Alüminyum yüzeylerdeki kirlilikler de çinko yüzeylerdekilerle benzerlik gösterirler. Tek farkı, alüminyum yüzeylerin üzerinde sert ve sağlam bir alüminyum oksit tabakası bulunmasıdır. Bu oksit tabakası boyama açısından bir sakınca yaratmamakla birlikte, diğer kirliliklerin yüzeyden uzaklaştırılmasını güçleştirirler. Bu nedenle, söz konusu tabakanın da yüzeyden uzaklaştırılması gereklidir (Paksoy, 1999).

Boyanacak metalin yağ, kir ve pas (oksit) tabakasından temizlenmesi için önce bir yağ alma sonra da oksit tabakasını alma işlemi yapılır.

Yağ alma işlemi deterjanla, çözücüyle, alkaliyle temizleme (genellikle yüksek sıcaklıkta kostik çözeltisi ile yapılır), mekanik temizleme ve ultrasonografik dalgalarla temizleme yöntemlerinden biri ya da birkaçı uygulanarak yapılır. Sanayi uygulamalarda en yaygın uygulanan yöntemler sırasıyla çözücüyle temizleme, alkaliyle temizleme, deterjanla temizleme ve mekanik temizlemedir.

Çözücüyle temizleme işlemleri daldırma, basınçlı püskürtme ya da fırçayla uygulama yollarıyla yapılır. Çözücü emdirilmiş bezlerle silme yöntemi, hemen ardından temiz bir bezle tekrar silme uygulanmıyorsa yağ ve kiri bir noktadan diğerine taşımaktan başka bir işe yaramayacaktır. Çözücüyle temizleme uygulamalarında çözücü olarak white spirit, nafta, ksilen, toluen gibi hidrokarbonlar yaygın olarak kullanılırlar. Bu çözücülerin izopropil alkol, etanol gibi alkollerle birlikte kullanımına da daha az miktarda olmak üzere başvurulur. Etkin temizleyiciler olan klorlu hidrokarbonların kullanımı insan sağlığı riskleri dolayısıyla azalmıştır. Etkin bir teknik de kapalı hacimler içinde boyanacak yüzeylerin çözücü buharlarıyla temizlenmesidir. Soluma riski olmadığından, bu yöntemde klorlu hidrokarbonlar (örneğin Metilen klorür) ya da toluen gibi çözücüler kullanılabilir. Çözücüyle temizleme işleminde, parlama riski, çalışan sağlığı ve çevre kirliliği oluşması riski yöntemin uygulanmasını yer yer kısıtlayan unsurlardır.

Alkaliyle temizleme işlemlerinde en eski ve yaygın kullanılan kimyasal madde sodyum hidroksittir (kostik soda). Sodyum hidroksit'in sıcak çözeltilerine daldırmak suretiyle, demir esaslı yüzeylerden yağ ve kirin yanı sıra pas tabakasının da büyük ölçüde uzaklaştırılması mümkün olur. Alkaliyle temizleme işleminin riski, temizlik sonrasında yeterli durulama yapılmaması durumundaki kalıntı alkalinin, boya yapışması ve su direnci üzerinde çok olumsuz etki yapması olasıdır.

Metal yüzeylerden oksit tabakasının giderilmesi için asit dağlama yöntemi de uygulanır. Bu yöntemle metal hemen hemen tüm oksitlerinden arındırılabilir. Ardından bir pasifleştirici çözelti uygulamasıyla, tekrar hızla oksitlenme önlenir.

Oksit tabakasının uzaklaştırılmasında yaygın uygulanan bir diğer yaklaşım da mekanik uzaklaştırma yöntemidir. En etkin mekanik uzaklaştırma yöntemi çelik bilyeler veya yüksek silisli kum kullanılarak yapılan kumlama yöntemidir. Bu yöntemle, oksit tabakası uzaklaştırıldığı gibi yüzeyde dişler de açılmak suretiyle boya tutunması kolaylaştırılır.

Yağ, kir ve pastan arındırılmış demir esaslı metal yüzeyler hem boya yapışmasını iyileştirmek hem de korozyon dirençlerini arttırmak amacıyla bir fosfat kaplama işlemine tabi tutulabilirler. Bu işlemle, boya uygulanacak metalin yüzeyi daha iyi bir yapışma sağlayacak bir kimyasal yapı değişikliğine uğrattılır. Fosforik asitle dağlama işleminde oluşturulana benzer metal fosfat tabakaları, daha kalın ve daha koruyucu özelliklerde oluşturulurlar. Fosfatlanan yüzeyler, hemen ardından pasifleştirilerek ıslak durumda kaldıkları sürede süratle paslanmaktan korunurlar. Demir esaslı olmayan metalik yüzeylerde ise boya yapışmasını ve korozyon direncini artırmada alkali yüzey temizliği ve etkin durulamanın ardından çinko kromat banyolarıyla yapılan yüzey hazırlama işlemi emsalsiz sonuçlar vermektedir.

2.7 Otomotiv Oem Boyaları

Her sanayi sektöründe orijinal araç üretimi (OEM), satış sonrası bakım gibi etkinlikler mevcuttur. Bir orijinal araç üretimi sırasında uygulanacak boyalara ise "OEM Boyaları" adı verilir (McBane, 1999).

Beş bin'in üzerinde parçanın bir montaj hattı üzerinde birleştirilmesiyle oluşturulan otomotiv ürünlerinde organik kaplamaların kullanımı, paslanma eğiliminin önlenmesi gibi işlevsel ve albeninin artırılması gibi estetik nedenlerle gündeme gelmiştir. Zaman içinde geliştirilen pas dirençli metal alaşımlarının çinko, krom, nikel gibi metal kaplamaların ve plastik parçaların kullanımı, organik kaplamaların pas önleme görevini kısmen azaltmış, dolayısıyla organik kaplamaların estetik rolü daha öne çıkmıştır.

Günümüzde bir binek otosunun boya gamı, parantez içlerinde verilen temel işlevlere sahip olan aşağıdaki katmanlardan oluşmaktadır:

- Metal yüzeye uygulanan inorganik fosfat kaplamaları
(pas direncine katkı, boyanın yüzeye yapışmasını iyileştirme)
- Daldırmayla uygulanan kataforetik astarlar
(çok yüksek pas direnci sağlama)
- Püskürtülerek uygulanan astarlar

(taş çarpma direncini artırma, son kat öncesi düzgün bir yüzey oluşturma)

- Püskürtülerek uygulanan son katlar

(boya gamının dış ortam koşullarına direncini artırma, uzun süreli kalıcılığı olan parlak ve çekici renklere sahip bir görüntü oluşturma)

2.7.1 Araç Yüzeylerinin Boyaya Hazırlanması

Otomobil gövdelerini oluşturan elemanları; soğuk haddelenmiş ve sonradan tavllanmış sac, elektro-galvaniz kaplı sac, alüminyum ve alüminyum alaşımları, plastik parçalar olarak tanımlayabiliriz (Ansdel, 1995).

Soğuk haddelenmiş sac haddelenirken (yani bir anlamda dövülerek pürüzsüzleştirilirken) kaydırıcı olarak mineral yağlar kullanılır. Daha sonra, soğukta dövme işleminin yüzeyde oluşturduğu bölgesel gerilimleri gidermek için sac, 500°C civarındaki sıcaklıklara ısıtılarak tavllanır. Bu sırada hadde yağları da kısmen parçalanırlar. Bu, bu bölgelerde boya kabulünü özellikle güçleştirir.

Sac parçaların kaynaklanıp birleştirilmesiyle gövde oluşturulduktan sonra gövde, alkali yağ alma banyolarına daldırılır. Bunun ardından yüzeylere, primer çinko fosfat, $Zn(H_2PO_4)_2$ ile fosforik asit çözeltisi karışımı daldırma ya da püskürtme yoluyla uygulanır. Böylelikle, yüzeylerin korozyon önleme açısından önemli görevi olan bir dönüşüm kaplaması'nın (conversion coating) kabule uygun hale gelmesi sağlanır. Bu amaçla, farklı fosforik asit tuzları (fosfatlar) kullanılır. Sonuncusu trikatyon fosfat olarak da anılır. Bu işlemler sonucunda demir yüzeylerin üst kısmındaki demir atomları demir-çinko fosfat, $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ bileşimindeki çift metal fosfat olan hopeit, $Zn_3(PO_4)_2$, mangan ve nikel fosfat tabakalarıyla kaplanır. Bu ardışık fosfat tabakalarından ilk ikisi, metalik demirin fosfat bileşikleri oluşturacak biçimde kimyasal dönüşüme uğramasıyla oluşurlar. Bu nedenle de, bu tür kaplamalara dönüşüm kaplamaları adı verilir. Fosfat kaplamalar daldırma ya da püskürtme yöntemiyle uygulanabilirler. Oluşan metal fosfat kristallerinin biçimleri, uygulama yöntemine göre değişir. Daldırma uygulamalarında kristaller metal yüzeyini balık pulları gibi dizilmiş koruyucu bir zırh biçiminde kaplarlar. Püskürtme uygulamaları sonucunda ise, metal yüzeyine dik, iğnemsiz yapıya sahip metal fosfat kristalleri oluşurlar. Buna bağlı olarak, daldırma yöntemi hem daha geçirimsiz dolayısıyla pas direnci daha yüksek fosfat kaplamalara yol açar hem de taş çarpması gibi etkenlerin etkisiyle daha zor tahrip olurlar. Trikatyon fosfat çözeltileri kullanılarak yapılan kaplamalar soğuk haddelenmiş çelik, galvaniz kaplı çelik, alüminyum ve

alüminyum alaşımı yüzeyler üzerinde etkin korozyon koruması sağlarlar ve boyanın tutunması için en uygun yapışma yüzeylerini oluştururlar.

Gövdeye monte edilen ve daha sonra boya uygulanan plastik yüzeylerin de boyaya hazırlanması için yüzey hazırlama işlemlerine başvurulur.

Metal fosfat çözeltileriyle yapılan dönüştürme kaplaması uygulanmış yüzeyler önce saf suyla sonra kromik asit çözeltisiyle çalkalanarak pasifleştirilir ve kurutulurlar. Böylece yüzeyler hem bir miktar pas direnci kazanmış hem de organik kaplamaya hazır hale gelmiş olurlar.

2.7.2 Elektroforetik Astarlar

Boyaya hazırlanmış oto gövde yüzeylerine ilk olarak genellikle bir daldırma astarı uygulanır. Kataforetik astarlarda, ana bağlayıcı olarak bisfenol A esaslı bir epoksi reçinesiyle, çapraz bağlayıcı olarak kullanılan bir poliizosiyanat kullanılır. Epoksi omurga, farklı yaklaşımlarla elastikleştirilerek amaca uygun film eldesi sağlanır. Bu amaçla, polyester reçineleri, polyester dioller, akrilik modifikasyonlar, alifatik epoksiler ve yağ asitleri kullanılabilir.

Her iki tür elektroforetik kaplama sürecinde de, elektriğin sıvı içindeki iletimi, öncelikle iki elektrodun en yakın oldukları hat üzerinden gerçekleşir ve kaplama işlemi iki elektrodun en yakın olduğu bölgelerden başlar. O bölgede oluşan kaplamanın kalınlığı arttıkça araç yüzeyindeki elektriksel iletkenlik azalır ve zıt elektroda daha uzak olan ve henüz kaplanmamış komşu bölge daha iletken duruma geçer. Dolayısıyla, çözelti içindeki akım doğrultusu bu bölgeye doğru bükülür. Akım doğrultusunda ilerleyen yüklü boya parçacıkları da bu bölgeye yönelip orayı kaplarlar. Kaplama işleminin, böylece aracın kuytu bölgelerine de ulaşmasına, kaplamanın yukarıdaki mekanizmayla akım doğrultusunu bükerek kuytu bölgeleri de kaplayabilme yeteneğine "bükme gücü" adı verilir .

Elektroforetik astar kullanımı önemli bir başlangıç yatırımı gerektirmesine karşın, korozyon direnci yüksek bir film oluşturması, çok düşük çözücü buharı yayımı ve yangın riski, homojen film kalınlığı sağlaması, boya malzemesi açısından sarfiyatın daha az olması, yüksek mekanik dayanıklılığı gibi nedenlerden ötürü tercih edilmektedir (Ansdel, 1995).

2.7.3 Püskürtme Edilerek Uygulanan Astarlar

Günümüzde üretilen tüm binek otoların gövdelerine uygulanan kataforetik astarlar çok yüksek pas dirençlerine ve üstün yapışmalara sahip olmalarına karşın, kalınlığı çok homojen bir film oluşturdukları için sac yüzey kusurlarını gizleyemezler. Ayrıca, bisfenol

A esaslı bağlayıcı yapıları nedeniyle UV ışınların etkisinde tebeşirlenmeye uğrarlar ve de yeterli esneklikte olmadıklarından, aracın kullanımı sırasında oluşacak taş çarpmalarından hasar görürler. Bu nedenlerle, kataforetik astarlar uygulanmış yüzeylere son kat uygulanmadan önce, püskürtme astarlar uygulanır (Ansdel, 1995).

Püskürtme astarlar binek oto üretim hatlarında, genellikle elektrostatik çanlarla püskürtülerek uygulanırlar. Bu amaçla, aracın iki yanına ve üst yüzeylerine astar uygulamak üzere kullanılan yüksek devirli çanlar kullanılırlar. Yanlardaki çanlar yukarı-aşağı hareket ederek, üst yüzeyleri boyama amaçlı çanlar sağa sola küçük hareketler yaparak, montaj hattı üzerinde ilerleyen gövdenin dış yüzeylerini homojen bir kalınlıkta (yaklaşık 25-35 mikrometre kuru film kalınlığına) kaplarlar.

Püskürtme astarların ana bağlayıcıları genellikle, kısa-orta yağlı alkid reçinelerinden, yağsız polyester reçinelerinden ya da bunların karışımlarından oluşur. Çapraz bağlayıcı olarak da genel olarak amino reçineleri kullanılırlar. Ana bağlayıcıların özelliklerini güçlendirmek amacıyla, ayrıca epoksi ve poliüretan modifikasyonları da yapılmaktadır.

Püskürtme astarlarının, uygulama viskozitesinde %55 ile %70 arasında ağırlıkça katı madde içerecek şekilde formüle edilmeleri yaygın bir pratiktir. Özellikle çözücülü Püskürtme astarlar için katı madde içeriğinin üst değere, %70'e yakın olması, uçucu organik bileşik (VOC) yayımını sınırlamak açısından istenir. Uygulama viskozitesinde %65 ve üzerindeki ağırlıkça katı madde değerlerinde tasarlanan çözücülü Püskürtme astarlarla, genel kabul gören 420 g/ml'lik VOC eşiklerini elde etmek mümkün olmaktadır.

Astar renkleri genellikle gri tonlarında olduğundan pigment olarak titanyum dioksit ve karbon siyahı yaygın kullanılır. Gerek pahalı pigmentler içeren son katların astar yüzeyini daha düşük kalınlıklarda örtmesini sağlamak amacıyla gerekse otomobile yoldan sıçrayan taşların çarpması sonucunda oluşan son kattaki kopmaların kolayca fark edilmemesi amacıyla renkli astarlar da kullanılmaktadır. Renkli astarlar, üzerlerine gelecek son kattan çok uzak olmayan renklerde tasarlanırlar. Bu amaçla, son kat pigmentlerine göre daha ekonomik olan pigmentler kullanılır.

Çözücü yayımının çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, Batı Avrupa ve Kuzey Amerika'daki otomobil üretim tesislerinde sulu astarların kullanımı 1980'li yılların sonlarında başlamış ve günümüzde büyük yaygınlık kazanmıştır. Sulu astarlarda tercih edilen bağlayıcı sistemler, çözücülü astarlardakinden büyük ayrılıklar göstermemektedir. Kullanılan bağlayıcıların suyla inceltilebilir nitelikte olması için bazı kimyasal modifikasyon teknikleri uygulanmaktadır. Yer yer lateks kullanımı da söz konusu olmaktadır.

Kamyon, otobüs, minibüs ve diğer ticari araçların bir kısmında otomobil Püskürtme astarları kullanılırken, bir kısmında da yüksek miktarda dolgu maddesi içeren ve 250 mikron kuru film kalınlığına kadar akma kusuru olmaksızın uygulanabilen epoksi-poliamid 2K astarlar kullanılmaktadır. Kimi ticari araçların büyüklüklerinin, yüksek sıcaklık fırınlamalarının etkin yapılmasına olanak vermemesi, düşük sıcaklıkta sertleşen epoksi-poliamid astarların kullanılmasında önemli bir nedendir. Bir diğer önemli neden de, gerek mali kaygılar gerekse araç büyüklüğünün yarattığı güçlüklerden dolayı bir çok ticari araca CED astar uygulanmamasıdır. CED astarın uygulanmaması, CED'nin mükemmel olarak yaptığı korozyon önleme işlevinin başka öğelerle sağlanmasını gerektirmektedir. Epoksi-poliamid astarların, ≥ 120 mikron kuru film kalınlığında kullanılması durumunda, CED astar kullanımının sağladığı korozyon direncine ulaşılabilir. Talk ve baritle dolgu yüklemesi yapılan bu astarlar, evvelce çinko kromat, son yirmi yılda ise çinko fosfat antikorozyon pigmentler kullanılarak yeterli korozyon direncine sahip kılınmaktadır. CED astar kullanılmaması durumunda, yeterli korozyon direncini koruyabilmek için başvurulan bir diğer yaklaşım ise, ticari araç gövdelerinde sıcak daldırma galvanizli sac kullanımınıdır. Galvaniz yüzeylerde yeterli yapışma elde edebilmek için yine epoksi-poliamid astarlar kullanılırlar. Ancak, bu durumda astar kalınlığını 40-50 mikron kuru film kalınlığında tutmak yeterli olmaktadır.

Yüksek dolgulu epoksi-poliamid astarların yüksek dolgu içeriği, son kat bağlayıcısının astar tarafından emilmesine, dolayısıyla da son katta parlaklık kaybına yol açtığından, bazı ticari araç üreticileri son katın altına ayrıca ikinci bir astar uygulayabilmektedirler. Daha az dolgu içerecek biçimde formüle edilen bu astarlar, bağlayıcı emilimini önlemek amacıyla kullanılmaktadırlar.

2.7.4 Tek Kat Uygulanan Düz Renkli Son Katlar

Unutmamak gerekir ki, bir aracın benzin, akü asidi, hidrolik yağı gibi bazı sıvıların sıçramasına maruz kalma olasılığı hep vardır. NC ve TPA polimerlerinden daha düşük molekül ağırlığında olan fakat yapısında reaktif gruplar bulunan bağlayıcılardan oluşan son katların geliştirilmesi bu sorunların çözümündeki doğru yöneliş çizgisini oluşturmuştur. Düşük molekül ağırlıklı bağlayıcılar içeren son katlar daha az çözücüyle inceltilmişler, dolayısıyla daha yüksek katı madde miktarına sahip olabilmişlerdir. Bu nedenle de az sayıda uygulama katı ile yeterli kalınlıkla kuru boya filmi verebilmişlerdir. Bu boya formüllerinin içerisine, reaktif grup içeren bağlayıcı ile çapraz bağlanacak biçimde

tepkime verecek olan formaldehit veya izosiyanat reçineleri de eklenerek, boyanın 80°C ile 140°C arasındaki fırın sıcaklıklarında oluşan polimerleşmeyle mükemmel olarak sertleşmesi sağlanabilmiştir. Böylece, teorik olarak otomobilin tüm yüzey alanını kaplayacak büyüklükte tek bir polimer molekülü oluşturmak mümkündür. Bu biçimde oluşan boya filmlerinin son derece yüksek çözücü ve kimyasal dirence sahip kılınması mümkün olmuştur. Reaktif gruplar içeren ve ısı ile etkisiyle hızlanan bir zincir büyümesine uğrayan bu tür polimerlere termoset polimerler, bu polimerleri içeren boyalara da termoset boyalar adı verilir (McBane, 1999).

Düz renkli son katların konvansiyonel Püskürtme tabancalarıyla uygulanmaları, yerlerini yüksek devirli çan uygulamasına bırakınca özellikle beyaz ağırlıklı renklere olmak üzere bir parlaklık ve buğululuk (haze) sorunu yaşanmaya başlanmıştır. Bu sorunlar, pigment dispersiyonlarının uygun dispersiyon reçineleri ve kararlılaştırıcı katkıların kullanımıyla daha kararlı kılınması sonucunda aşılmaktadır.

1970'lerle birlikte atmosfere organik madde yayımının eriştiği düzey, boyaların yarattığı atmosfer kirliliğinin de mercek altına alınmasına yol açmıştır. Yüksek katılı çözücülü son katlar ve sulu son katlar konularındaki çalışmalar hızlanmıştır. Tek katta uygulanan son katlarda her iki yaklaşıma göre geliştirilen ürünler son 25-30 yıl içinde uygulamaya konmuşlardır.

Tek kat halinde uygulanan düz renk son katlarda kullanılan pigmentlerin seçiminde, özellikle güneşin UV ışınlarına karşı dayanıklılığın belirlediği "ışık haslılığı", hava oksijeninin yol açtığı yükseltgenmeye (oksidasyon) karşı direnç, hava neminin ve bu nem içinde çözünen (O₂, SO₂ vd.) gazların oluşturduğu seyreltik asit çözeltilerine karşı direnç, küf mantarlarının etkilerine karşı direnç gibi özelliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Tümü dış doğal ortamdan kaynaklanan etkilere karşı olan bu dayanım özelliklerine topluca pigmentin "dış dayanım özellikleri" adı verilmektedir. Ayrıca, çözücü direnci, alkali direnci, kuş dışkısına direnç gibi, kullanım ortamında oto boyasını etkileyebilecek özellikleri de dikkate almak gereklidir.

2.7.5 Yaş Üzerine Yaş Uygulanan Baz Kat + Vernik Biçimindeki Son Katlar

Avrupa'da geliştirilip 1970'li yılların başlarında uygulanmaya başlayan baz kat + vernik sistemlerinde, hızla fiziksel kurumaya uğrayan ve alüminyum pigmentler içeren baz kat 15-20 mikron kuru film kalınlığı verecek şekilde uygulanır ve birkaç dakikalık bir ara kurutmanın ardından 25-35 mikron kuru film kalınlığında bir vernik üzerine uygulanır. Daha

sonra, 7-8 dakikalık bir kurutmanın ardından iki kat birlikle fırına girer ve pişirilirler. Yaş üzerine yaş baz kat + vernik uygulamaları daha sonra, sedef pigment içerecek biçimde de gerçekleştirildiler. Günümüzde, hem daha yüksek parlaklık hem de daha uzun süreli dayanıklılık sağlamak amacıyla, düz renkli baz kat + vernik sistemleri de yaygınlaşarak uygulanmaktadırlar (McBane, 1999).

Gerek çözücülü gerekse sulu baz katların üzerine, yaygınlıkla çözücülü akrilik vernikler uygulanmaktadır. Akrilik vernikler, akrilik reçineler ve çapraz bağlayıcılarla, UV etkisini önleyici, yayılmayı artırıcı, akmayı önleyici katkılardan oluşurlar. Çapraz bağlayıcı olarak melamin formaldehit ve izosiyanat reçineleri kullanılarak uygulama viskozitesinde sırasıyla %40 ilâ %60 katı madde içeren vernikler elde edilebilmektedir. Aynı zamanda, verniklerin çizilme dirençlerini ve kimyasal dirençlerini de arttırmak mümkün olmaktadır. Sınırlı da olsa bazı otomobil üretim hatlarında toz vernik uygulamaları mevcuttur.

Kısaca ticari araçlarda kullanılan boya sistemlerine değinmek gerekirse; burada, seçilen sistemleri etkileyen en önemli parametrenin araç büyüklüğü olduğu görülmektedir. Özellikle otobüslerde, tüm aracın banyolara daldırılması veya fırınlarda 120°C-150°C gibi yüksek sıcaklıklara çıkartılması yüksek yatırım ve işletme maliyetlerine yol açmaktadır. Bu nedenlerle, kataforetik astar uygulamaları sınırlı bir yaygınlığa sahiptir. Püskürtme astar ve son kat kimyaları seçilirken de düşük sıcaklık sistemleri tercih edilmektedir.

Püskürtme astarlarda 80°C 'de kürlenebilen epoksi poliamid sistemler hem yüksek sıcaklık gerektirmemeleri hem de kataforez astarın yokluğunda önem kazanan korozyon direnci sağlayabilmeleri nedeniyle ticari araçlarda yaygın bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Son kat olarak ise 80°C'de pişirilebilen akrilik poliüretan boya ve vernikler kullanılmaktadır.

2.8 Boya Atma Kabinleri

Boya atma kabinlerinin havalandırılmasında emilen havanın üstten basılan havadan %5 daha az olması gereklidir. Bu şekilde kabin içerisinde artı basınç sağlanarak dışardan gelebilecek toz parçalarının içeri girmesi önlenmiş ve ayrıca yukardan aşağıya doğru olan hava akımı nedeni ile mevcut tozların aşağıda tutulması sağlanmış olur. Kabin içerisindeki hava hızı 0.3 m/sn olmalıdır. Her halükarda 0.1 m/s den fazla olmalıdır. 0.5 m/s den daha yüksek hava hızı ise boya kaybına neden olur.

Emniyet ve insan sağlığı açısından havadaki çözücü miktarının %0.5'in üstünde olmaması gereklidir. Hava hızı 0.3 m/s optimum kabul edilirse çözücü miktarını %0.5 in altında tutabilmek için yaklaşık dakikada 20 defa hava değişimi yapılmalıdır.

Kabinin dibindeki deliklerden emilen hava filtre edilir. %30-40 dışarı atılır. Gerisi taze hava ile karıştırılarak ve filtrelerden geçirilerek tekrar kabine verilir. Filtreler kontrol edilmeli ve kirlendikçe yenileri ile değiştirilmelidir.

Üflenen havanın klimatize edilmesi gereklidir. İstenen şartlar; %40-50 relatif nem 22°-26°C ortam sıcaklığıdır. Yazın havayı nemlendirmek, kışın da nemini almak gerekebilir. Aydınlatma çok önemlidir. Işığın bol ve gölgesiz olması bütün yüzeyleri aydınlatması gereklidir.Boya atma kabin duvarlarının kolay temizlenebilir toz tutucu bir boyayla boyanması ve hava emişinin tabanda bulunan bir su perdesi üzerinden yapılması kabin içersinde bulunabilecek boya tozu miktarını minimuma indirecektir.

3. KURUTMA PROSESİ

3.1 Kurutmanın Tanımı

Kurutma kelimesi, genel anlamıyla bir maddenin bünyesinde bulunan nemin alınmasını belirtir. Fakat teknikte bu işlem çok çeşitli metotlarla yapıldığından, bu metotları birbirinden ayırabilmek için daha dar bir anlamda kullanılır. Buna göre teknik anlamda kurutma; katı veya katı hale yakın durumdaki maddelerin bünyesinde bulunan nemin (çözücü veya dağıtıcı sıvıların), bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaz fazına geçirilmek suretiyle uzaklaştırılmasını belirtir. Endüstride karşılaşılan pek çok hallerde kurutma operasyonu, suyun kaynama sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta uzaklaştırılması anlamını taşır.

Isıtma ile yapılan kurutmada ilk önce malzemedeki sıvı, buhar haline getirilir, daha sonra ise buhar malzemedeki uzaklaştırılır. Bu proseste bir faz değişimi söz konusudur. Bu değişim buharlaşma veya buğulaşma şeklinde gerçekleştirilir. Buğulaşmada kurutulan malzeme üzerinde bir gaz bulunur. Serbest kalan buhar, difüzyon yolu ile bu gaza karışarak uzaklaşır. Buharın gaz içindeki hareketini gaz içindeki bölgeler arası kısmi buhar basınç farkı sağlar. Buharlaşmada ise malzeme üzerinde yalnız sıvının serbest kalan kendi buharı vardır. Buharı uzaklaştırmak için bir basınç farkının uygulanması gerekir (Mujumdar, 1995).

Kurutma işlemi için kullanılan sistemler, yani kurutucular sanayinin bir çok dalında yaygın olarak (gıda, kimya, tekstil, kağıt, otomotiv, çimento, kereste sanayilerinde) kullanılmaktadır. Proses sırasında birden fazla değişik kurutucuda birkaç kez kurutma gerektiren ürünler de vardır.

Kurutmanın esas amaçları;

- Taşıma, kullanım ve daha sonra uygulanması gereken işlemlerin ekonomik olması için hacim veya ağırlığın azaltılması.
- Daha sonra uygulanması gereken işlemler, kullanım, pazarlama için istenen koşulları sağlayan malzemeler üretmek.
- Ürünleri sterilize etmek veya korumak.
- Çözeltiler veya atık sulu karışımlardan yan ürünleri geri kazanmak.

Ürün kalitesini etkilememek kaydıyla, kurutma prosesinin olabildiğince hızlı bir şekilde yapılması sonucu, bu işlem için tüketilen enerji miktarı en aza indirilebilir.

Enerji tasarrufu açısından bakıldığında kurutma prosesi iki nedenle önemlidir:

1. Kurutma enerjisi yoğun bir prostir ve pek çok sanayi kolunda enerji tüketiminin esas yüzdesini kurutma prosesi için tüketilen enerji oluşturmaktadır.
2. Kurutma prosesleri genellikle çok iyi anlaşılabilmiş prosesler değildir ve yeni ve/veya iyi uygulanmış teknolojilerin kullanımı yoluyla önemli miktarda enerji tasarrufu yapmak mümkün olabilmektedir.

3.2 Kurutma Prosesinin Teorisi

Bir malzeme kurutulur iken iki proses gerçekleşmektedir:

1. Sıvının buharlaştırılması için ısı transferi olur.
2. Malzeme içinde sıvı veya buhar halinde ve malzeme yüzeyinden ise buhar halinde kütle transferi olur.

Tipik kurutma prosesi Şekil 3.1 deki grafikte gösterilmektedir. Bir ilk sıcaklık yükselmesini (AB) takiben pek çok durumda belli bir zaman süresince sabit hızda buharlaşma gerçekleşir (BC). Bu buharlaşma işlemi, buharlaşma oluşan yüzeylerdeki ısı transfer miktarının ayarlanması yoluyla kontrol edilebilir. Bu kademede, malzeme içerisinde buhar veya sıvı şeklinde oluşan kütle transferi yüzeyi sıvıca dolgun tutmak için yeterli olmakta ve buharlaşma işleminin hızını etkilememektedir. Bu mekanizma "Sabit Hızda Kurutma" olarak adlandırılmaktadır.

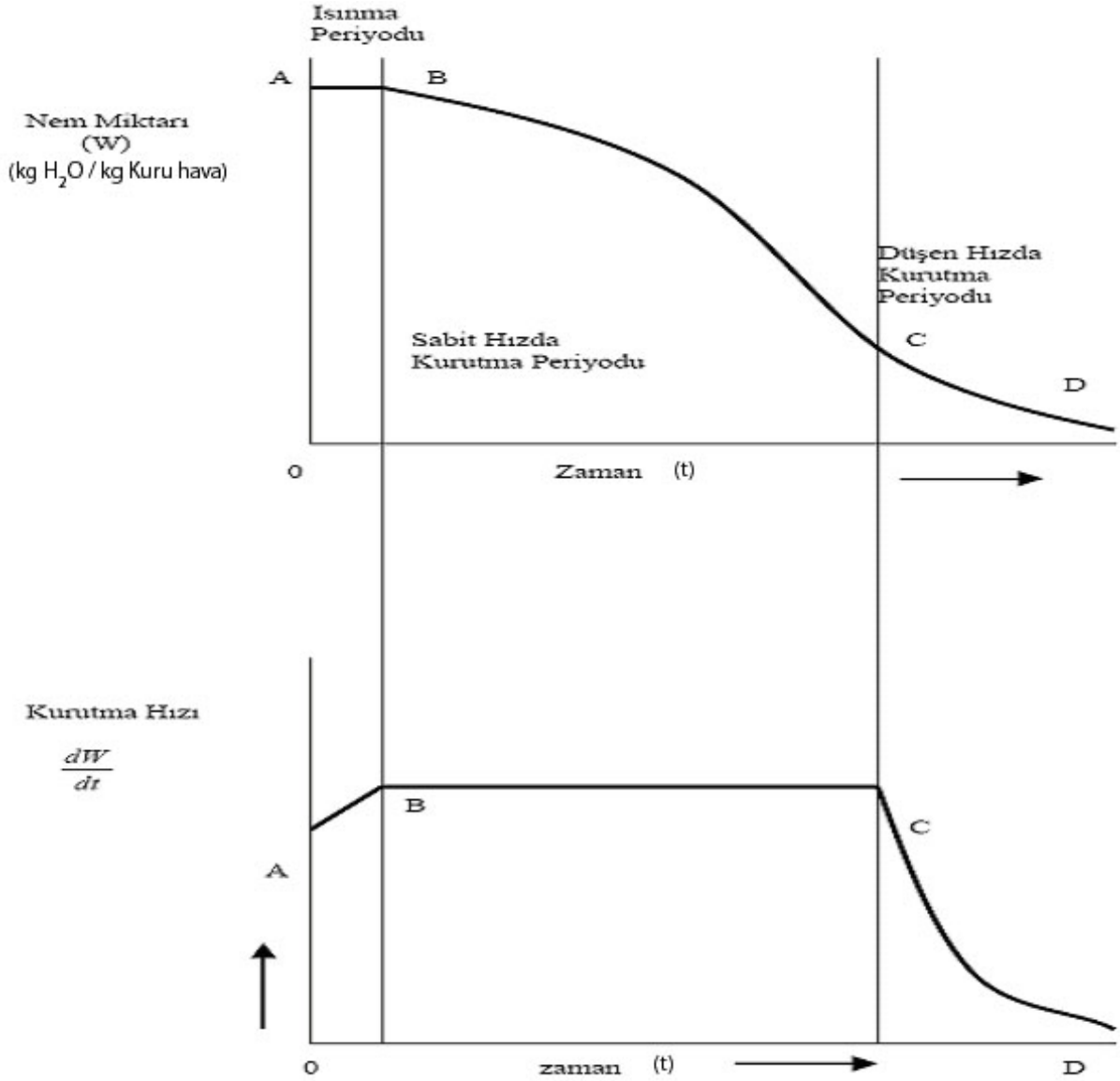
Bu periyodu, buharlaşma hızının sürekli olarak değiştiği, "Düşen Hızda Kurutma" (CD) periyodu takip etmektedir. Bu zaman süresince malzeme yüzeyi sıvıca doymun durumda değildir ve malzeme içinde nem taşınması hızı, buharlaşma hızını kontrol eden bir faktör haline gelmektedir.

Sabit hızda kurutma periyodunun son noktası olan (C) 'deki nem miktarı, "Malzemenin Kritik Nem Miktarı" olarak tanımlanır. Eğer istenen son nem miktarı (kurutma işlemi sonunda kuru malzemenin nem miktarı), kritik nem miktarından yüksek ise tüm kurutma prosesi, sıcaklık yükselmesi periyodundan sonra sabit hızla kurutma olarak gerçekleşir. Eğer kurutmaya tabii tutulacak malzemenin başlangıçtaki nem miktarı kritik nem miktarından daha düşükse, tüm kurutma prosesi düşen hızda kurutma olarak gerçekleşir.

Kurutulan malzemeye ait bu hızlar;

- a. Dış Faktörler: Kurutma havası sıcaklığı, nemi, akış hızı ve türbülansı, kurutulacak malzemenin yüzey alanı ve kalınlığı, tanecik büyüklüğüne,

b. İç etkenler: Kapiler akış ve yoğunluk, iç buharlaşma veya daralmalar sonucu oluşan basınç değişimi nedeniyle oluşan akışlar gibi difüzyon yoluyla nemin yüzeye taşınmasını etkileyen, malzemenin doğasına ait özelliklere bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.1 Tipik kurutma prosesi grafiği (Sanayide Enerji Tasarrufu Seminer Notları, 1997)

Nemin malzeme içerisindeki hareketleri çok karmaşık olup, kontrol mekanizması ile ilgili temel bilgiler yetersiz kalmaktadır. Kurutma hızında sınırlayıcı faktörler genel olarak iki ana gruba ayrılabilir:

- Malzeme yüzeyindeki statik hava film tabakasından geçmek suretiyle yüzeydeki sıvının, kurutma havasına karışma hızı,
- Yüzey tabakasının sertleşmesi veya büzülmesi sonucu nem akışına engel olma veya malzemeye muhtelif nedenler sonucu zarar verme gibi durumlar yaratmaksızın malzemenin nem uzaklaştırma hızıdır.

Kurutma uygulamalarında deneyimlere dayanarak, minimum kurutma süresi ve dolayısıyla en iyi enerji kullanımını sağlayacak dış faktörleri oluşturmak mümkündür.

3.2.1 Hava Sıcaklığının Etkisi

Hava sıcaklığının yükselmesiyle birlikte, havanın içerisinde su buharı tutulma özelliği de üstel olarak artış gösterir. Ayrıca, yüksek hava sıcaklıkları yüzeydeki nemi ve malzemeye ısı transfer hızlarının artmasını sağlar ve bunun sonucunda yüksek buharlaşma hızları oluşur. Bu durum ise malzeme içindeki nemin daha kolay ve hızlı bir şekilde yüzeye çıkmasını sağlayan itici, zorlayıcı bir etki yaratır.

Bu nedenle, kurutulacak malzemeye herhangi bir zarar vermeksizin uygulanabilecek maksimum hava sıcaklığına bağlı olarak, yüksek kurutma hızları elde edilebilir. Hava sıcaklığı gayet tabiidir ki kurutma havasını ısıtmak için kullanılacak olan akışkan sıcaklığı ile de sınırlanmaktadır. Bununla birlikte yüksek hava sıcaklıklarının, kurutma sistemine verilen enerji miktarının ve maliyetin yükselmesi anlamını taşıdığı da unutulmamalıdır.

3.2.2 Hava Nem Miktarının Etkisi

Yüksek kurutma hızları ayrıca, kurutma havasındaki nem miktarının minimum olması halinde elde edilir. Herhangi bir kuru termometre sıcaklığındaki hava içindeki nem miktarının artması, bu havanın ilave çözücü buharı tutma kapasitesinde azalma oluşturur. Bu durum malzeme yüzeyinden buharlaşma miktarını azaltacak yönde etki de yapar.

Bu etkiler, düşük hava sıcaklıklarında ve havadaki nem miktarını doyma noktası yakınlarına ulaştığı durumlarda oldukça önem kazanır, ama sıcaklık yükselmesiyle bu etkiler zayıflamaya başlar. Pratik kurutma uygulamalarında, makul ölçüdeki yüksek nem miktarı kurutucu performansı önemli ölçüde sınırlayıcı bir faktör değildir. Ekonomik olması istenen çalışmalarda, hava çıkışında % 80 bağıl nem oranlarını görmek her zaman için gayet normaldir. Isıtılması gereken taze, temiz hava miktarının ve kurutucu içerisinde hava akış hızının azaltılması amacıyla bir kısım sıcak egzost havasının geri döndürülerek yeniden kullanılması halinde bu durumla sık sık karşılaşılır.

3.2.3 Hava Akış Hızının Etkisi

Islak yüzeyden buharlaşma hızı, sıvıya ısı akışına ve nemli yüzeydeki düzgün tabaka yoluyla yayılan buhar miktarına bağlıdır. Yüzey üzerinden geçen oldukça yüksek akış hızına sahip

hava akımı, bu düzgün tabakanın kalınlığını azaltıcı yönde etki eder ve ısı transferinin ve aynı zamanda buharlaşma hızının artmasını sağlar.

Hem nemli yüzeyin hem de hava akımının türbülanslı olması buharlaşma miktarını artırır. Islak yüzeye göre hava akımının yönü önemli miktarda etkiler yaratır. Teğetsel hava akımı olduğu takdirde buharlaşma miktarı, hava hızının n. kuvvetine kadar yükselir, n değeri 0.8 'dir. Yüzeyde normal hava akımlarında $n=1.4$ değeri elde edilebilmiştir.

3.2.4 Nem Miktarının Tanımı

Kurutma havası olsun, kurutulacak malzeme olsun nem miktarı genellikle mutlak birimde (kg nem/ kg kuru madde) veya (ağırlıkça kuru maddeye göre) yüzde cinsinden ifade edilmektedir. Temel olarak nem yüzdesinde eşit miktarda artış, ağırlıklarda eşit değişiklikler oluşturmaktadır. Malzemenin yaş ağırlığına göre, yüzde veya mutlak birimlerde nem ifadeleri de pek nadir olarak da olsa görülmektedir.

3.3 Kurutucu Verimi

Kurutma işlemlerinde ısı enerjisi:

1. Kurutucuya giren havanın sıcaklığının yükseltilmesi,
2. Kurutulacak malzemenin sıcaklığının yükseltilmesi,
3. Kurutulacak malzemedeki sıvının sıcaklığının yükseltilmesi ve buharlaştırılması,
4. Kurutucu Yüzeyinin örneğin radyasyon, konveksiyon, kaçaklar şeklinde olan ısı kayıplarının karşılanması amacıyla kullanılır.

Bu alanlardan sadece 3., yani kurutulacak malzemedeki sıvının (nemin) sıcaklığının yükseltilmesi ve buharlaştırılması, yararlı olacaktır. Bu nedenle kurutma proseslerinde, 3. madde için tüketilen enerji, toplam enerji tüketimine (1-4 maddelerin toplamı) bölünmek suretiyle ısı verim hesaplanır.

3.4 Kurutmada Kullanılan Yöntemler

3.4.1 Konveksiyon Kurutması

Üzerinden sıcak ve kuru hava geçirilen malzeme ile hava akımı arasında ısı sınır tabaka oluşur. Havadan malzemeye konveksiyon ile ısı taşınır ve malzeme bünyesinde bulunan sıvı buharlaşarak difüzyon yolu ile kurutma havasına karışır.

3.4.2 Temas Kurutması

Sıcak bir yüzeyle temasa geçirilen malzeme kondüksiyon yolu ile ısınırken, bünyesindeki sıvı buharlaşarak difüzyon yolu ile çevre havasına taşınır.

3.4.3 Radyasyon Kurutması

Malzemenin, çevresinde bulunan sıcak yüzey veya yüzeylerden radyasyon yolu ile ısıtılması sağlanırken, bünyesindeki sıvı buharlaşarak difüzyon yolu ile çevreye taşınır.

3.4.4 Dielektrik Kurutma

Malzeme yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarla ısıtılıp bünyesindeki sıvı buhar haline getirilerek uzaklaştırılması sağlanır.

3.5 Kurutma Çeşitleri

Kurutma işlemi genellikle iki çeşidi vardır :

- Doğal Kurutma
- Yapay Kurutma

Doğal kurutmada, kurutulacak madde ince bir tabaka halinde kendi kendine kurumaya bırakılır. Ancak bu çok uzun bir zamana ihtiyaç gösterdiği için endüstride pek az kullanılır. Endüstride daha çok yapay kurutma denilen kurutma işlemi kullanılır. Burada kurutma amacıyla sıcak hava, baca gazları, istim gibi kurutucu maddeler, kurutulacak maddenin üzerinden geçirilir. Bu şekilde kurutulması istenilen maddenin içinde bulunan su veya çözücünün, kurutma vasıtası olarak kullanılan sıcak hava, baca gazı gibi hava veya gaz ortamına geçmesi sağlanır (Keey, 1992).

Kullanılan cihaz (kurutucu) aşağıda gösterilen kategorilerden birine göre sınıflandırılabilir.

3.5.1 Operasyon Metodu

Endüstride kurutma işlemi kesikli ya da sürekli olarak yapılır. Kesikli kurutmada, kurutulacak nemli madde işlemde önce kurutucuya yerleştirilir. Belli bir süre içinde kurutucuda bırakılarak kurumaya sağlanır. Bu zamanda cihaza sıcak hava veya baca gazları sevk edilmelidir. Sürekli kurutucularda nemli madde kurutma cihazına sürekli olarak gönderilir.

Cihaz içinde sıcak hava veya sıcak baca gazları ile temasa geçirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilir. Elbette ki küçük miktarların kurutulması söz konusu ise kesikli kurutma sisteminden yararlanılır. Kurutulması gerekli miktarlar büyükse sürekli çalışan kurutma sistemlerinden yararlanmak gereklidir. Büyük miktarda madde kurutulacaksa, madde genel özellikleri ve rutubet derecesi yönlerinden homojenlik göstermekte ise, sürekli kurutma sisteminin kullanılması daha uygun olur.

3.5.2 Nemin Buharlaşması İçin Gerekli Isıyı Temin Eden Metot

Direkt kurutucularda, ısının tamamı maddelerin sıcak gazla doğrudan temasıyla temin edilmektedir. İndirekt kurutucularda ısı, buharlaşmış nemi taşıyan gazdan temin edilmektedir. Örneğin ısıyı, madde ile temas halinde olan bir metal duvardan geçirilerek aktarılır.

3.6 Kurutmada Enerji ve Kütle Dengesi

Belirli şartlardaki bir malzemenin istenilen değere kadar belirli zamanda kurutulması uygulamada çok önemlidir. Kurutma işlemi için sisteme enerji vermek gerekir. Kurutulacak malzemeye verilecek olan ısı enerjisinin ve buna bağlı olarak malzeme bünyesinden alınan buhar miktarının hesaplanması gerekir. Kurutmada bu büyüklükler, kullanılan havanın ve kurutulan malzemenin kurutucuya giriş ve çıkış koşullarına göre, kurutucu için, kütle ve enerji dengesi yazılarak hesaplanır (Kudra ve Mujumdar, 2002).

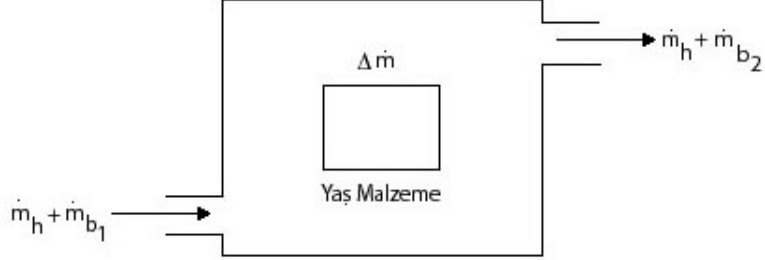
3.6.1 Kütle Dengesi

Kurutucuları, çalışma rejimi bakımından sürekli ve kesikli kurutucular olarak iki sınıfta inceleyebiliriz. Bu çalışmada yapılan kurutma; süreksiz kurutma olup çalışma şekli Şekil 3.2 'de şematik olarak gösterilmiştir.

Süreksiz kurutmada, kurutma süresince kurutucudan \dot{m}_h kadar kuru hava geçer. Giriş havasında çözücü buharı olmadığı için \dot{m}_{b_1} değeri sıfırdır. Bu hava kurutucuya çıkışta \dot{m}_{b_2} kadar sıvı buharı götürecektir. Bu süre içerisinde kurutulacak malzemenin miktarında $\Delta \dot{m}$ kadar azalma olur. Boyanın kurutulması sırasında dışarıdan alınan kurutma havasındaki su buharı oranı kurutma esnasında boyalı yüzeylerde zararlı etkileri olabileceğinden dolayı normal şartlardaki havanın neminin oldukça alt seviyelerinde bulunduğu kurutma

havasıyla beraber iç ortama giren su buharı miktarı ihmal edilebilecek düzeydedir. Kurutucuda basınç ve sıcaklığın sabit kaldığı kabul edilirse kütle dengesi (3.1) de ki gibi olur.

$$\dot{m}_{b_1} - \dot{m}_{b_2} = -\Delta\dot{m} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2 Süreksiz kurutucuda madde akışı (Mujumdar, 1995)

3.6.2 Enerji Dengesi

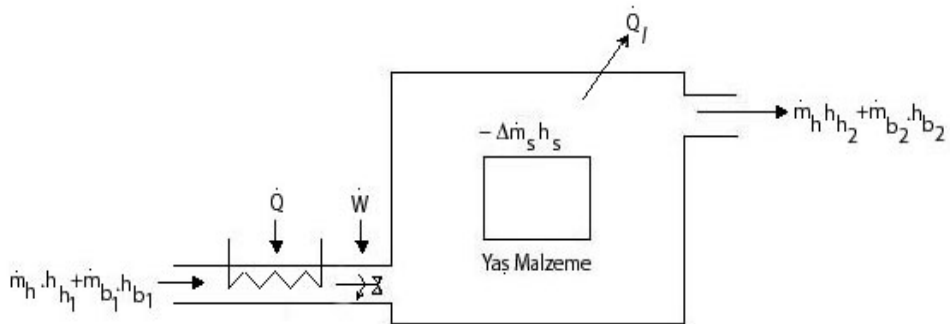
Termodinamiğin I. yasasına göre, bir sistem sınırları içinde bulunan madde topluluğunun enerji değişmesi, sistemin çevresiyle yaptığı ısı ve iş alışverişlerinin cebirsel toplamına eşit olur. Buna göre kurutma işleminde enerji dengesi;

$$\Sigma\dot{Q} + \Sigma\dot{W} = \Sigma\dot{E}_2 - \Sigma\dot{E}_1 - \Delta\dot{E} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılır.

Sistemin enerji değişimini hesaplayabilmek için kurutucuya giren ve çıkan maddelerin entalpilerini bilmek yeterlidir. Kurutma olayına giriş ve çıkıştaki kinetik enerji değişimi ihmal edilir. Şekil 3.3 'teki süreksiz kurutucuda, kurutma havasına \dot{Q} ısısının verildiği, havanın hareketini sağlamak için fan kullanılarak \dot{W} işi yapıldığı ve çevreye olan ısı kayıplarının \dot{Q}_l olduğu kabul edilirse, enerji dengesi (3.2) deki şekilde yazılır.

$$\dot{Q} + \dot{W} - \dot{Q}_l = \dot{m}_h (h_{h_2} - h_{h_1}) + \dot{m}_{b_2} . h_{b_2} - \dot{m}_{b_1} . h_{b_1} - \Delta\dot{m}_s . h_s \quad (3.3)$$



Şekil 3.3 Süreksiz kurutucuda enerji akışı (Mujumdar, 1995)

Kurutucuda sıcaklıkların sabit kalınca sistemin enerji değişmesi, malzemeden çekilen Δm_s kadar sıvının ısısına, yani $\Delta m_s \cdot h_s$ 'e eşit olur.

3.7 Çözücü Buharları İçin Nem Tabloları

Çözücü olarak suyun kullanıldığı yerlerde suyun nem tabloları hesaplanarak oluşturulmuştur. Diğer çözücülerin buharları için nem tabloları benzer biçimde hazırlanabilir. Bununla beraber önemli bir farklılık vardır; yaş termometre sıcaklığı su buharından farklı buharlar için adyabatik buharlaşma sıcaklıklarında oldukça farklılık göstermektedirler. Bu tablolar üzerindeki çizgiler yaş termometre sıcaklığı çizgilerinin dışında hava-su buharı için tasarlanan şekilde hesaplanmıştır. Bu çizgilerin belirlenmesinde psikrometrik oran bilgilerine dayanmaktadır.

3.8 Otomotivde Boya Kurutma Prosesi

Otomobil boyacılığında çok farklı boyalar kullanılmaktadır ve boya uygulamalarından sonra kurutma gerekmektedir. Kurutma işlemi, dayanıklı ve koruyucu bir film oluşmasını sağlamak, kısa zamanda diğer işlemlere geçişi sağlamak ve çözücü çıkışını kontrol etmek için uygulanır.

Modern otomotiv kaplamaları elektro kaplama astar, baz kat ve son kat boya içermektedir. Özellikle baz kat kaplamanın mekanik ve optik özellikleri üzerinde kuvvetli bir etkiye sahip olması ve kuruma esnasında oluşan farklı etkilerden sorumludur.

3.8.1 Kuruma Zamanları

Toz kuruması : Uygulanmış yaş boya filmi üzerine belirli periyotlarla pamuk lifleri düşürülür ve hafifçe üflenir. Lifler iz bırakmadan hafif üfleme ile boya yüzeyinden uzaklaştırıldığı ana kadar geçen süredir. Toz dökülerek (160 mesh CaCO_3) veya işaret parmağını boya yüzeyine çok hafif sürterek te tespit edilebilir.

Dokunma kuruması : Boya filmine parmakla hafifçe bastırıldığında boya filminin bozulmadığı, parmağa boya bulaşmadığı ana kadar geçen süredir.

Montaj kuruması : Kolu dik tutarak baş parmakla boya filmine uygulanabilecek en fazla kuvvet uygulandığında boya filmi bozulmuyorsa veya kalan iz yumuşak bir bezle silindiğinde kayboluyorsa boya montaj kuruması yapmıştır.

Tam kuruma : Baş parmak ucuyla kol dik tutularak boya filmine basılır ve yine en fazla kol kuvveti uygulanarak baş parmak 90° çevrilir. Boya filmi bozulmuyorsa tam kuruma olmuş demektir.

Rötuş edilebilirlik : Bazı boyaların üzerine şu veya bu nedenle ikinci bir katı uygulamak gerekirse, ikinci katın uygulanabilmesi için geçmesi gereken süre en az ve en çok olarak belirtilir. Bu kritik süreler içinde ikinci kat uygulandığında boyada kabarma, kırışma, yapışma zayıflaması gibi boya filmi bozuklukları görülür.

Zımparalama süresi : Astarlar için önemlidir. Ne kadar zaman sonra zımpara yapılabileceğini gösterir.

3.8.2 Boyaların Kuruma Prensibi

Boya filminin kuruması boya içeriğindeki bağlayıcının yapısı nedeniyle farklı mekanizmalar ile olur. Bu mekanizmalar termoplastik reçineler, çapraz bağlanan termoset reçineler, kendiliğinden oksidasyonla çapraz bağlanan reçinelerdir.

Kuruma olayı, boya tabakasından çözücünün buharlaşmasını ve kurutulan tabakadan çözücü buharının ayrılmasını içerir. Buharlaşma endotermik bir prosestir. Isı sisteme kondüksiyon, konveksiyon, radyasyon ya da bunların birkaçı ile sağlanır. Bu proses makroskobik dengeler kullanılarak modellenir. Boya tabakasının birim alanı içinde toplam enerji akışı (q_t) kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşınım) ve radyasyon (ışınım)'dan sonuçlanan akışların toplamıdır.

$$q_t = q_{\text{kondüksiyon}} + q_{\text{konveksiyon}} + q_{\text{radyasyon}} \quad (3.4)$$

Bazı uygulamalar için kondüktif ve radyoaktif ısıtma yararlı tekniklerdir. Konvektif ısıtma, çözücü buharlaşması için gerekli enerjiyi sağlamada yeterli değildir. Ancak konvektif kurutma boya tabakası yüzeyinden çözücü buharının uzaklaşmasını sağlayan tek ısıtma biçimi olması nedeniyle yaygın olarak kullanılır.

$$\text{Konvektif ısıtma hızı} = q_{\text{konvektif}} = k.A.\Delta T$$

$$\text{Çözücü buharlaşma hızı} = Q / \lambda$$

Genelde, kuruma prosesi üç adımda özetlenebilir; doymamış bileşenlerin oksitlenmesi (birleşen peroksit yapıların oluşumu), bu birleşebilen bileşenlerin polimerizasyonu, kolloidal sistemlerin tekrar düzenlenmesi ve jelleşmesi şeklindedir. Kendiliğinden oksidasyon

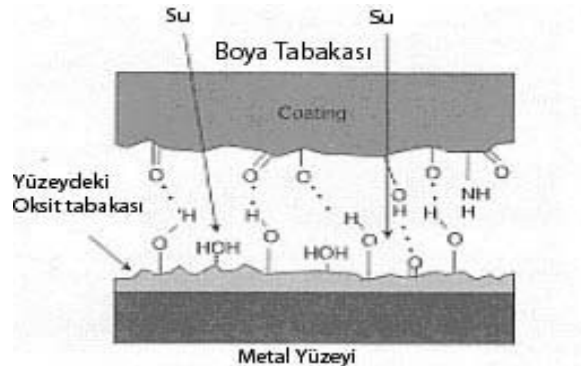
reaksiyonu kabaca yaş boya uygulandıktan sonra oldukça hızlı gerçekleşir ve zamanla bu hızın azalmasına rağmen, kaplamanın ömrü boyunca devam eder.

3.8.3 Boya Filminin Sertleşmesini Etkileyen Faktörler

Filmlerin kurumasını etkileyen başlıca dört etken vardır. Bu parametrelerin kurumaya etkileri sırasıyla anlatılmıştır.

3.8.3.1 Nem

Belli tipte kaplama malzemeleri havadaki su içeriğinden direkt olarak etkilenir (Şekil 3.4). Boyaların yapısı kurumaları sırasında nem kontrolünü gerektirmektedir. Seyreltici olarak su içeren emülsiyon boyalarda hava neminin etkisi oldukça fazladır. Çünkü boya filmindeki suyun buharlaşma hızı, sıcaklık ve hava nemine kontrol edilir. Çözücü filmde uzaklaştıktan sonra bu kaplamaların sonraki sertleşmesi bağıl neme daha az bağlı olarak ilerler.



Şekil 3.4 Boya ile metal yüzey arasında suya maruz kalan ara yüzey (Ansdel, 1995)

Suyun dışında filmde ayrılan çözücülerin buharlaşma hızı bağıl nemden etkilenmez. Çünkü sıvının buhar basıncı yalnızca sıcaklığın fonksiyonudur. Böylece havanın su içeriğini önemsemeyen, hava belli sıcaklıklarda aynı miktarda çözücü tutacaktır.

Ortalama sıcaklıklarda havadaki suyun gerçek miktarı çok azdır. Yüksek sıcaklıklarda havanın su buhar içeriği büyük değerlere ulaşabilir. Yüksek sıcaklıklarda boya filmlerine, yüksek bağıl nemin etkisi önemli hale gelir. Çünkü hacimce havadaki oksijen içeriği azalacaktır. Wolff ve Zeid sıcaklık yükseltirse nem etkilerinin arttığını bulmuşlar, ancak nemin etkisinin önemli olmadığına karar vermişlerdir. Soğuk ve nemli fırınlarda, aşırı nem yüzeyin matlaşmasına neden olur.

3.8.3.2 Sıcaklık

Sıcaklık kontrolü, filmlerin kurumasında en önemli etkidir. Sıcaklık $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$ toleransla sabit tutulmalıdır. Fırın kabiniinde üniform bir ısıtmanın temini gereklidir. Yüzey kaplama filminin kuruması oksidasyon ve polimerizasyon olmak üzere iki farklı adım içerebilir. Kuruma, oksidasyonla başlayıp polimerizasyonla ilerleyebilir. Bu proseslerden biri diğerinden sonra gerçekleşir. Oksidasyonla oluşan film formasyonunun kuruma prosesi oda sıcaklığında devam eder. Polimerizasyonun yükümlü olduğu formasyonda, filmler yükseltilmiş sıcaklıklarda fırınlamayla gerçekleştirilen kuruma sonucu elde edilir. Polimerizasyon, yüksek sıcaklıkta oksijence zayıf moleküller ile oluşur. Yüksek sıcaklıkta kuruma reaksiyonunun tamamlanması için gereken oksijen miktarı, düşük sıcaklık reaksiyonu için gerekenden daha az olmalıdır.

Fırınlama ve hava oksijeni ile kuruyan filmler arasında farklılık vardır. Oksitlenen boya filmlerinin kurumada oksitlenmeye olduğu kadar polimerleşmeye de eğilimi vardır. Boya filminin oksitlenmiş bağları yağların doymamış kısımlarında oluşur. Fırınlanmış filmde bağlar aynı değildir ve genellikle polimerleşmiştir. Hava kurumalı oksidasyon filmleri ortalama 48-72 saat içinde sertleşir. Bu tip filmlerin fırınlanması oksidasyonun tamamlanmasını hızlandırır.

Fırınlamada elde edilen ürünün renk değişimine uğramaması ve tam standart renkte olması için fırının her tarafı aynı sıcaklıkta olmalıdır. Fırınlamanın süresi de önemlidir. Fırınlama süresi ve sıcaklığı, film tabakasının sertleşmesi ile doğru orantılıdır. Uzun süre fırınlama sert, kırılabilir ve daha az yapışkan bir film tabakası oluşturur. Kısa fırınlama süresi ise boyada polimerizasyonun olmamasına ve dolayısıyla filmin sertleşmemesine neden olur. Bunun sonucunda filmin yağ asitlerine, deterjanlara, alkali ve suya karşı dayanıklılığı olması gerektiği gibi olmaz.

Sonuç olarak; sıcaklığın, fırınlama süresine ve kuru filmin görünüşüne etkisi önemlidir. Bunun yanında, 140°C ve üzerindeki sıcaklıklarda boyalı plakalar uzun süre fırınladığında boyada renk değişimi olmaktadır.

3.8.3.3 Ön Buharlaşma

Hava kabarcıklarını önlemek ve boyanın iyi yayılmasını sağlamak için uygulanan boyadan çözücünün ilk uçuşunu sağlamak gereklidir. Buna ön buharlaşma zamanı denir. Araç fırınlama öncesi dinlendirilerek, boya içindeki çözücü ve katkı malzemelerinin oda sıcaklığında uçması sağlanır. Bu dinlendirme işlemi hem fırınlama sırasında çok fazla çözücü buharı çıkmasını önlemek hem de araç yüzeyinde kusursuz bir boya film tabakası oluşmasını

sağlar. Ön buharlaşmanın yapılması ile fırınlama zamanı kısaltılabilir. Bu ön buharlaşma (flash off) işlemi, en azından 15–20 dakika süreyle yapılan bir işlemdir.

Fırınlamadan önce yapılan ön buharlaşma işleminin süresi ve sıcaklığı önemlidir, ön buharlaşma sıcaklığı düşük olduğunda ağırlık kaybı ön buharlaşma süresiyle artmaktadır. Yüksek ön buharlaşma sıcaklığında, ağırlık kaybı düşük sıcaklıklara göre daha fazla olmakta; ancak zamanla daha az azalmaktadır.

3.8.3.4 Hava Sirkülasyonu

Hava sirkülasyonunun olduğu bir fırında yalnızca üniform bir sıcaklık ve iyi bir kontrol sağlanmaz, aynı zamanda kabinde havanın sık sık değişimi de gerçekleşir. Bunun amacı, plakaların çevresindeki havanın çözücüyle doymasını engellemek ya da oksijenin yenilenmesini sağlamaktır.

Fırında buharlaşan çözücü, eğer dışarıya çıkacak bir yol bulamazsa, tekrar plakanın üzerine çöker. İkinci defa çözücü buharlaşırken film tabakasından çıkamayarak yüzey hatasına neden olur.

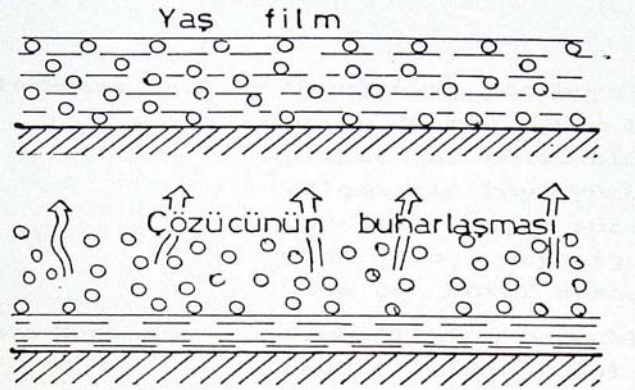
Yağ filmlerinin kurummasında oksidasyon reaksiyonunun önemli olması nedeniyle reaksiyon hızının, oksijen reaksiyonunun fonksiyonu olması beklenebilir. Bu reaksiyon oksijen tüketir. Taze oksijenin hava ve boyalı yüzey arasına ulaşmasında tek yol difüzyondur. Böylece reaksiyon hızı, sabit hava film kalınlığının fonksiyonu olmalıdır. Bu sabit hava film kalınlığı, havanın hareket hızıyla ilgilidir. Bu nedenle, reaksiyon ya da kuruma hızı tamamen yerel hava akışından etkilenir.

3.8.4 Boya Filminin Kuruması

Bütün sentetik boyalar iki zamanda kururlar: çözücülerin boya tabakasından uçması suretiyle ve bunu takiben ısı tatbiki, havadan emilen oksijen veya her iki etki sayesinde (Şekil 3.5). Yani önce boyanın içindeki tinerler uçar, sonra yüzeyde kalan boya tabakası yukarıda izah edilen dış etkiler sebebiyle kurur. Sentetik boya selülozik boyadan daha geç kurur. Hava ile kuruyan sentetik boyalarda önce tinerin buharlaşması gereklidir. Buna ek olarak yüzeyde kalan tabakada, havadan oksijen emmek suretiyle kurur ve sertleşir (Şekil 3.6).

BOYA FİLMİNİN KURUMASI

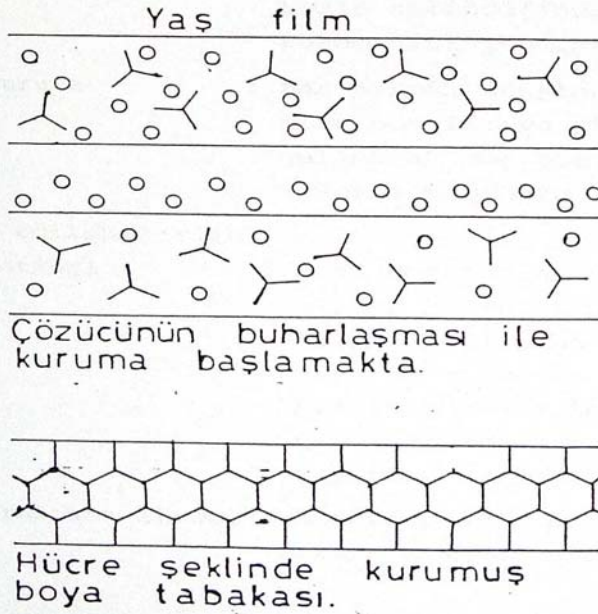
I-Fiziksel (Solvent buharlaşması ile) kuruma.



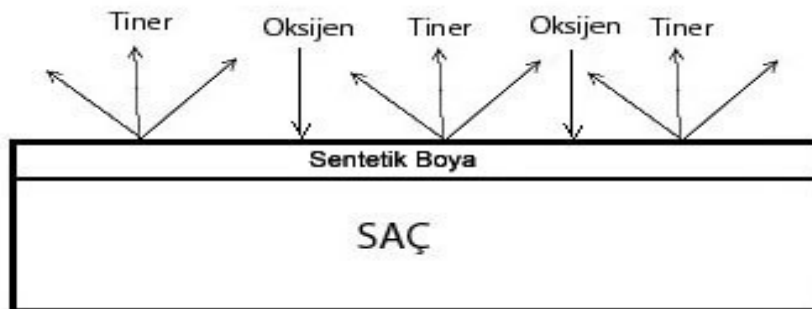
II-Kimyasal kuruma :

a-Hava oksijeni yardımıyla,

b-Sertleştirici ile reaksiyona girerek kuruma.

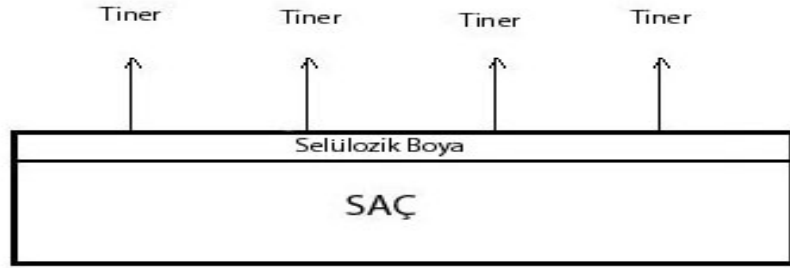


Şekil 3.5 Boya filminin kuruması (Mercedes Benz Türk A.Ş., 2000)



Şekil 3.6 Sentetik boyanın kuruma prensibi

Selülozik boyalar çok çabuk kururlar. Bu kuruma selülozik boya içindeki çözücü ve tinerler uçar uçmaz oluşur. Selülozik boyanın yüzeyde sertleşebilmesi için boya içindeki çözücülerin uçması gereklidir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Selülozik boyanın kuruma prensibi

3.9 Boya Kurutma Fırını

Kurutma kabinlerinde yan duvarlar, tavan ve tabanın çok iyi izole edilmiş olması gereklidir. Değişim için kullanılan havanın etkili filtrelerden süzülmesi ve kabin içersindeki buharların ortamdaki dengeli biçimde uzaklaştırılması lazımdır (Şekil 3.8).

İyi bir fırının en karakteristik yönü, fırınlanan aracın üst kısmı ile alt kısmı arasında birkaç dereceden fazla fark olmamasını sağlamasıdır (Şekil 3.9). Araç fırına girdikten sonra en fazla 5-10 dakikada istenen metal sıcaklığına ulaşmalı ve istenen süre bu sıcaklıkta sabit kalmalıdır. Fırın içersinde ısı kontrollerinin (termograf) bulunması gereklidir (Şekil 3.10).



Şekil 3.8 Boya kurutma kabininin içinin görünümü (Mercedes Benz Türk A.Ş, 2006)



Şekil 3.9 Fırın sıcaklık göstergesi (Mercedes Benz Türk A.Ş, 2006)



Şekil 3.10 Analog fırın sıcaklık göstergesi (Mercedes Benz Türk A.Ş, 2006)

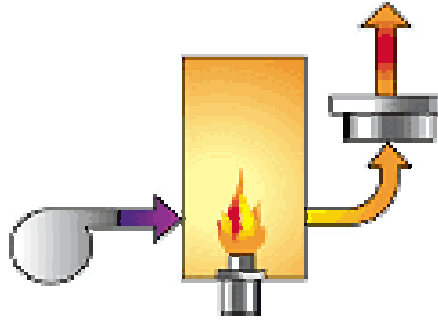
4. İNSİNERASYON VE TERMAL İNSİNERATÖRLER

Yanabilir nitelikteki hava kirleticilerin veya yakılarak yok edilmesi uygun olan tehlikeli ve zararlı maddeler içeren gaz veya partikül formundaki organiklerin giderilmesinde başvurulabilen çok etkili ancak oldukça pahalı bir yöntemdir. İnsinerasyon veya atık yakma işlemi başlıca üç değişik türde cihaz ile yapılabilir:

- Termal insineratörler
- Katalitik insineratörler
- Fleyr bacaları

4.1 Doğrudan Alevli İnsineratörler

Kirli gaz/hava karışımları eğer doğrudan Çizelge 4.1 'de görülen sınırların arasında karışımlar halinde ise herhangi bir yakıt eklenmeden yakılabilirler. Bunlara doğrudan (direkt) alevli insineratörler denir (Şekil 4.1). Ancak çoğu durumda karışım, yanmayı sürdüremeyecek kadar seyreltiktir. Bu yüzden mümkün olduğunca az miktarda olmak üzere sisteme yakıt eklemek gereği doğar. Bazı özel durumlarda ise karışımı önce birkaç yüz dereceye kadar dıştan yakıt yakılarak ısıttıktan sonra kendi kendine yanmaya başlar ve yakıt ilavesine gerek kalmaz. Kural olarak bir insineratörde karışımın kendisinden elde edilen enerji, sistemin gerek duyduğu enerjinin %50 'sini karşılamadıkça insinerasyonun fizibilitesi düşük olur. Şekil 4.2 'de çoklu jet akımlı bir bek ile tutuşturulan doğrudan (direkt) alevli bir insineratör gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Doğrudan alevli insineratörün şematik gösterimi

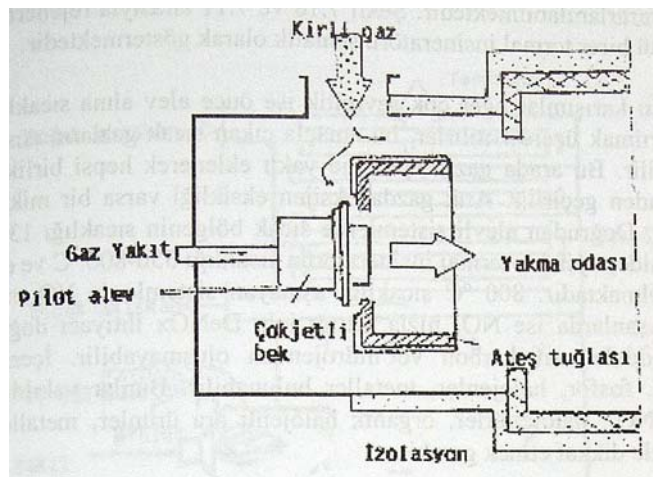
4.2 Termal İnsineratörler

Sakıncalı organik hava kirleticiler belli bir derişim aralığında bulduklarında en etkili bir şekilde insineratörler yardımıyla yakılarak yok edilebilirler. Bu amaçla kullanılan termal insineratörlerde yüksek sıcaklıklar elde edilir. Bu sistemde duman yüklü egzost gazı yüksek

dereceli yanma sisteminden geçirilir. Ve böylece kompleks hidrokarbon bileşikleri bu yüksek sıcaklıklarda CO₂ ve H₂O şeklindeki son yanma ürünlerine kadar oksitlenirler. Bu yöntemde sıcaklığa ve diğer tasarım ilkelerine göre değişmekle beraber %99 u aşabilen giderim verimleri elde etmek mümkündür.

Çizelge 4.1 Çeşitli organik buhar ve gazların hava ile karışımının tutuşma aralıkları (Müezzinoğlu, 2000)

Madde	Alt değer (hacim %)	Üst değer (hacim %)
Asetaldehit	4,0	36,0
Benzen	1,3	7,0
n-bütan	1,8	8,4
Doğal gaz	4,8	13,5
Etil eter	1,9	48,0
Etil merkaptan	1,8	18,0
Hidrojen	4,0	73,0
Hidrojen sülfür	4,3	45,0
Karbon monoksit	12,5	74,0
o- ve m-ksilen	1,1	6,4
p-ksilen	1,1	6,6
Metan	5,0	15,0
Propan	2,1	9,5
Toluen	1,2	7,1



Şekil 4.2 Doğrudan alevli bir insineratör için çok jetli bir tip yakıcı (Müezzinoğlu, 2000)
İnsinerasyonda yanabilir gaz/hava karışımlarının alev alma sıcaklığına dikkat etmek gerekir. Kolayca alev alabilen bir organik madde karışımının organik madde bakımından en fakir olanı "alt alev alma noktası" (lower explosive limit) LEL, en zengin olanı (yani havası az

olanı) ise "üst alev alma noktası" (upper explosive limit) UEL olarak bilinir. Çizelge 4.1 'de en çok rastlanan yanabilir hava kirleticilerin alt ve üst alev alma karışım oranlarını göstermektedir. Bu oranlar arasındaki hava kirletici madde karışımları tutuştuğunda yanmaya devam eder. Tutuşma ise çoğu kez kendiliğinden olur veya çok küçük bir enerji eklenmesiyle başlar. Yanma, karışımın ısı değeri $370-550 \text{ kJ/m}^3$ gibi değerlerde ise devam eder. Yanmanın başladığı noktadaki stokiyometrik hava oranında ise bu ısı değeri yaklaşık olarak 3725 kJ/m^3 civarında olmalıdır. Emniyet açısından karışımların taşınması ve ön ısıtılması sırasında alt alev alma karışımının altında karışma oranında kalınmalı ve ısı değeri de tutuşma enerjisinden en az % 25 daha az olmalıdır.

Termal insineratörlerde yakılan atık gazlar içerisindeki organik madde derişimi genellikle çok düşüktür. Bu nedenle bu yanabilir maddenin her ne kadar belli bir yakıt değeri olsa da, bu değeri düşük derişimler de önemli bir sıcaklık artışını sağlamaktan uzaktır. Bu nedenle hem yanma reaksiyonunu başlatabilmek, hem de yüksek sıcaklıklarda sürdürebilmek için sisteme önemli ölçüde yakıt eklenir. Bu durumda eklenen yakıt miktarının fazla oluşu hem de genellikle yüksek kaliteli gaz veya sıvı yakıtlar eklemek gerektiğinden dolayı, insinerasyon yönteminin işletme giderleri yüksek olur.

Termal insineratörler sağlanan yüksek sıcaklıklar, çıkış gazlarının da yüksek sıcaklıkta olmasıyla neticelenir. Buda ısı tasarrufunu akla getirmektedir. Çıkış gazlarının enerjisinden istifade amacıyla başlıca iki tür sistem geliştirilmiştir: Reküperasyonlu sistemler ve ısı rejenerasyonlu sistemler. Bunlardan ısı reküperasyonlu sistemler geleneksel olarak en yaygın kullanılan türlerdir. Burada sıcak ve temiz çıkış gazı, kirli ve soğuk giriş gazını ısıtmak üzere bir eşanjöre gönderilir. Böylece giriş gazı kısmen ısınarak yanma odasına girdiğinden hem daha az ek yakıt sarfı olur, hem de NO_x emisyonları kısmen azaltılmış olur. İkinci tür sistemler olan ısı rejeneratif insineratörler ise nispeten daha yenidir. Bunlarda bir seramik dolgulu kule sıcak çıkış gazlarıyla ısıtılarak sıcak tutulmakta, bunun sakladığı ısıdan hem giriş gazlarını ısıtmak için, hem de fabrikanın başka bir yerlerinde yararlanılabilmektedir. Şekil 4.3 'te sırasıyla Rejeneratif ve Reküperatif birer termal insineratör şematik olarak gösterilmektedir.

Tutuşma için karışımlar eğer çok seyreltik ise önce alev alma sıcaklığının üzerine çıkmak üzere ısıtılırlar, bu amaçla çıkan sıcak gazların ısısından yararlanılabilir. Bu arada gazın içerisine yakıt eklenerek hepsi birlikte bir bekin alevinden geçirilir. Atık gazda oksijen eksikliği varsa bir miktar da hava üflenir. Doğrudan alevli sistemlerde sıcak bölgenin sıcaklığı $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu halde tipik bir termal insineratörün sıcaklığı $550-800 \text{ }^\circ\text{C}$ ve en çokta $900 \text{ }^\circ\text{C}$

olmaktadır. 800 °C sıcaklığı aşmayan sistemlerde NO_x sorunu görülmez. Aşarlarda ise NO_x hızla arttığı için DeNO_x ihtiyacı doğabilir. Yakılan maddeler saf karbon ve hidrojen oluşmayabilir. İçeriğinde kükürt, azot, fosfor, halojenler, metaller bulunabilir. Bunlar yakıldığında çıkan SO_x, halojenürler, organik halojenli ara ürünler, metaller ve bunun gibi kirleticilere de dikkat etmek gerekir.



Şekil 4.3 Rejeneratif termal insineratör ve reküperatif termal insineratörün şematik gösterimi

Termal insineratörlerde sistem verimliliği sıcak bölgedeki sıcaklık ve gazların bekleme süresi, insinerasyon verimini belirleyen en önemli parametrelerdir. Pratikte verim,

- Karışma oranlarına
- Homojenliğine (türbülansa)
- Yanma sıcaklığına
- Gazların en sıcak bölgede kalma süresine
- Ortamdaki oksijenin yüzdesine

bağlıdır. Bunlar arasında en önemlisi sıcak bölgenin sıcaklığı olup bunun belirlenmesi ve sağlanması tasarımın esasını oluşturmaktadır. Her yanabilen maddenin tutuşmak üzere bir aktivasyon enerjisine ihtiyacı vardır. Örneğin halojenli organiklerin aktivasyon enerjisi ihtiyacı yüksektir. Bu enerjinin verilebilmesi için saf maddelerde fizikokimya tablolarından yararlanılırsa da, yapısı çok iyi bilinmeyen veya zaman içerisinde sıkça değişen karışımlar için deneysel çalışmak gereklidir. Bazı toksik organik gaz ve buharların birim bekleme süresindeki (1 saniye) teorik tutuşma sıcaklıkları için Çizelge 4.2 'dedir. Termal insineratör tasarımında esas alınan verimler, sıcaklık ve gaz bekleme süreleri ise Çizelge 4.3 'tedir.

Tasarımda genellikle doğal gazın takviye yakıtı olarak kullanılması yoluyla hesap yapılır. Daha sonra doğal gazın yakıt eşdeğerine bakılarak başka yakıtlara geçilebilir. Bu sistemlerin tasarımında sıcaklık, türbülans ve yanma odasında gazların bekleme süresi esas alınır. Bu üç faktörün minimum değerleri ise sağlanabilen bir giderme veriminin, herhangi birinin

arttırılması ile yükseltilesi sağlanır. Bunun gibi bu üç faktörden birindeki azalmanın diğer ikisi arttırılarak karşılanması ve verimin sabit kılınması mümkündür. Bu üç boyutlu ilişkilerin tamamına yanmanın 3T kuralı (zaman (time), sıcaklık (temperature), türbülans (turbulance)) kuralı denir.

Çizelge 4.2 Bazı organik toksik maddelerin tutuşma sıcaklıkları (Müezzinoğlu, 2000)

Madde	Tutuşma sıcaklığı
Akrilonitril	729
Alil klorür	691
Benzen	732
Klorobenzen	734
1,2-dikloroetan	742
Metil klorür	869
Toluen	727
Vinil klorür	743

Çizelge 4.3 Termal insineratör tasarım ilkeleri(Müezzinoğlu, 2000)

İstenen verim yüzdesi	Halojensiz organik gaz atıklar		Halojenli organik gaz atıklar	
	Yanma sıcaklığı (°C)	Bekleme süresi (s)	Yanma sıcaklığı (°C)	Bekleme süresi (s)
98	870	0,75	1100	1
99	980	5	1200	1

Tasarım; brülör seçimi, yüksek sıcaklığı muhafaza etmek üzere gereken yalıtım hesabı, gazları içeride belirli bir sürenin üzerinde kalmasını ve türbülanslı yanmayı sağlayacak büyüklükte reaktör hacminin hesabı adımlarından oluşur. Yüksek sıcaklığın gerektirdiği yalıtım ve yüksek tutulması istenen bekleme süreleri büyük ve pahalı insineratörleri zorunlu kılar. Bazı özel durumlarda çok büyük debideki kirli gazların önceden deriştirerek daha derişik bir gaz karışımını yakmak suretiyle yakıt sarfiyatını azaltıcı önlemler de gerekli olabilmektedir.

Termal insineratörler yaygın kullanılmalarına karşılık yakıt tüketimi, yüksek sıcaklıklardan dolayı yalıtım masrafları ve özellikle radyasyonla ısı kaçakları fazla olan tesislerdir. Bu yüzden de hem ilk yatırım, hem de işletme masrafları oldukça yüksektir.

Kullanım amaçlarına göre termal insineratörlerde ortalama sıcaklık tespiti yapılır: Hidrokarbon buharlarının gideriminde 500–750 °C, Karbon monoksit gideriminde 700–800

°C, koku gideriminde 450–700 °C gibi sıcaklıklar kullanılabilir. Çok geniş bir debi aralığında çalışabilen insineratörlerin gittikçe yaygın kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Özellikle balata sanayi, kupol ocakları, fiberglas üretimi, matbaa ve plastik folyo basım evleri, et ve balık tütsüleme tesisleri, metal kaplama ve cilalama işletmeleri, plastik imalathaneleri, tekstil boyahaneleri, araç boyahaneleri, emaye tesisleri gibi yerlerde başarıyla organik çözücü ve koku giderimi yapabildikleri bilinmektedir.

4.3 Hava Kalitesinin Kontrolü

Çevre bakanlığının, hava kalitesinin korunması yönetmeliğine en uygun olarak, işletmeler, fabrika bacalarından çevreye verilen kirlenici hava emisyonlarının kontrolünü sağlamak ve hava kalitesinin korunmasına katkıda bulunmakla yükümlüdür. Yönetmelik gereği, hava kalitesi denetleme görevlisi tayin etmiş olan kuruluşların işletmecileri, kamu sağlığı ve düzeni, çevrede yaşayanlar üzerinde yaratılabilecek ciddi tehlikeleri önlemek üzere, emisyon ve hava kalitesi değerlerinin belirlenmesi amacıyla, görevli kişilerce testler yapılması için izin vermeye ve görevlilere istedikleri doküman ve bilgileri sağlamaya mecburdur.

4.4 Hava Kirlenitçileri ve Egzost Havaasının Arıtılması

Soluduğumuz hava birçok kirlenitçiye maruz kalmaktadır. Bunun sorumlusu sadece konvansiyonel güç üretim santralleri olmamakla birlikte bunun yanında evlerdeki bireysel ısıtma sistemleri, yolarımızda artan trafik yoğunluğu, üretim sanayi ve proses endüstrileri de bu kirliliğe katkıda bulunmaktadır (Heinsohn ve Kabel , 1998).

Havanın tabii bileşimini değıştiren, is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki kimyasal maddelerdir. Zararlı veya istenmeyen hava bileşenlerini ortadan kaldırmanın üç temel yolu vardır:

1. Bu kirli havayı temizleme aletinde temizlemek
2. Zararsız bileşenlere dönüştürmek
3. Başka bileşenlere dönüştürerek tutulması

Bütün arıtma prosesleri bu üç temel prensiple veya bunların kombinasyonlarıyla belirlenebilir.

4.4.1 Egzost Havaasının Arıtılmasının Temel Prensipleri

Havanın doğal kompozisyonu %78,08 N₂ , %20,95 O₂ , %0,93 Ar, % 0,03 CO₂ ve çok az miktarda diğere elementlerden bulunan konsantrasyon, karbondioksitin oranından bir ondalık

yüzdesinden bile daha azdır. Bu yüzdede oluşabilecek küçük bir değişiklik bile çevreyle birlikte insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde hasar verebilecek basınç değişikliklerine neden olur. Zararlı veya rahatsız edici maddelerin konsantrasyon limitleri maksimum çalışma ortamı konsantrasyonu, maksimum emisyon ve emisyon konsantrasyonu dikkate alınarak yasal düzenlemeler getirilmiştir. Çok sayıdaki endüstriyel proses havası orta seviyeye göre çalışmaktadır. Bu kompozisyon proses esnasında sıkça değişmektedir. Genellikle hava, endüstride kullanıldıktan sonra atmosfere geri verilmektedir. Egzost havasının bileşimi dikkate alınarak minimum gereklilikle çevreyi korumak için atmosfere dönüş havasını korumalıyız. Bazı montaj tiplerinin emisyon limitleri için şart koşulan özellikleri verilmiş olmasına rağmen kullanıcı; bu değerleri aşabileceği tavsiye edilse bile (verilen kullanım aralıklarını rahatça kullanılabilineceği önerilse bile); en son teknolojik gelişmeleri takip etmelidir (William , 1997).

Egzost havasının arıtılması esasen bir maliyet faktörüdür. Bu faktör mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. İlk yapılması gereken şey teknik olarak güvenlik metotları seçilerek her bir özel durum için maliyete etkisi çıkarılmalıdır. Her bir problem için en iyi çözüm aşamalı olarak geliştirilmelidir. İlk aşamada ölçüm yapan kuruluşların birine egzost havasına bir takım ölçümler yaptırarak değerlendirmelerde bulunması ve kirletici konsantrasyonunun belirlenmesi tavsiye edilir. Çünkü hem ekonomik hem de ekolojik olarak bunun göz önünde bulundurulması gerekir. Bu nedenle 2. adım olarak termal insineratörün nasıl optimize edilebileceği düşünülmelidir. Havanın arıtılması için yatırım ve işletme maliyetleri yoğunlaştırılan ve azaltılan egzost havası akımı tarafından oldukça alçaltılmaktadır.

Son adımda aşağıdaki kriterlere bağlı olarak uygun sistem seçimi yapılır.

- Havanın hacmi
- Konsantrasyon
- Sıcaklık
- Geri alınması gereken ısı miktarı
- Katalizör zehirleri, yüksek sıcaklıkta kaynayan maddeler, reaktif ve polimerize olan maddeler ve diğerleri gibi

4.4.2 Boyahane Emisyon Kaynakları

Emisyon; yakıt yanmasıyla, sentez, ayrışma, buharlaşma ve diğer işlemlerle maddelerin yığılması, ayrışması, taşınması ve bunun gibi tesisten atmosfere yayılan hava kirleticileridir. Boya ve/veya çözücünün kullanıldığı her türlü mahalden kaynaklanan emisyonların dışarı

atıldığı noktalar ve kurutma kabinlerinin ısıtılması için gereken yakma işlemi sonucu ortaya çıkan atık gazların atmosfere verildiği noktalardır. Fabrikalarındaki boyahane kabinlerinden kaynaklı kirleticiler: Toplam HC, toz, izosiyanat, monoetilenglikol; boya kurutma fırınından kaynaklı kirleticiler: CO, SO₂, NO₂, aldehit; boyahane TNV bacasından kaynaklı kirleticiler; Toplam HC, SO₂, NO₂, aldehit ve toz emisyonlarıdır.

Fabrikaların tesisleri kurulma aşamasında boyahane, yönetmelik kapsamında TNV sistemi entegre edilerek kurulmuştur.

4.4.3 Duman ve Koku Emisyonu

Kurutma sırasında otomobil boyalarından, organik çözücüler, kimyasal reaksiyon ürünleri ve bazı ayrışma ürünleri gibi çıkışlar olur. Bunlar gaz bacalarında duman ve koku problemine sebep olurlar. Bunların önlenmesi için yeni boya teknolojilerinin kullanılmasının yanı sıra, bir çok kirlilik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır.

4.4.4 Oksidasyon

Yanabilir organik bileşikler uzaklaştırılması ile ilgili olarak oksidasyon (TO, CO, EO, RTO) egzost havasının veya havadaki gazın temizlenirken kullanılan en güvenli ve en yaygın metodudur. Burada gerekli olarak sıcaklık çeşitli faktörlere dayanmaktadır. Kirleticinin tipine, havanın oksijen içeriğine, ısıtma prosesinin süresine, oksidasyonu başlatan ve yardımcı vasıtaların varlığına bağlıdır. Havayı temizlemek için mali etkenler gibi ihtimallerin kapsamlı ısı kazanımlarında büyük önemi vardır.

4.4.4.1 TNV Santrali

TNV (Isıl Sonradan Yakma) Santrali boyahane tesisi kapsamında mevcut olan üç adet kurutma kabinlerinin ısıtılması için planlanmıştır. Yakılması gerekli egzost havası izoleli kanallar aracılığıyla TNV Santrali üzerinde bulunan egzost fanı vasıtası ile toplanır. Isı eşanjörlerini yalayarak geçen egzost havası, yakma hücresi ön ısıtmaya tabii tutulur ve yanma odasına ulaşarak reaksiyon sıcaklığına çıkar. Yakma işlemi için gerekli yanma havası basınçlı hava hattından alınır ve egzost havasıyla birlikte yakılır. Santralden çıkan sıcak hava eşanjörlerinden geçerek kurutma kabinine basılır.

Yeterli bir oksidasyonu belirleyen asıl faktörler aşağıdaki gibidir:

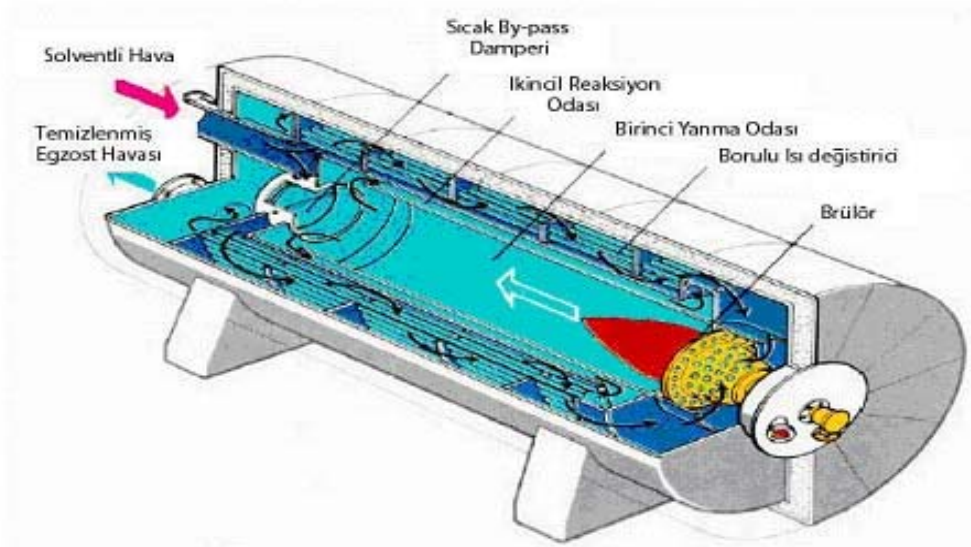
- Yanma odasındaki sıcaklık seviyesi

- Yanma odasındaki sıcaklığın odanın her noktasında aynı olması
- Yanma odasında ve yanma odasına gelmeden önce bileşimin karışımının yoğunluğu
- Yanma odasındaki radyasyonun yoğunluğu
- Kirleticinin tipi
- Egzost havasındaki oksijen içeriği

Isıl oksidasyonlu cihazları modern enerji maliyet anlayışı karşısında ısı geri kazanımsız düşünülemez. Bununla beraber ısı geri kazanımı, teknik olarak artan kirli havanın yakılması başta geldiğinden ısı ve enerjinin tasarrufu ikinci olarak düşünülmektedir. Isı geri kazanımı kavramı bahsedilen sıraya göre ayarlanmıştır.

Isı geri kazanımının tipini ve büyüklüğünü dikkate aldığımızda sorularımıza bireysel olarak yanıt alabiliriz. En genel şekliyle ısı geri kazanımı, temizlenmiş olan havanın egzost havasının ön ısıtıcısından geçerken ısısını bırakmasıdır. Egzost havasının artan sıcaklığı temizleme ünitesinde ısı enerjisi olarak almasıdır. Bu eşanjör bununla beraber, teknik olarak ve yapıldığı malzemeye göre sınırlanmaktadır. Ön ısıtma yaparken kirli havanın kendiliğinden alev alması ve bunun sonucu olan sıcaklık artışı insineratörün her noktasında istenmeyen bir durumdur. Bu kontrolsüz ve eşanjöre zarar verebilecek bir durumdur. Bunu önlemek için yanma odasına ek yakıt göndererek tam yanma sağlanmalıdır.

Kirli hava yanma odasında yakıldıktan sonra egzost havası eşanjörün temizlenmiş hava kısmının girişine doğru yönelir. Ve borulardan geçerek çıkış hava kanalına doğru ilerler (Şekil 4.4).

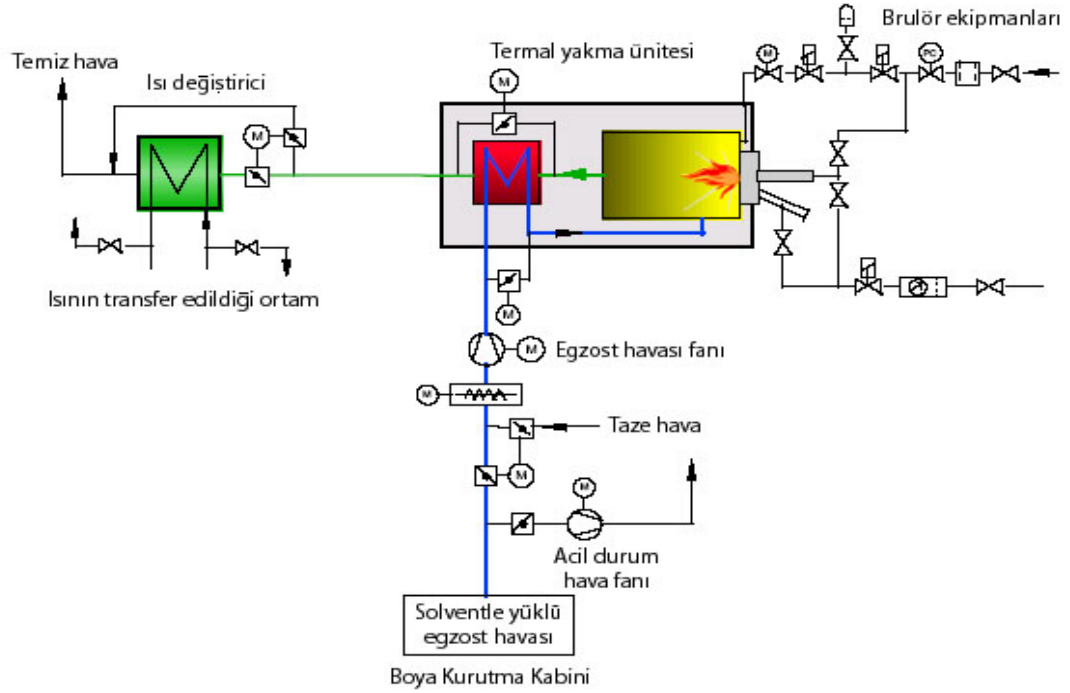


Şekil 4.4 Reküperatif termal insineratörün kısımları

Bu tasarımın avantajları:

- Cihazın bütün parçaları, özellikle borulu eşanjörün levhalarını kontrol etmek ve bakımını yapmak için kolayca ulaşılabilir.
- Eşanjörün boruları cihazın arka kısmına sabitlenmiştir. Borular aksiyal olarak hareket ederek eşanjörü ısıl gerilmelere karşı korunmuştur.
- Yanma odasının çelik kasası sıcak gazlar tarafından hem içten hem dıştan çevrenmiştir.
- Ek bağlantıların by-pass yapmasının kaçınılması çeşitli kirlilik konsantrasyonuna sahip olan hava için cihaz intibak sağlayabilmekte ve ek ısı geri kazanım sistemi oluşturmaktadır.

Referans alınan nokta kirleticilerin ısıl değeri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır: Her bir Nm^3 egzost havasındaki 1 g hidrokarbon yaklaşık olarak $25\text{ }^\circ\text{C}$ lik sıcaklık artışı elde edilmektedir. Şekil 4.5 'te Termal insineratör ünitesi tesisatının tüm ekipmanlarıyla birlikte sistem şemasını görmekteyiz. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 'da Reküperatif termal insineratörlerin Otomotivde kullanılan uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.5 Termal insineratör ünitesi tesisatının tüm ekipmanlarıyla birlikte sistem şeması

4.4.4.2 RNV Santrali

Isı geri kazanımlı baca gazları yakma sistemi (Şekil 4.6). Boyalı araç, fırında kurutulurken çıkan atık gazlar, toplanarak sisteme seramik dolgu kısmından girer atık gazlar zig zag bir yapıda olan seramik dolgudan yanma odasına gelirken ısınır. Yanma odasında $800\text{ }^\circ\text{C}$ de

yakılan gazlar CO_2 , NO_x ve su buharına dönüşür. Sıcaklığı yüksek olan yanmış gazlar seramik dolguya sıcaklığını vererek bacaya ulaşır. Böylece ısı geri kazanılmış olur, zararsız hale gelmiş gazlarda atmosfere verilir.



Şekil 4.6 Rejeneratif termal insineratörün uygulama örneği



Şekil 4.7 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan termal insineratörler (Dürr Environmental Technology, 2005)



Şekil 4.8 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan bir başka termal insineratör cihazı ve sıcak hava kanalları (Dürr Environmental Technology, 2005)



Şekil 4.9 Boya kurutma fırını baca gazlarını yakmada kullanılan termal insineratör cihazının tüm üniteleriyle birlikte dış ortama yerleştirildiği bir uygulama

5. TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI (Çengel, 2000)

Termodinamiğin birinci yasası bir sistemde enerjinin bir şekilden diğerine dönüşümü ile ilgilidir ve bu dönüşümler sonucunda sistemin toplam enerjisinin değişmeyeceğini ifade eder. Bu yasa enerjinin korunumu ilkesi olarak ta adlandırılmaktadır. Bu yasaya göre enerji yoktan var, vardan da yok edilemez, ancak şekil değiştirebilir. Bizde bundan (enerji dönüşümlerinden) faydalanarak ısıyı hareket ediyor ve cisimleri hareket ettiriyoruz. Buhar makineleri, diğer ısı üretim makineleri ve yakıtlı motorlar hepsi bu yasanın öngördüğü şekilde enerjinin işe dönüştürülmesinden faydalanarak çalışmaktadır.

Termodinamik sistemlerin analizinde sistem sınırlarını belirlemek çok önemlidir, belirlenen sistem sınırına göre, sistem kapalı sistem veya açık sistem olarak incelenebilmektedir. Sistem sınırlarının uygun bir şekilde seçilmesi hesapların basitleştirilmesini sağlamaktadır.

Temel olarak, sistem sınırları içerisinde sistem içine veya dışına kütle transferi oluyorsa sistem, "açık sistem" olarak tanımlanır, olmuyorsa sistem "kapalı sistem" olarak tanımlanmaktadır.

Şimdi sırasıyla kapalı ve açık sistemler için birinci yasa ifadesinin en genel haliyle analizlerini gerçekleştirelim.

5.1 Kapalı Sistemler İçin Birinci Yasa Analizi

Bu çalışmanın tamamında kontrol hacmine giren ısı pozitif, giren iş negatif, kontrol hacminden çıkan ısı negatif, çıkan iş pozitif işaretli olarak kabul edilecektir.

Termodinamiğin birinci yasasının genel ifadesi;

$$\partial Q - \partial W = \Delta E \quad (5.1)$$

1 denge halinden 2 denge haline geçerken herhangi bir kapalı sistem için termodinamiğin birinci yasa ifadesi;

$$\int_1^2 \partial Q - \int_1^2 \partial W = E_2 - E_1 \quad (5.2)$$

$$Q_{1,2} - W_{1,2} = (U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) \quad (5.3)$$

şeklindedir.

5.2 Açık Sistemler İçin Birinci Yasa Analizi (Çengel, 2000)

Yaptığımız çalışma gereği açık sistemleri sürekli akışlı sürekli açık sistemler (SASA) olarak kabul ederek analizlerimizi bu varsayım üzerinden gerçekleştireceğiz. Sürekli akışlı sürekli açık sistemde akışkanın kontrol hacminden sürekli bir akışı söz konusudur. Akışkanın özellikleri kontrol hacmi sınırları içinde, bir noktadan diğerine değişiklik gösterebilir. Zaten tanım içinde geçen sürekli sözcüğüyle zamanla değişmeyen anlamı belirtilmektedir. Sürekli akışlı açık sistemlerle ilgili aşağıdaki yargılarda bulunulabilir;

- Kontrol hacmi içerisinde yeğin ve yaygın hiçbir özellik zamanla değişmez. Böylece kontrol hacminin, kütlesi, hacmi ve toplam enerjisi, sürekli akışlı sürekli açık sistemlerde sabit kalır. Bu yargının bir sonucu olarak ta, hacim sabit olduğundan bu sistemlerde sınır işi de sifira eşittir.
- Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmez. Bu nedenle giren ve çıkan akışkanların özellikleri zamana göre sabittir.
- Sürekli akışlı sürekli açık sistemlerin çevresiyle ısı ve iş etkileşimi zamanla değişmez. Bu nedenle sistemin birim zamanda çevresiyle yaptığı ısı alışverişi veya birim zamanda yaptığı iş sabittir.

5.2.1 Süreklilik Denklemi

Denklem 5.4 'de en genel haliyle açık sistemler için süreklilik ifadesi verilmiştir.

$$\sum_{\text{giren}} \dot{m} - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad (5.4)$$

Yukarıdaki eşitliğin sol tarafı kontrol hacmi içerisindeki kütle transferini, sağ taraf ise kontrol hacmi içerisindeki kütle miktarı değişimini ifade etmektedir.

Sürekli-akışlı-sürekli-açık sistemlerde süreklilik ifadesi kütle korunumu ilkesi olarak adlandırılır. Sürekli-akışlı-sürekli-açık sistemlerde kontrol hacmi içerisindeki toplam kütle zamanla değişmez. Bu kütle korunumu ilkesinin bir gereğidir. Bu durumda kütle korunumu ilkesi gereğince, kontrol hacmine giren toplam kütle, kontrol hacminden çıkan toplam kütleyle eşit olması gerekmektedir. Buna göre Sürekli-akışlı-sürekli-açık sistemlerde süreklilik yasası;

$$\sum_{\text{giren}} \dot{m} - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} = 0 \quad (5.5)$$

şeklını alır.

5.2.2 Açık Sistemler İçin Birinci Yasa Genel İfadesi

Açık sistemlerde birinci yasa ifadesinin en genel hali;

$$\sum_{\text{giren}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) + \dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5.6)$$

şeklindedir. Bu eşitliğin sol tarafı kontrol hacmi içindeki enerji transferini, sağ taraf ise kontrol hacmi içindeki enerji miktarı değişimini ifade eder. Sürekli-akışlı-sürekli-açık sistemlerde kontrol hacmi içerisindeki enerji miktarı değişimi sıfırdır. Buna göre, sürekli-akışlı-sürekli-açık sistemler için termodinamiğin birinci yasası;

$$\sum_{\text{giren}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) + Q - W = 0 \quad (5.7)$$

şeklını alır.

6. TERMODİNAMİK SİSTEMLERDE İKİNCİ YASA KAVRAMI (Çengel, 2000)

Çeşitli enerji türlerinin birbirine eşdeğer miktarda dönüştüğünü belirleyen termodinamiğin birinci yasası, enerji türlerinin birbirlerine kendiliğinden dönüştürme eğilimleri hakkında bir sınırlama getirmemektedir. Oysa, diğer enerji türleri kendiliğinden ısıya dönüştüğü halde, ısı diğer enerji türlerine kendiliğinden dönüşmemektedir. Buna benzer olarak doğada gerçekleşen bir çok olayda tek yönlüdür.

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin bir formdan diğer bir forma dönüşümü ile ilgili iken, ikinci yasa bu dönüşümün ne oranda olabileceği ile ilgilidir. Birinci yasa hal değişimlerinin yönü üzerinde herhangi bir kısıtlama koymaz, ancak birinci yasanın sağlanması hal değişimlerinin gerçekleşeceği anlamına da gelmemektedir. Bir hal değişiminin olup olmayacağı konusundaki birinci yasanın yetersizliği, ikinci yasa ile kapatılabilmektedir.

Kısaca ikinci yasa; bir süreç içinde gerekli toplam enerji sabit kaldığı halde, sürtünme ve benzeri temaslar yüzünden kullanılabilir enerji azalmaktadır ve bunun sonucu olarak yüzde yüzlük verimle çalışan bir makina yapılamaz.

Termodinamiğin ikinci yasası, fiziğe geri döndürülemez (tersinmez) olaylar düşüncesini getirdi. Bu yasaya göre fiziksel hadiselerde geri döndürülemez belirli bir eğilim vardır. Örneğin, bir bardak sıcak çay etrafına ısı vererek soğur ve hiç bir zaman çayımız verdiği ısıya kendiliğinden toplayıp eski haline gelmez. Yukarıdan serbest bırakılan bir top yerden sekip bırakıldığı yüksekliğe kadar çıkmayı başaramaz. Bir pervaneyi ne kadar hızlı çevirirsek çevirelim, çevirme işlemini bıraktıktan bir müddet sonra durur ve hiç bir zaman da sürtünmeye harcadığı enerjisini toparlayıp tekrar dönmeye başlamaz. Bir odaya sıktığımız parfüm ilk önce yakın çevresi tarafından hissedilir, bir süre sonra karşı köşedeki arkadaşımız bile kokuyu alır, ama daha sonra koku gittikçe etkisini kaybeder ve parfüm zerrecikleri atmosferde dağılıp gider. Hiç bir zaman odadan çıkmama söz konusu olamaz, geri dönüşsüz evrensel eğilimin etkisinde bir harekete mecbur kalır.

Bütün bu saydığımız süreçlerin ortak yanı; belirli bir doğrultuda, düzenden düzensizliğe, bütünden yayılmaya, kullanılır olabilirlikten kullanılamazlığa doğru, yol almalarıdır.

R.Clausius bu evrensel eğilime entropi ismini verdi ve matematiksel bir ifadesini oluşturmayı başardı. Entropi Yunanca kökenli bir kelime olup "Bir sistemin düzensizlik derecesinin ölçüsü" manasında kullanılır.

İkinci yasa kısaca entropi artışı olarak özetlenebilir. Bütün varlıkların, eninde sonunda entropisi artmaktadır. Kainattaki olayların tümü yukarıda saydığımız gibi geri dönüşümlü

olmayan olaylardır. Bizi ısıtan ve aydınlatan güneş bir bardak sıcak çay gibi ısını tüketmektedir. İçinde bulunduğumuz Samanyolu galaksisi ve diğer galaksiler bir odaya sıktığımız parfümün zerrecikleri gibi birbirlerinden hızla uzaklaşmaktadırlar. Kısacası evrenin entropisi sürekli olarak artmaktadır.

Sürekli enerji kaybından dolayı eninde sonunda evrenin entropisi maksimum değere ulaşacaktır. Bu andan itibaren evrenin her yeri aynı sıcaklık ve yoğunlukta olacak. Bu maksimum düzensizlik halinde iş yapacak kullanılabilir enerji olmadığından bütün fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler duracaktır. Bu umutsuz tabloya bilim adamları "Isı ölümü" adını verirler.

Fiziğin en temel yasalarından birisi olan "Termodinamiğin İkinci yasası", evrende kendi haline, doğal şartlara bırakılan tüm sistemlerin, zamanla doğru orantılı olarak düzensizliğe, dağınıklığa ve bozulmaya doğru gideceğini söyler. Canlı, cansız bütün her şey zaman içinde aşınır, bozulur, çürür, parçalanır ve dağılır. Bu, er ya da geç her varlığın karşılaşacağı mutlak sondur ve söz konusu yasaya göre bu kaçınılmaz sürecin geri dönüşü yoktur.

Bir olayın kendiliğinden olup veya olmaması veya ısı ve iş arasındaki kalite farkı ancak termodinamiğin ikinci yasaya dayandırılarak açıklanabilmektedir. Termodinamiğin ikinci yasası, ısı makineleri ve soğutma makineleri gibi temel mühendislik sistemlerinin verimlerinin üst veya kurumsal sınırını ve kimyasal reaksiyonların hangi oranlarda gerçekleşeceklerini belirler. Sistemlerde enerjinin niteliğini korumak çok önemlidir, ikinci yasa enerjinin niteliğini ve bir hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koymaktadır.

Termodinamiğin ikinci yasasına göre ısı işe dönüştüren hiçbir güç makinesinin verimi %100 olamaz, yani ısının tamamı işe çevrilemez. Benzer şekilde, "bir ortamı çevre sıcaklığının altına soğutabilmek için ikinci bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır." ve " Isı sıcaklığın düşük olduğu bir ortamdan yüksek olduğu bir ortama dışarıdan herhangi bir yardım almadan kendiliğinden geçemez." ifadeleri de termodinamiğin ikinci yasasının sonuçlarındandır.

6.1 Entropi

Entropi, enerjinin kalitesini, kullanılabilirliğini belirleyen termodinamik bir özelliktir. Termodinamik sistemlerin entropi değişiminin bilinmesi, sistemin entropisinin bilinmesinden daha önemli ve daha kullanışlıdır.

Bütün tersinir hal değişimleri için entropinin genel ifadesi;

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (6.1)$$

Sistem 1 halinden tersinir bir hal değişimi ile 2 haline gelirse;

$$S_2 - S_1 = \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right]_{\text{tersinir}} \quad (6.2)$$

olur.

6.1.1 Mükemmel Gazların Entropi Değişimi

Gazların özgül ısıları ve özgül hacimleri genellikle sıcaklıkla değişir. Ancak hesapları basitleştirmek için bu özellikler küçük sıcaklık aralarında aritmetik ortalamaları alınarak sabit kabul edilebilir. Sabit özgül ısı ve özgül hacim değerleri için özgül entropi değişimi ifadeleri;

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6.3)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6.4)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6.5)$$

6.1.2 Mükemmel Gazların Tersinir Politropik Hal Değişimi

Mükemmel gazlarda; $PV = mRT$ ve politropik hal değişimlerinde; $PV^n = \text{sabit}$ böylece, mükemmel gazların entropi değişimi;

$$S_2 - S_1 = \frac{m(nc_v - c_p)}{n-1} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (6.6)$$

(6.6) denklemi $n \neq 1$ ve $T_1 \neq T_2$ durumlarında kullanılabilir.

6.2 Entropinin Artışı İlkesi

Bir hal değişimi sırasında ayrıık bir sistemin entropisi her zaman artar, ancak hal değişiminin Tersinir olması durumunda sabit kalmaktadır. Başka bir deyişle, ayrıık bir sistemin entropisi hiçbir zaman azalmaz.

Yukarıdaki anlatım entropinin artışı ilkesini açıklamanın bir yoludur. Isı geçişi olmadığı zaman, entropi değişimi sadece tersinmezliklerden kaynaklanır ve bu etki her zaman entropiyi artırma yönündedir. Entropinin artışı ilkesi kapalı sistemlere ve açık sistemlere uygulanabilecek genel bir ifadedir, çünkü her zaman bir sistem ve çevresi ayrık bir sistem oluşturur. Bu bağıntı bir hal değişiminde toplam entropi değişiminin artı veya sıfıra eşit olabileceğini vurgulamaktadır. Gerçek bir hal değişimi tersinir değildir, bu nedenle gerçekleşen her hal değişimi toplam entropinin biraz daha artmasına neden olmaktadır.

Tersinir bir hal değişimi sonucu sistemin entropi değişimini veren (6.2) ifadesi, hal değişiminin tersinmez olduğu durumda (6.7) haline dönüşür;

$$S_2 - S_1 > \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right] \quad (6.7)$$

Yukarıdaki ifadedeki eşitsizliği gidermek için, eşitsizliğin sağ tarafına sistemde oluşan entropi üretimini simgeleyen $S_{\text{üret}}$ terimini ekleyelim;

$$S_2 - S_1 > \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right] + S_{\text{üret}} \quad (6.8)$$

buradan;

$$S_{\text{üret}} = (S_2 - S_1) - \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right] \quad (6.9)$$

Yukarıdaki ifadelerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

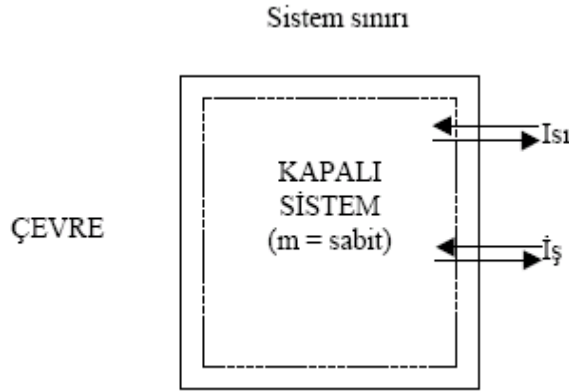
- Tersinir işlemlerde entropi üretimi sıfırdır.
- Tersinmez işlemlerde entropi üretimi sıfırdan büyüktür.
- Bir işlemde entropi üretimi ne kadar büyükse, işlemin tersinmezliği o kadar fazladır.
- Entropi üretimi hal değişimi sırasında izlenen yola bağlıdır ve termodinamik bir özellik değildir. Entropi değişimi ise yoldan bağımsızdır ve termodinamik bir özellik olup entropi üretimi ile karıştırılmamalıdır.
- Entropi üretimi sıfırdan küçük olamaz.
- Verimi en yüksek olan çevrimler tersinir hal değişimlerinden oluşan çevrimlerdir. Dolayısıyla, bir çevrimin verimini yükseltmek için çevremizdeki tersinmezliklerin azaltılması, yani entropi üretiminin minimize edilmesi gerekmektedir.

- Termodinamiğin birinci yasasından "enerji yok edilemez ve yoktan da var edilemez" sonucu çıkarken, termodinamiğin ikinci yasasından "entropi yoktan var edilebilir ama asla yok edilemez" sonucu çıkar.

6.2.1 Kapalı Sistemlerde Entropi Üretimi

Kapalı bir sistemin sınırlarından kütle girişi ve çıkışı olmamaktadır. Bu nedenle entropi değişimi sistemin ilk ve son hallerindeki entropileri arasındaki farktır. Kapalı bir sistemdeki entropi değişimi, ısı geçişiyle alakalı olan sistem sınırındaki entropi transferi ile sistem sınırları içerisindeki entropi üretimine bağlıdır.

Kapalı bir sistemin hal değişimi sırasındaki entropi değişimi, sistem sınırlarından transfer olan entropi ile sistem sınırları içinde tersinmezliklerden dolayı üretilen entropinin toplam miktarına eşittir. Kapalı sistemle ilgili olarak anlatılanların şematik bir gösterimi Şekil 6.1 'de görülmektedir.



Şekil 6.1 Kapalı sistemin şematik şekli

Yukarıdaki anlatılanların matematiksel ifadesi en genel haliyle denklem (6.10)'da verilmektedir.

$$S_{\text{üret}} = (S_2 - S_1) - \left[\int_1^2 \frac{dQ}{T} \right]_{\text{tersinir}} \geq 0 \quad (6.10)$$

Yukarıdaki ifadede, eşitlik tersinir işlemlerde, eşitsizlik ise tersinmez işlemlerde geçerlidir.

Kapalı sistemlerde entropi üretimi için genel tanım;

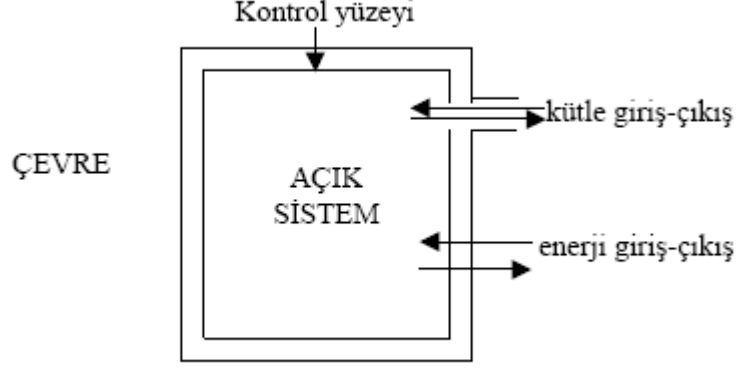
$$\left(\begin{array}{c} \text{Sistemin} \\ \text{Entropi} \\ \text{Üretimi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Sistemin} \\ \text{Entropi} \\ \text{Değişimi} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Sistemin} \\ \text{Sınırlarındaki} \\ \text{Entropi} \\ \text{Transferi} \end{array} \right)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

6.2.2 Açık Sistemlerde Entropi Üretimi (Çengel, 2000)

Şekil 6.2 'de örnek bir açık sistem şematik şekli verilmiştir.

$$\dot{S}_{üret} = \frac{\partial S}{\partial t} - \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum \dot{m} s - \sum \dot{m} s \geq 0 \quad (6.11)$$



Şekil 6.2 Açık sistemin şematik şekli

Denklem (6.11)'de; eşitlik tersinir işlemlerde, eşitsizlik ise tersinmez işlemlerde geçerlidir.

6.3 Ekserji (Kullanılabilir Enerji) Kavramı (Çengel, 2000)

Bir sistemde, içinde bulunduğu çevre ile termodinamik dengede ise çevre ile sistem arasında herhangi bir ısı ve iş etkileşimi gerçekleşmez. Bu hale "Ölü hal" denir. Ölü haldeki sistemler iş üretemez. Ölü halde bulunan sistemler 0 (sıfır) indisi ile gösterilmektedir.

Bütün işlemlerin tersinir olduğu ideal hal değişimleri ile elde edilen işe tersinir iş adı verilmektedir. Güç üretme sistemlerinde tersinir iş, bir sistemin ilk halden son hale geçerken yaptığı maksimum iştir.

Bir sistemin hareketli sınır işinin bir kısmı çevreye karşı yapıldığından; sistemin ilk halden son hale geçerken yaptığı maksimum işten (tersinir iş), çevreye karşı yapılan iş çıkarılarak "maksimum faydalı" iş bulunmaktadır.

Verilen bir haldeki sistemin sadece çevresi ile etkileşimde bulunarak ölü hale geçmesi sonucu elde edilebilecek maksimum faydalı iş; sistemin kullanılabilir enerjisi, kullanılabilirliği veya ekserji denilmektedir. Bu durumda, faydalı işin maksimum olması için sistemdeki bütün işlemlerin tersinir olması gerektiği görülmektedir.

Enerji ile kullanılabilir enerji (ekserji) arasında bazı farklar vardır:

- Enerji yok edilemez, kullanılabilir enerji ise yok edilebilir.
- Kullanılabilir enerji, sistemin bütün halleri için sıfırdan büyük veya sıfıra eşittir.
- Kullanılabilir enerji, sistemin bulunduğu halin ölü hale göre sapmasını gösterir
- Kullanılabilir enerji, sistemler arasında transfer edilebilir ve içlerindeki tersinmezliklerde yok edilebilir.

Ekserjinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki verilerin bilinmesi gerekmektedir;

- Çevrenin, sıcaklık, basınç ve kimyasal kompozisyonun belirtilmesi,
- Tersinir bir prosesin varlığının kabul edilmesi gerekir.

6.3.1 Kapalı Sistemlerde İkinci Yasa Çözümlemesi (Çengel, 2000)

Sistem sadece çevreyle ısı alışverişinde bulunmakta, başka bir ısı enerji deposuyla ısı alışverişine izin verilmemektedir. Kapalı sistemin ayrıca hareketsiz olduğu kabul edilmekte, bu nedenle sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi değişmemektedir. İncelenen kapalı sistem için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları aşağıdaki gibi yazılabilir :

Termodinamiğin birinci yasası:

$$Q - W = U_2 - U_1 \quad (6.12)$$

Termodinamiğin ikinci yasası:

$$S_{\text{üretim}} = (S_2 - S_1)_{\text{sistem}} + \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} \quad (6.13)$$

Burada $T_{\text{çevre}} = T_0$, $Q_{\text{çevre}} = -Q$ olup, $S_{\text{üretim}}$ hal değişimi sırasındaki toplam entropi üretimi, başka bir deyişle toplam entropi değişimidir. Bu iki denklem arasında ısı geçişi terimi yok edilir ve W çözümlürse,

$$W = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) - T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.14)$$

elde edilir. W , hal değişimi sırasında gerçekleşen toplam iştir. Hal değişimi sırasında sistemin hacmi değişirse, bu işin bir bölümü çevreye karşı (veya tarafından) yapılacaktır. Bu durumda gerçek işle çevre işinin arasındaki fark olan yararlı iş aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W_y = W - W_{\text{çevre}} = W - P_0(V_2 - V_1) \quad (6.15)$$

veya

$$W_y = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2) - T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.16)$$

W_y , 1-2 hal değişimi sırasında kapalı sistem tarafından (veya üzerinde) yapılan yararlı iş olup, yukarıdaki denklemde ilk ve son hallerdeki sistem özellikleri, çevre özellikleri (P_0 , T_0) ve hal değişimi sırasında üretilen entropiyle ifade edilmiştir.

Bu kez aynı sistem, aynı ilk ve son haller arasında ve aynı çevre ortamında tersinir bir hal değişiminden geçsin. Başka bir deyişle, sistemle çevre arasındaki ısı alışverişi tersinir olarak gerçekteşsin ve sistem içinde sürtünme ve benzeri tersinmezlikler olmasın. Tersinir hal değişimleri sırasında entropi üretimi yoktur, bu nedenle $S_{\text{üretim}} = 0$ bulunur. Bu hal değişimi sırasında yapılan yararlı iş, tersinir iştir ve (6.16) numaralı denklemde entropi üretim terimi $S_{\text{üretim}}$ 'i sıfıra eşitleyerek elde edilir:

$$W_{\text{tr}} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2) \quad (6.17)$$

Bu denklem, T_0 sıcaklık ve P_0 basınçta bulunan çevresiyle ısı alışverişi olan kapalı sistemin 1 ve 2 halleri arasındaki hal değişimi sırasında yapabileceği en çok yararlı işi vermektedir.

Kapalı sistem kullanılabilirliği (6.17) numaralı denklemde 1 halini verilen hal (indissiz) ile, 2 halini de ölü hal (0 indisi) ile değiştirerek elde edilir:

$$\Phi = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P_0(V - V_0) \quad (6.18a)$$

veya

$$\phi = (u - u_0) - T_0(s - s_0) + p_0(v - v_0) \quad (6.18b)$$

Bu denklemlerden, kapalı sistemin ölü haldeki ($u = u_0$, $s = s_0$, $v = v_0$) kullanılabilirliğinin sıfır olduğu açıkça görölmektedir. Başka bir deyişle, çevresiyle dengede bulunan bir sistemden iş elde etmek olanaksızdır.

1 ve 2 halleri arasındaki bir hal değişimi için tersinir iş, kullanılabilirlikle de ifade edilebilir:

$$W_{\text{tr}} = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (6.19a)$$

veya

$$w_{\text{tr}} = \phi_1 - \phi_2 \quad (6.19b)$$

Sözlü anlatımla, kapalı bir sistemle ilgili tersinir iş, kapalı sistemin kullanılabilirliğindeki azalma (veya sıkıştırma durumunda artma) olmaktadır. Bunu (6.18a) numaralı denklemi ilk ve son haller için yazıp, bulunan iki denklemin farkını alarak göstermek olasıdır. Son halin ölü olması durumunda ($\Phi_2 = 0$), kapalı sistemin ilk haldeki kullanılabilirliği (Φ_1) ve hal değişimi sırasındaki tersinir iş (W_{tr}) eşit olurlar. Kullanılabilirliğin hal ile, tersinir işin ise hal değişimi ile ilişkili olduğu vurgulanmalıdır.

Kapalı bir sistemin hal değişimiyle ilişkili tersinmezlik aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I = W_{tr} - W_y = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.20a)$$

$$i = w_{tr} - w_y = T_0 s_{\text{üretim}} \quad (6.20b)$$

6.3.2 Açık Sistemlerin Sürekli Akışlı İkinci Yasa Çözümlemesi

Sürekli akışlı açık bir sistem ele alınsın. Sisteme birden çok giriş çıkışın olabileceği ve sistemin P_0 basıncında ve T_0 sıcaklığındaki çevre ortamlarıyla ısı alışverişinde bulunabileceği kabul edilsin. Sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları aşağıdaki gibi yazılabilir.

Termodinamiğin birinci yasası:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (6.21)$$

Termodinamiğin ikinci yasası:

$$\dot{W} = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta - T_0 s_\zeta \right) - T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.22)$$

bulunur. Bu denklemle verilen \dot{W} , açık sistemde yapılan gerçek iştir, bu aynı zamanda yararlı işe eşittir, çünkü sürekli akışlı açık sistemlerin sınırları sabit olup çevre işi söz konusu değildir.

Tersinir iş, yukarıdaki denklemde toplam entropi üretimi terimi $\dot{S}_{\text{üretim}}$ sıfıra eşitlenerek bulunur.

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta - T_0 s_\zeta \right) \quad (6.23)$$

Sürekli akışlı açık sistemin bir giriş ve bir çıkışı varsa, yukarıdaki denklem basitleştirilebilir:

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m} \left[(h_g - h_\zeta) - T_0 (s_g - s_\zeta) + \frac{V_g^2 - V_\zeta^2}{2} + g(z_g - z_\zeta) \right] \quad (6.24a)$$

Veya sistemden geçen birim kütle için:

$$w_{tr} = (h_g - h_\zeta) - T_0 (s_g - s_\zeta) + \frac{V_g^2 - V_\zeta^2}{2} + g(z_g - z_\zeta) \quad (6.24b)$$

$$= T_0 \Delta s - \Delta h - \Delta ke - \Delta pe \quad (6.24c)$$

Akış kullanılabilirliği (6.24) numaralı denklemde giriş hali indissiz olarak, çıkış hali de ölü hal olmak üzere 0 indisiyle gösterilirse, ($V_0 = 0$, $z_0 = 0$):

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V_2^2}{2} + gz \quad (6.25)$$

elde edilir. Bu bağıntıdan yararlanarak, tersinir işi akış kullanılabilirliğiyle göstermek mümkündür.

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\phi \psi_\phi \quad (6.26)$$

Bir giriş ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistem için,

$$w_{tr} = \psi_g - \psi_\phi \quad (6.27a)$$

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m}(\psi_g - \psi_\phi) \quad (6.27b)$$

elde edilir. Bir açık sistemde birim zamanda tersinmezlik \dot{I} veya birim kütle için tersinmezlik i , tersinir işle yararlı iş arasındaki farktır:

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (6.28)$$

Birim kütle için tersinmezlik ise (6.20b) numaralı denklemin aynıdır:

$$i = w_{tr} - w_y = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.29)$$

Sürekli akışlı açık sistemle çevre ortam dışındaki cisimler arasında ısı geçişi, kapalı sistemler için verilen yöntem uygulanarak gözönüne alınabilir. Örneğin, sürekli akışlı açık sistemle T_R sıcaklığındaki bir ısıl enerji deposu arasında \dot{Q}_R miktarında ısı geçişi oluyorsa, tersinir iş bağıntısı açık sistem için birinci ve ikinci yasa denklemlerini yazıp, çevreyle ısı geçişini gösteren terimi yok ederek bulunur:

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\phi \psi_\phi - \dot{Q}_R \left(1 - \frac{T_0}{T_R} \right) \quad (6.30)$$

6.3.3 Zamanla Değişen Açık Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlemesi

Kontrol hacmi 1 halinden 2 haline geçen düzgün akışlı dengeli bir açık sistem oluşturmaktadır. Kontrol hacmine, özellikleri zamanla ve giriş kesiti üzerinde değişmeyen kütle girişi (g) ve kütle çıkışı (ç) olabilmektedir. Kontrol hacmine kütle birden çok noktadan

girip çıkabilmekte ve kontrol hacmi P_0 basıncında, T_0 sıcaklığındaki çevreyle ısı alışverişinde bulunabilmektedir. Düzgün akışlı dengeli açık sistem için termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları aşağıda gösterildiği gibidir:

$$Q - W = \sum m_{\dot{c}} \left(h_{\dot{c}} + \frac{V_{\dot{c}}^2}{2} + gz_{\dot{c}} \right) - \sum m_{\dot{g}} \left(h_{\dot{g}} + \frac{V_{\dot{g}}^2}{2} + gz_{\dot{g}} \right) + (U_2 - U_1) \quad (6.31)$$

ve

$$S_{\text{üretim}} = (S_2 - S_1) + \sum m_{\dot{c}} s_{\dot{c}} - \sum m_{\dot{g}} s_{\dot{g}} + \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_0} \quad (6.32)$$

Burada $Q_{\text{çevre}} = -Q$ ve $S_{\text{üretim}}$, süreç içinde açık sistemin toplam entropi üretimi olmaktadır. Daha önce yapıldığı gibi bu denklemleri kullanarak ısı geçişi terimleri yok edilir ve W çözülürse,

$$W = \sum m_{\dot{g}} \left(h_{\dot{g}} + \frac{V_{\dot{g}}^2}{2} + gz_{\dot{g}} - T_0 s_{\dot{g}} \right) - \sum m_{\dot{c}} \left(h_{\dot{c}} + \frac{V_{\dot{c}}^2}{2} + gz_{\dot{c}} - T_0 s_{\dot{c}} \right) + (U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) - T_0 S_{\text{üretim}} \quad (6.33)$$

elde edilir. Bu denklem açık sistemin gerçek işini vermektedir. Düzgün akışlı dengeli açık sistemde hareketli sınırlar ve buna bağlı olarak çevre işi, $W_{\text{çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$ olabilir. Elde edilebilecek en çok yararlı iş olan tersinir iş, çevre işini yukarıdaki denklemden çıkarıp entropi üretimi $S_{\text{üretim}}$ 'i sıfıra eşitleyerek bulunur:

$$W = \sum m_{\dot{g}} \left(h_{\dot{g}} + \frac{V_{\dot{g}}^2}{2} + gz_{\dot{g}} - T_0 s_{\dot{g}} \right) - \sum m_{\dot{c}} \left(h_{\dot{c}} + \frac{V_{\dot{c}}^2}{2} + gz_{\dot{c}} - T_0 s_{\dot{c}} \right) + (U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) + P_0 (V_1 - V_2) \quad (6.34)$$

Kapalı sistem kullanılabilirliği ve akış kullanılabilirliği tanımlarından yararlanarak, tersinir işi veren (6.34) numaralı denklem şöyle yazılabilir:

$$W_{\text{tr}} = \sum m_{\dot{g}} \psi_{\dot{g}} - \sum m_{\dot{c}} \psi_{\dot{c}} + (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (6.35)$$

Düzgün akışlı dengeli bir açık sistemin verilen koşullarda kullanılabilirliği, açık sistemin gerçekleştirebileceği en büyük iş potansiyelidir. Bu da tersinir iş W_{tr} 'nin alabileceği en büyük (maksimum) değerdir. Bu değer (4.35) numaralı denklemden, kontrol hacminin son halini ve çıkış halini ölü hal kullanılabilirliğinin 0 olduğu hal, $\psi_{\dot{c}} = 0$ ve $\Phi_2 = 0$ olarak belirlenir:

$$\text{Kullanılabilirlik} = W_{\text{tr,max}} = \sum m_{\dot{g}} \psi_{\dot{g}} + \Phi_1 \quad (6.36)$$

Düzgün akışlı dengeli bir açık sistemle ilgili tersinmezlik I, tersinir işle yararlı iş arasındaki farktır: (6.20a numaralı denklem):

$$I = W_{tr} - W_y = T_0 S_{üretim}$$

Düzgün akışlı bir açık sistemle çevre ortam dışındaki cisimler arasındaki ısı geçişi, kapalı sistemler ve sürekli akışlı açık sistemler için verilen yöntemle gözönüne alınabilir.

6.3.4 Termodinamik Sistemlerde İkinci Yasa Verimi

Birinci yasa verimi mühendislik yaklaşımlarında her zaman doğru sonuç vermeyerek, bazen bizim yanlış değerlendirmeler yapmamıza neden olabilmektedir. Bu nedenle birinci yasa veriminin mühendislik problemlerinde tek başına bir ölçek olamayacağı anlaşılmaktadır. Bu yanlışları önleyebilmek için ise ikinci yasa (ekserji) veriminin tanımlanması öngörülmüştür.

İkinci yasa verimi, sistemdeki gerçek ısıl verimin, aynı şartlarda olabilecek en yüksek (tersinir) ısıl verime oranı olarak tanımlanmıştır. İkinci yasa verimi, makinadan elde edilen yararlı işin elde edilebilecek en çok işe (tersinir) oranı olarak da tanımlanabilir. İkinci yasa veriminin % 100 den daha büyük olamayacağı bilinmelidir.

Daha genel bir ikinci yasa veriminin tanımlamasını yaparsak; ikinci yasa verimini tanımlamaktaki amaç tersinir hal değişimlerine hangi ölçüde yaklaşıldığını belirtmektir. Bu bakımdan ikinci yasa veriminin değeri en kötü durumda sıfır (kullanılabilirliğin tümüyle yok edilmesi), en iyi durumda bir (kullanılabilirliğin tümüyle korunması) olacaktır.

İkinci yasa verimi, yakıtın kaçta kaçının ürüne kaçta kaçının boşa (bozunum ve kayıp olarak) harcandığını gösterir. Bu sayede benzer tesisler termodinamik açıdan kıyaslanabilir.

Herhangi bir tesisin ikinci yasa verimini elde etmek için öncelikli olarak bu tesisi meydana getiren elemanların verimleri çıkartılır. Daha sonrada bu elemanlar birleştirilerek, tesisin ikinci yasa verimi bulunur. Hesabını yapacağımız boya kurutma fırını için bu elemanlar: Kurutma kabini, termal insineratör ve eşanjörlerdir.

6.3.5 Kimyasal Ekserji (Bejan, 1997)

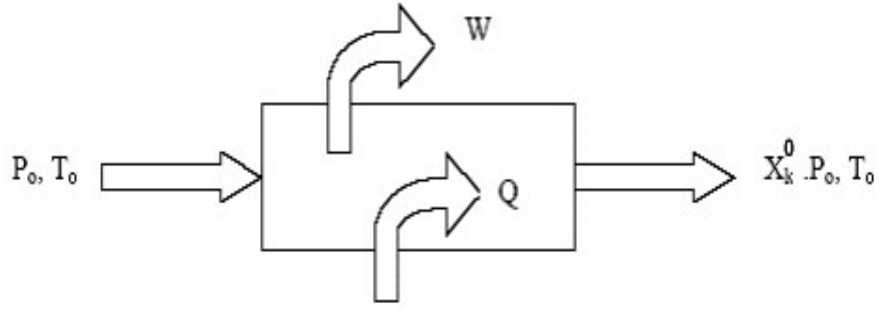
Sistem sınırlandırılmış ölü duruma geldikten sonra ölü hale geçerken elde edilebilecek ekserji, kimyasal ekserjidir. Kimyasal ekserjinin hesaplanabilmesi için sistemi oluşturan maddelerin ve çevrenin içeriğinin bilinmesi çok önemlidir. Çevre kendi içersinde dengeli kabul edilir. Çevre şartları her yerde aynı olmadığı için standart bir çevre durumu kabul edilmiştir. Çevrenin standart sıcaklığı $T_0 = 298^\circ\text{K}$ ve basıncı $P_0 = 1 \text{ atm}$ dir. Bu durumda hesaplanan

ekserji standart kimyasal ekserjidir. Çeşitli maddeler için standart ekserji değerleri hesaplanmış ve tablolar haline getirilmiştir. Hesaplamalarda bu tabloların kullanılması hesap kolaylığı sağlar.

Gaz karışımlarının standart kimyasal ekserjisi hesaplanırken çevre için gaz olarak hava alınır. Havanın içeriğinde N_2 , O_2 , CO_2 , $H_2O_{(g)}$ ve diğer gazlar vardır. Herhangi bir k gazı T_0 sıcaklığında ise kısmi basıncı :

$$P_k^0 = x_k^0 P_0 \quad (6.37)$$

Denklemden 0 indisi çevreyi, x_k gazın mol oranı simgeler.



Şekil 6.3 İzotermal genişlemeyle sistemin hal değişimi

Şekil 6.3 'te sisteme gaz P_0 , T_0 şartlarında girip izotermal olarak genişleme ile sistemden x_k^0, P_0 , T_0 şartlarında çıkmaktadır. Tersinmezlikler düşünülmez ve sistem tersinir alınırsa maksimum teorik iş kimyasal ekserjiye eşit olur.

$$e_k^{-Kim} = -\bar{R}T_0 \ln \frac{X_k^0 P_0}{P_0} = -\bar{R}T_0 \ln X_k^0 \quad (6.38)$$

N tane gazdan oluşan karışım için de, bunların çevrede gaz halinde bulunması durumunda benzer hesaplama yapılabilir. Böylece her mol gaz için maksimum teorik iş :

$$e_k^{-Kim} = -\bar{R}T_0 \ln \frac{X_k^0}{X_k} \quad (6.39)$$

Bütün bileşenler için yazılırsa :

$$e^{-Kim} = -\bar{R}T_0 \sum X_k \ln \frac{X_k^0}{X_k} \quad (6.40)$$

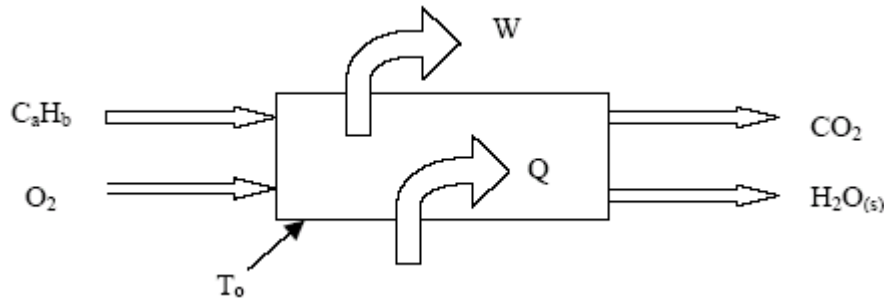
Bu da şu şekilde yazılabilir :

$$e^{-Kim} = \sum X_k e_k^{-Kim} + \bar{R}T_0 \sum X_k \ln X_k \quad (6.41)$$

Bu ifade bütün gaz karışımlarına uygulanabilir ve ideal olmayan gaz karışımlarına da genişletilebilir. Denklemdaki standart kimyasal ekserjiler tablolardan alınır.

Yakıtların kimyasal ekserjileri hesaplanmak istendiğinde prensip olarak, çevrede bulunmayan maddelerin standart kimyasal ekserjisi, standart kimyasal ekserjisi bilinen maddeler yardımı ile hesaplanır. Şekil 6.4 'te, yanma odasındaki akış verilmiştir. Burada yakıt C_aH_b şeklinde bir hidrokarbon olarak tanımlanıp, sistemde O_2 ile yakılmakta ve CO_2 ile sıvı H_2O oluşmaktadır.

Giriş ve çıkış şartları P_0, T_0 olup ısı transferi sadece T_0 sıcaklığında meydana gelmektedir.



Şekil 6.4 Yanma odasındaki akış

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \frac{\dot{Q}}{\dot{n}_f} - \left(\frac{\dot{W}}{\dot{n}_f}\right)_{ter} + e_y^{-Kim} + \left(a + \frac{b}{4}\right) e_{O_2}^{-Kim} - a e_{CO_2}^{-Kim} - \frac{b}{2} e_{H_2O}^{-Kim} - \dot{E}_D \quad (6.42)$$

Burada :

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \frac{\dot{Q}}{\dot{n}_f} = 0 \text{ ve tersinir olmasından dolayı } \dot{E}_D = 0 \text{ dır. Denklem düzenlenirse :}$$

$$e_y^{-Kim} = \left(\frac{\dot{W}}{\dot{n}_f}\right)_{ter} - \left(a + \frac{b}{4}\right) e_{O_2}^{-Kim} + a e_{CO_2}^{-Kim} + \frac{b}{2} e_{H_2O}^{-Kim} \text{ olur.}$$

$$\left(\frac{\dot{W}}{\dot{n}_f}\right)_{ter} = \overline{UID}_{(T_0, P_0)} - T_0 \left(\bar{S}_y + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{S}_{O_2} + a \bar{S}_{CO_2} + \frac{b}{2} \bar{S}_{H_2O} \right) \text{ olduğuna göre denklem :}$$

$$e_y^{-Kim} = \overline{UID}_{(T_0, P_0)} - T_0 \left(\bar{S}_y + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{S}_{O_2} + a \bar{S}_{CO_2} + \frac{b}{2} \bar{S}_{H_2O} \right)_{(T_0, P_0)} + \left\{ - \left(a + \frac{b}{4}\right) e_{O_2}^{-Kim} + a e_{CO_2}^{-Kim} + \frac{b}{2} e_{H_2O}^{-Kim} \right\}$$

olacaktır. Seçilen çevre denklemin sağ tarafındaki parantez içini etkileyecektir.

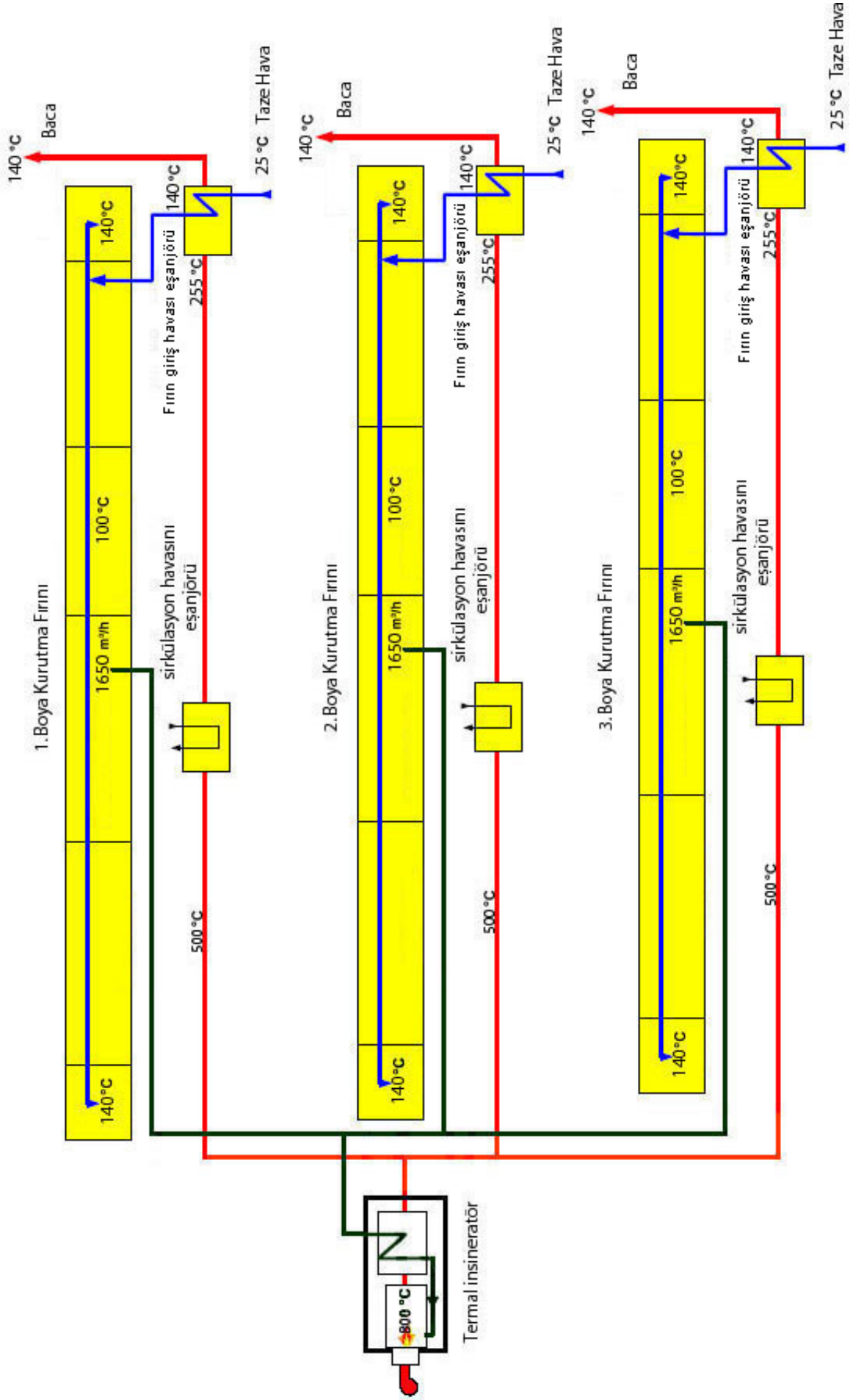
7. OTOMOTİVDE KULLANILAN BOYA KURUTMA FIRINININ EKSERJİ ANALİZİ

Bu çalışmada Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikasında 1993 yılından beri mevcut; faal durumda olan 3 adet yan yana yerleştirilmiş boya kurutma fırınının tek bir reküperatif termal insineratör vasıtasıyla; kurutma kabini içerisinde oluşan çözücü emisyonunun yakılıp dış ortama atılması esnasında ısının geri kazanılarak fırınların ısıtılması sisteminin ısı hesapları ve ekserji analizleri yapılmıştır. Şekil 7.1 'deki sistem şemasından da görüldüğü gibi sistemin her bir hattında fırın iç ortamını ısıtmaya yarayan 1 adet eşanjör ve fırına alınan dış ortam havasını ısıtmak için 1 adet ön ısıtıcı olmak üzere sistemin tamamında 6 adet eşanjör mevcuttur. Sistemde araçlar 100°C 'lik fırın ortamında 1 saat süreyle kurutmaya tabi tutulmaktadır. Fırın ortamının bir ucundan girip kurutma işleminin sonunda fırının diğer ucundan kurumuş halde alınan araçların içinde bulunduğu sistem kesikli rejimde çalıştırılmaktadır. Kurumuş araç dışarı alındıktan sonra bir sonraki araç, ön buharlaşma evresinden geçirilip kurutma fırınına alınarak, yeni araçla birlikte kısa sürede rejime girmektedir. Fırın iç sıcaklığına çıkan araç yüzeyinde mevcut olan çözücü % 100 buharlaştırılarak montaj hattına gönderilebilecek şekle getirilmesi aracın imalat aşamasının tamamlamasındaki son halkayı oluşturmaktadır. Araç yüzeyine uygulanan boyanın albeniliğini de sergilediğinden dolayı araca uygulanan kurutma işleminin sürekliliği bu nedenle önem teşkil etmektedir.

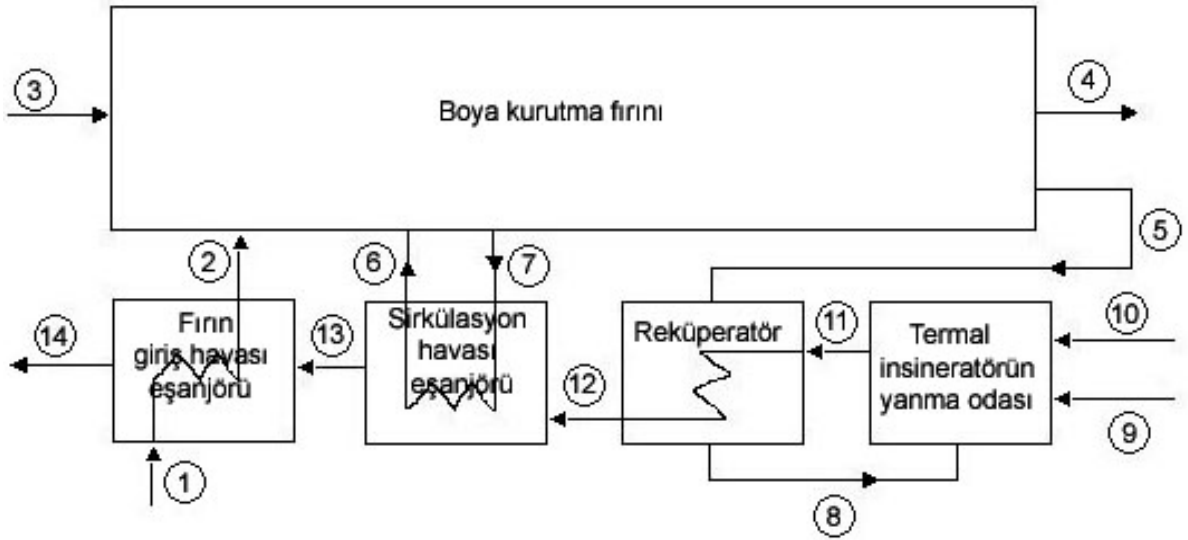
Şekil 7.2 'de numaralandırılmış akış şeması görülen sistem hesaplarını 5 kısımda incelenecektir:

- A. Boya kurutma fırını
- B. Termal insineratörün yanma odası
- C. Termal insineratörün reküperatörü
- D. Sirkülasyon havası eşanjörü
- E. Fırın giriş havası eşanjörü

Şekil 7.2 'de ki numaralandırılmış olan akış şemasının sıcaklık değerleriyle beraber karşılık gelen kısımları Çizelge 7.1 'de gösterilmiştir. Bundan sonraki tüm gösterimlerde bu kısımlara karşılık gelen numaralarla gösterilecektir. Bu akım şemasındaki tüm kısımların hacimsal ve kütleli debi, sıcaklık, özgül ısı, öz kütle değerleri Çizelge 7.2 'de gösterilmiştir. Bu değerler tüm hesaplamalardaki değerlerin tablo haline getirilmiş şeklidir.



Şekil 7.1 Ekserji analizi yapılacak sistemin şematik gösterimi



Şekil 7.2 Ekserji analizi yapılacak sistemdeki tüm giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Çizelge 7.1 Sistemin numaralı akım şemasında karşılık gelen kısımların sıcaklık değerleriyle beraber gösterilişi

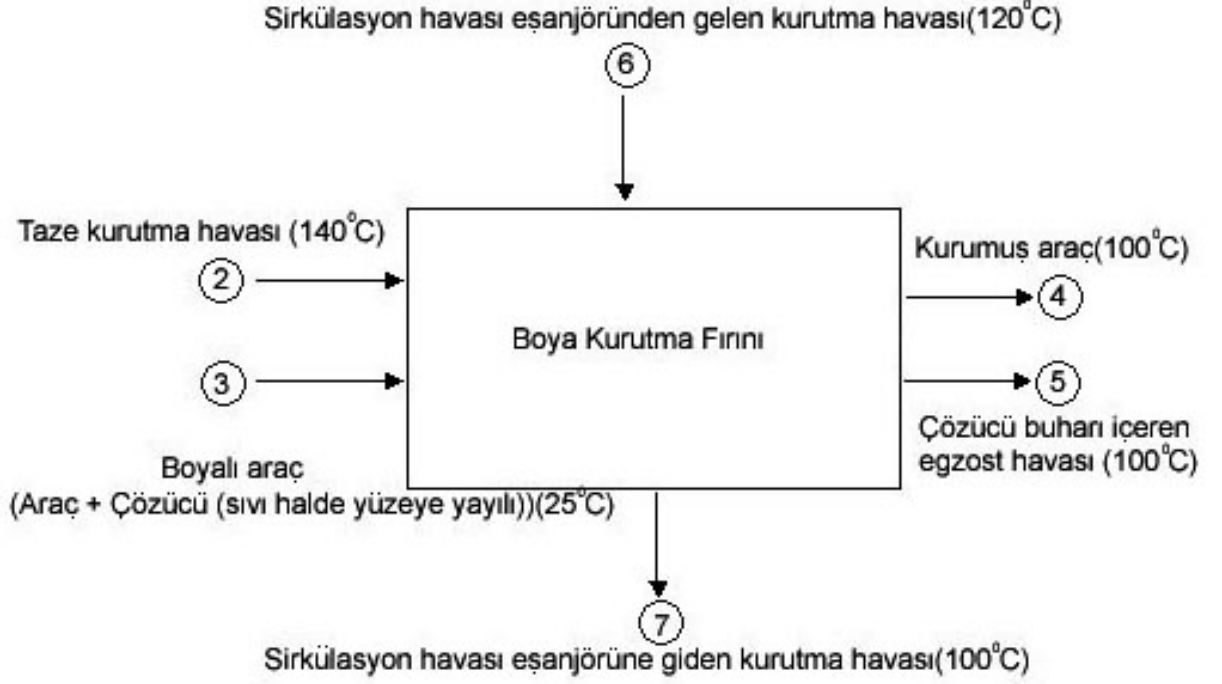
1	Taze kurutma havası (25°C)
2	Taze kurutma havası (140°C)
3	Boyalı araç (Araç+Çözücü (sıvı halde yüzeye yayılı)) (25°C)
4	Kurumuş araç (100°C)
5	Çözücü buharı içeren egzost havası (100°C)
5T	Her üç kabinden gelen çözücü buharı içeren egzost havası (100°C) (akım şemasında gösterilmedi)
6	Sirkülasyon havası eşanjöründen gelen kurutma havası (120°C)
7	Sirkülasyon havası eşanjörüne giden kurutma havası (100°C)
8	Çözücü buharı içeren egzost havası (400°C)
9	Yakma havası (25°C)
10	Doğalgaz (25°C)
11	Aritılmış hava (800°C)
12	Aritılmış hava (500°C)
12T	Her üç kabinin eşanjörlerine dağılacak olan arıtılmış hava (500°C) (akım şemasında gösterilmedi)
13	Aritılmış hava (255°C)
14	Baca (140°C)

Çizelge 7.2 Sistemin numaralı akım şemasında karşılık gelen kısımların hacımsal ve kütlelel debi, sıcaklık, özgül ısı, öz kütle değerleri (Çengel, 2000)

Akımın tanımı	\mathcal{Q} (m ³ /h)	\dot{m} (kg/h)	T (°K)	c (kJ/kgK)	ρ (kg/m ³)
1	1167,8	1402,5	298	1,006	1,201
2	1650	1402,5	413	1,015	0,85
3	-	5006	298	-	-
4	-	5000	373	0,465	-
5	1492	1402,5	373	1,01	0,94
5T	4476,1	4207,5	373	1,01	0,94
6	20000	17600	393	1,013	0,88
7	18723,4	17600	373	1,01	0,94
8	8415	4207,5	373	1,075	0,5
9	284,4	341,6	298	-	1,201
10	27	19,82	298	-	0,734
11	13071,2	4574,92	1073	1,16	0,35
12	10166,5	4574,92	773	1,097	0,45
12T	3388,9	1525	773	1,097	0,45
13	2382,8	1525	528	1,04	0,64
14	1794,1	1525	413	4,015	0,85
s1	-	6	298	1,62	-
s2	-	6	373	1,34	-

7.1 Boya Kurutma Fırını

Şekil 7.3 'te, akım şeması verilen boya kurutma fırınına alınan ve yaş ürün olarak adlandırdığımız boyalı aracın yüzeyindeki çözücü, sıvı durumda yüzeyde yayılı bulunmaktadır. Daha sonra kurutma işleminin başlamasıyla, iç ortamda çözücü buharı miktarı artan hava; termal insineratörde yakılır. Yanma sonucu oluşan egzost havası eşanjörlerden geçirilerek; sürekli bir sirkülasyon sonucu 120°C 'lik bir sıcaklıkta kurutma fırınına verilip sıcaklığını her noktada homojen olarak 100°C 'de tutulmaya çalışılmaktadır. Böylece kurutma fırınındaki kurutma havasından maksimum verim elde edilir. İç ortamda 20000 m³/h sirküle olan kurutma havası sıcaklığının artmasının ve bu artmanın neden olacağı parlama ve patlama tehlikelerinin önüne geçmek amacı ile ortama 1650 m³/h taze hava alınmakta ve aynı miktardaki egzost havası olarak termal insineratöre gönderilmektedir. Tüm bu kurutma işlemleri sonunda yüzeydeki çözücüsü % 100 olarak buharlaştırılan kuru araç dışarı alınır. İncelediğimiz bu sistemlerde kesikli kurutma gerçekleştiği için yüzeylerden ısı kaybı mümkün olduğunca azaltılmış ve yaptığımız hesaplarda bunun ihmal edilebilecek düzeyde olduğu bulunmuştur. Sistemde 3 adet boya kurutma fırını bulunmaktadır.



Şekil 7.3 Boya kurutma fırınına giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Kütlenin korunumu :

Aşağıdaki veriler Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikası boyahanesinin mevcut sistemine göre hazırlanmıştır.

$$\dot{V}_2 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Taze kurutma havası)}$$

$$\dot{V}_6 = 20000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Eşanjörden gelen kurutma havası)}$$

Kurutma kabineye yukarıdaki hacimsal debi değerlerinde giren sıcak kurutma havası, bünyesindeki ısıyı vererek sıcaklığı düştükçe yoğunluğu; ve dolayısıyla hacminde değişiklik olacaktır. Gazlarda bu hacim değişikliği oldukça büyüktür (Çengel, 2000; Boya katalogları). Aşağıda bulunan kütle değerlerinde bu durum göz önünde bulundurularak gerekli dönüşümler yapılmıştır.

Buna göre;

$$\dot{V}_5 = 1492 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Egzost havası)}$$

$$\dot{V}_7 = 18723,4 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Eşanjöre giden kurutma havası)}$$

Yukarıdaki hacim değerlerinin kütle değerlerini elde edersek;

$$\dot{m}_2 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,85 \text{ kg/m}^3 = 1402,5 \text{ kg/h} \text{ (Taze kurutma havası)} \quad T_2 = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_{s1} + \dot{m}_a = 5006 \text{ kg/h} \text{ (Kurutulacak olan boyalı araç)} \quad T_3 = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

$$\dot{m}_{s1} = 6 \text{ kg/h (Araç üzerindeki boyanın içerisinde bulunan çözücü miktarı) } T_{s1} = 25^\circ\text{C (298 K)}$$

$$\dot{m}_{s2} = 6 \text{ kg/h (Araç üzerinden buharlaşan çözücü miktarı) } T_{s2} = 100^\circ\text{C (373 K)}$$

$$\dot{m}_4 = 5000 \text{ kg/h (Aracın kütlesi) } T_4 = 100^\circ\text{C (373 K) (ancak aracın fırına ilk girdiği sıcaklık } T_4 = 25^\circ\text{C (298 K) 'dir.)}$$

$$\dot{m}_5 = 1492 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,94 \text{ kg/m}^3 = 1402,5 \text{ kg/h (Egzost havası) } T_5 = 100^\circ\text{C (373 K)}$$

$$\dot{m}_6 = 20000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,88 \text{ kg/m}^3 = 17600 \text{ kg/h (Eşanjörden gelen kurutma havası) } T_6 = 120^\circ\text{C (393 K)}$$

$$\dot{m}_7 = 18723,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,94 \text{ kg/m}^3 = 17600 \text{ kg/h (Eşanjöre giden kurutma havası) } T_7 = 100^\circ\text{C (373 K)}$$

Şekil 7.3 'te görülen 3 numaralı giriş $\dot{m}_{s1} + \dot{m}_4$ 'dır; yani $\dot{m}_3 = \dot{m}_{s1} + \dot{m}_4$ olarak yazılacaktır. Araç üzerinden buharlaşan çözücü miktarı \dot{m}_{s2} 'de hesaplamalarda bağımsız bir kütle olarak düşünülemez. Bu sebeple sistemden atılan egzost havasının içeriğinde yer alacaktır. Ancak çözücü, sisteme girerken ve çıkarken farklılık meydana getirdiğinden dolayı s1 ve s2 indisleriyle gösterilerek hesaplamalardaki farklılığı da belirtme zorunluluğu vardır. Bunun yanı sıra yukarıda verilerden de $\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{s2}$ olduğu görülmektedir. Egzost havası ($\dot{m}_5 + \dot{m}_{s2}$), hava – çözücü karışımından oluşmaktadır. Kütle denkleminde bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (7.1)$$

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_6 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{s2}$$

$$(1402,5 + 5006 + 17600) \text{ kg/h} = (5000 + 1402,5 + 17600 + 6) \text{ kg/h}$$

$$24008,5 \text{ kg/h} = 24008,5 \text{ kg/h}$$

1. Yasa analizi :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi \theta_\varphi - \sum \dot{m}_g \theta_g \quad (7.2)$$

$$\theta = h + ke + pe \text{ (kJ/kg)} \quad (7.3)$$

$\dot{W} = 0$ (Kurutma kabiniinde herhangi bir mil işi olmadığı için yapılan iş sıfırdır.)

$\Delta ke = 0, \Delta pe = 0$ (Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir.)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi h_\varphi - \sum \dot{m}_g h_g \quad (7.4)$$

Aşağıda Boya kurutma fırınına giren ve çıkan maddelerin özgül ısıları ile sıcaklık değerleri verilmiştir (Çengel, 2000). c_{s1} , c_{s2} , c_4 , ρ çözücü, $\rho_{çelik}$ değerleri üretici firmanın ürünlerinde kullandığı malzemeler için kabul ettiği değerlerdir.

$$c_2 = 1,015 \text{ kJ/kgK}, T_2 = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$c_5 = 1,01 \text{ kJ/kgK}, T_5 = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$c_6 = 1,013 \text{ kJ/kgK}, T_6 = 120^\circ\text{C} \text{ (393 K)}$$

$$c_7 = 1,01 \text{ kJ/kgK}, T_7 = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$c_{s1} = 1,62 \text{ kJ/kgK}, T_{s1} = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

$$c_{s2} = 1,34 \text{ kJ/kgK}, T_{s2} = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$c_4 = 0,465 \text{ kJ/kgK}, T_4 = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$\rho_{\text{çözücü}} = 870 \text{ kg/m}^3, \rho_{\text{çelik}} = 7865 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = (\dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{s2} \cdot h_{s2}) - (\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{s1} \cdot h_{s1} + \dot{m}_{4(\text{giren})} \cdot h_4)$$

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_2 \cdot c_2 T_2 = (1402,5 \text{ kg/h})(1,015 \text{ kJ/kgK})(413 \text{ K}) / 3600 = 163,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_4 \cdot c_4 T_4 = (5000 \text{ kg/h})(0,465 \text{ kJ/kgK})(373 \text{ K}) / 3600 = 240,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_5 \cdot c_5 T_5 = (1402,5 \text{ kg/h})(1,01 \text{ kJ/kgK})(373 \text{ K}) / 3600 = 146,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_6 \cdot c_6 T_6 = (17600 \text{ kg/h})(1,013 \text{ kJ/kgK})(393 \text{ K}) / 3600 = 1946,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_7 \cdot h_7 = \dot{m}_7 \cdot c_7 T_7 = (17600 \text{ kg/h})(1,01 \text{ kJ/kgK})(373 \text{ K}) / 3600 = 1841,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{s1} \cdot h_{s1} = \dot{m}_{s1} \cdot c_{s1} T_{s1} = (6 \text{ kg/h})(1,62 \text{ kJ/kgK})(298 \text{ K}) / 3600 = 0,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{s2} \cdot h_{s2} = \dot{m}_{s2} \cdot c_{s2} T_{s2} = (6 \text{ kg/h})(1,34 \text{ kJ/kgK})(373 \text{ K}) / 3600 = 0,83 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{4(\text{giren})} \cdot h_4 = \dot{m}_{4(\text{giren})} \cdot c_4 T_4 = (5000 \text{ kg/h})(0,465 \text{ kJ/kgK})(298 \text{ K}) / 3600 = 192,5 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} - 0 = (240,9 + 146,8 + 1841,8 + 0,83) - (163,4 + 1946,4 + 0,8 + 192,5)$$

$$\dot{Q} = -72,8 \text{ kW} \text{ (çevreye transfer olan ısı miktarı)}$$

Toplam 3 adet Boya kurutma fırını bulunduğu göre;

$$\dot{Q} = -218,4 \text{ kW}$$

Ekserji analizi :

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\varphi \left(h_\varphi + \frac{v_\varphi^2}{2} + gz_\varphi - T_0 s_\varphi \right) \quad (7.5)$$

$\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (Çevre sıcaklığı, yapılan hesaplamalardan ve tablolardan alınan değerlerin referans alınan sıcaklık değeri)

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0 s_\varphi) \quad (7.6)$$

Entalpi ve entropi terimlerini özgül ısılarla ifade edersek;

$$\dot{m}_2 (c_2 T_2 - T_0 c_2 \ln \frac{T_2}{T_0}) = [1402,5 \text{ kg/h} [(1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot 413 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,38)] /$$

$$3600 = 125,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_6 (c_6 T_6 - T_0 c_6 \ln \frac{T_6}{T_0}) = [17600 \text{ kg/h} [(1,013 \text{ kJ/kgK} \cdot 393 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,013 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,31)] /$$

$$3600 = 1547,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{s1} (c_{s1} T_{s1} - T_0 c_{s1} \ln \frac{T_{s1}}{T_0}) = [6 \text{ kg/h} [(1,62 \text{ kJ/kgK} \cdot 298 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,62 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1)] / 3600$$

$$= 0,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{4(giren)} (c_4 T_{4(giren)} - T_0 c_4 \ln \frac{T_{4(giren)}}{T_0}) = [5000 \text{ kg/h} [(0,465 \text{ kJ/kgK} \cdot 298 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 0,465$$

$$\text{kJ/kgK} \cdot \ln 1)] / 3600 = 192,5 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) = (125,4 + 1547,8 + 0,8 + 192,5) = 1866,5 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_5 (c_5 T_5 - T_0 c_5 \ln \frac{T_5}{T_0}) = [1402,5 \text{ kg/h} [(1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)] /$$

$$3600 = 120,6 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_7 (c_7 T_7 - T_0 c_7 \ln \frac{T_7}{T_0}) = [17600 \text{ kg/h} [(1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)] /$$

$$3600 = 1513,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_4 (c_4 T_4 - T_0 c_4 \ln \frac{T_4}{T_0}) = [5000 \text{ kg/h} [(0,465 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 0,465 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)] /$$

$$3600 = 197,9 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{s2} (c_{s2} T_{s2} - T_0 c_{s2} \ln \frac{T_{s2}}{T_0}) = [6 \text{ kg/h} [(1,34 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,34 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)] /$$

$$3600 = 0,7 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0 s_\varphi) = (120,6 + 1513,4 + 197,9 + 0,7) = 1832,6 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{tr} = (1866,5 - 1832,6) = 33,9 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} = 33,9 \text{ kW}$$

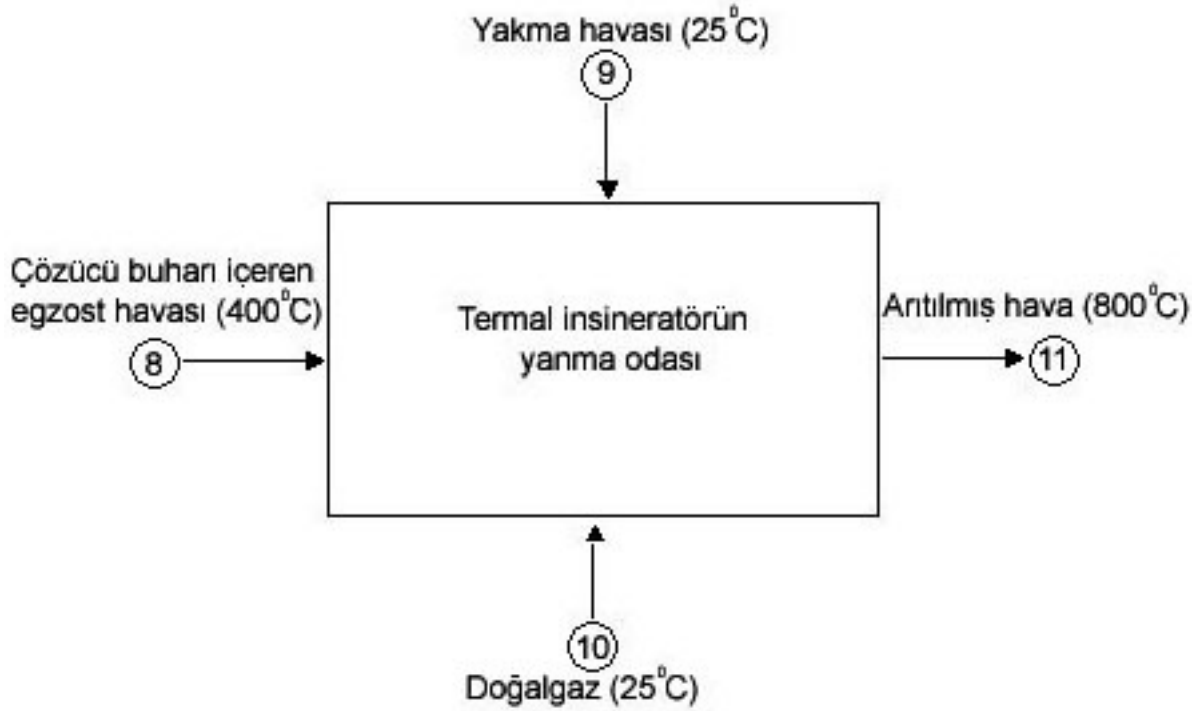
Toplam 3 adet Boya kurutma fırını bulunduğu göre toplam tersinmezlik;

$$\dot{I}_{top} = 101,7 \text{ kW}$$

Ekserji verimi :

$$\eta_{II} = 1 - \frac{\dot{I}}{h_{giren} - h_{çıkan}} = 1 - \frac{33,9}{2109,8 - 1988,6} = 0,72 \quad (7.7)$$

7.2. Termal İnsineratörün Yanma Odası



Şekil 7.4 Termal insineratörün yanma odasına giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Rekuperatif termal insineratör cihazı boya kurutma fırınının üst kısmında yer alır. Yanma ve rekuperasyon işlemlerinin gerçekleştiği iki ana kısmı bulunmaktadır. Bu cihazdaki ısı hesapları iki farklı kısımda incelenecektir. Sistemin amacı, Şekil 7.4 'te görülen yanma odası sistemde bulunan 3 adet kurutma fırınından gelen ve çözücü buhar içeren egzost havasını dışarıdan alınan ek yakma havası ve doğalgaz ile, düşük NO_x prensibine göre, 800°C de yakılarak VOC 'lerden artılmış bir şekilde bacaya göndermektedir. Yanma işlemi esnasında sisteme verdiğimiz yakma havası, egzost havasındaki çözücülerini temizleme amacıyla oluşturulacak yakma sisteminin özel olarak tasarlanmış bir cihaz tarafından sisteme verilmesini gerektirmektedir. Burada gerçekleştirilen yanma tam yanmaya yakın olarak ve

düşük NO_x prensibine göre gerçekleştirildiği için hesaplamalarımızda tam yanma olarak alınacaktır. Bu sistem için ekserji analizi yapılırken fiziksel ekserjinin yanı sıra kimyasal ekserji de hesaplanmıştır.

Kütlenin korunumu :

Aşağıdaki veriler Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikası boyahanesinin mevcut sistemine göre hazırlanmıştır.

$$\dot{Q}_8 = 8415 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Rekuperatörden gelen çözücü buharı içeren egzost havası)}$$

$$\dot{Q}_9 = 284,4 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Yakma havası)}$$

$$\dot{Q}_{10} = 27 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Yakılan doğalgaz miktarı)}$$

$$\dot{Q}_{11} = 13071,2 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Rekuperatöre giden artırılmış hava miktarı)}$$

verilen bu hacim değerlerine göre kütle denkleğini bulmak için kütle değerlerini hesaplırsak (Çengel, 2000);

$$\dot{m}_8 = 8415 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,5 \text{ kg/m}^3 = 4207,5 \text{ kg/h} \text{ (Rekuperatörden gelen çözücü buharı içeren egzost havası)} \quad T_8 = 400 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} 373 \text{ K)}$$

$$\dot{m}_9 = 284,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,201 \text{ kg/m}^3 = 341,6 \text{ kg/h} \text{ (Yakma havası)} \quad T_9 = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

$$\dot{m}_{10} = 27 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,734 \text{ kg/m}^3 = 19,82 \text{ kg/h} \text{ (Yakılan doğalgaz miktarı)} \quad T_{10} = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

Sisteme verdiğimiz doğalgaz ek yakıt gibi düşünüldüğünden dolayı sistemde yakılan toplam yakıt miktarı: $19,82 + 6$ (Araç üzerinden buharlaşan çözücü miktarı) = 25,82 kg/h olarak alınacaktır.

$$\dot{m}_{11} = 13071,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,35 \text{ kg/m}^3 = 4574,92 \text{ kg/h} \text{ (Rekuperatöre giden artırılmış hava miktarı)}$$

$$T_{11} = 800^\circ\text{C} \text{ (1073 K)}$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$$

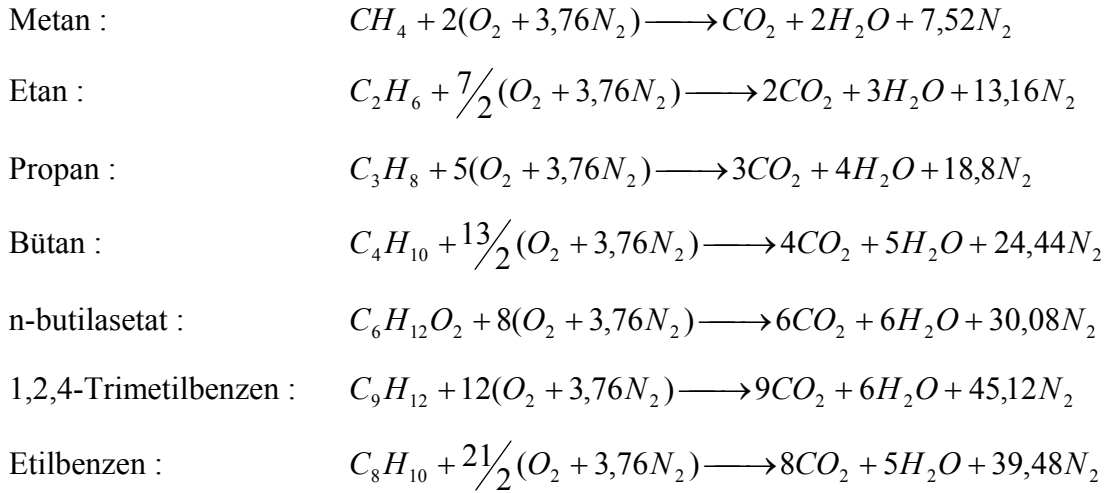
$$(4207,5 + 341,6 + 25,82) \text{ kg/h} = (4574,92) \text{ kg/h}$$

$$4574,92 \text{ kg/h} = 4574,92 \text{ kg/h}$$

1. Yasa analizi :

Yanma denklemleri :

Yanma işlemine giren her mol O₂ yanında $0,79/0,21 = 3,76$ mol N₂ bulunur.



Yukarıdaki yanma denklemleri verilen bileşiklerin oluşum, yanma ve çevre şartlarındaki standart entalpi değerleri Çizelge 7.3 'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.3 Sistemde reaksiyona giren ve çıkan bileşiklerin oluşum, yanma ve çevre şartlarındaki standart entalpi değerleri (Kotas ve Perry, 1995)

Giren ve çıkan bileşikler	Mol ağırlıkları (kmol)	\bar{h}_f^0 (kJ/kmol)	\bar{h}_{298K} (kJ/kmol)	\bar{h}_{1073} (kJ/kmol)
Metan (CH ₄)	16,043	-74520	-	-
Etan (C ₂ H ₆)	30,070	-83820	-	-
Propan (C ₃ H ₈)	44,097	-104680	-	-
Bütan (C ₄ H ₁₀)	58,123	-125790	-	-
n-Bütül asetat (C ₆ H ₁₂ O ₂)	120,194	-485600	-	-
1,2,4-Trimetil benzen (C ₉ H ₁₂)	116,160	-13800	-	-
Etil benzen (C ₈ H ₁₀)	106,167	29920	-	-
Oksijen (O ₂)	31,999	0	8682	31389
Azot (N ₂)	28,014	0	8669	29282
Karbondioksit (CO ₂)	44,010	-393520	9364	42769
Su (H ₂ O)	18,015	-241820	9904	35882

Burada yapılacak olan 1. yasa analizi, kimyasal reaksiyona giren sistemlerde kimyasal enerji değişimleri olduğu için, 1. yasa bağıntılarını kimyasal enerji değişimlerinin açıkça ifade edildiği bir biçimde yazmak daha yararlı olur.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum n_{\dot{c}} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_{\dot{c}} - \sum n_{\dot{g}} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_{\dot{g}} \quad (\text{kJ / kmol}) \quad (7.8)$$

$\dot{W} = 0$ (Yanma odasında herhangi bir mil işi olmadığı için yapılan iş sıfırdır.)

KE = 0, PE = 0 (Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir.)

Girenler :

1 kmol doğalgazın içeriğinin oranına bakarsak;

% 90 Metan (CH₄) : 0,9 kmol

% 5,3 Etan (C₂H₆) : 0,053 kmol

% 1 Propan (C₃H₈) : 0,01 kmol

% 0,4 Bütan (C₄H₁₀) : 0,004 kmol

Egzost havasının içerisindeki 1 kmol çözücü oranına bakarsak;

%50 n-Bütül asetat (C₆H₁₂O₂) :0,5 kmol

%25 1,2,4-Trimetil benzen (C₉H₁₂) :0,25 kmol

%25 Etil benzen (C₈H₁₀) :0,25 kmol

Ancak araç üzerine atılan 6 kg/h 'lık çözücünün tamamının buharlaştığı bunun yanında ek yakıt miktarının da 19,82 kg/h olarak bilindiğinden $6 / 19,82 \approx 0,3$ oranında çözücünün yakıt katkısı olmaktadır. Bu sebepten her bir çözücü bileşenin yanma hesabı yapılırken 0,3 'le çarpılması gerekmektedir.

n-Bütül asetat (C₆H₁₂O₂) : 0,5 . 0,3 = 0,15 kmol

1,2,4-Trimetil benzen (C₉H₁₂) : 0,25 . 0,3 = 0,075 kmol

Etil benzen (C₈H₁₀) : 0,25 . 0,3 = 0,075 kmol

O₂ : (2.0,9 + 3,5.0,053 + 5. 0,01 + 6,5.0,004 + 0,3 (8.0,5 + 12.0,25 +10,5. 0,25) = 4,9 kmol

bu katsayı aynı zamanda (O₂ + 3,76N₂) ifadesinin önündeki katsayıdır.

Çıkanlar :

CO₂ : (1.0,9 + 2.0,053 + 3. 0,01 + 4.0,004 + 0,3 (6.0,5 + 9.0,25 +8. 0,25) = 3,2 kmol

H₂O : (2.0,9 + 3.0,053 + 4. 0,01 + 5.0,004 + 0,3 (6.0,5 + 6.0,25 + 5.0,25) = 3,7 kmol

N₂ : (7,52.0,9 + 13,16.0,053 + 18,8. 0,01 + 24,44.0,004 + 0,3 (30,08.0,5 + 45,12.0,25 + 39,48.0,25) = 18,6 kmol

Buradaki gösterilen yanma ifadeleri tam yanma olarak kabul edilmiştir. Ayrıca insineratör NO_x oluşturmayacağı sıcaklıklarda tasarlığından dolayı NO_x 'in hiç oluşmadığını varsayılmıştır. "1 kmol O₂ + 3,76 kmol N₂ = 4,76 kmol hava" elde edilmektedir. Havanın mol ağırlığı 29 kg/kmol 'dür.

Hava yakıt oranı :

$$HY = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{4,9.4,76.29}{(0,9.16,043 + 0,053.30,070 + 0,01.44,097 + 0,004.58,123 + 0,3(0,5.116,160 + 0,25.120,194 + 0,25.106,167))} = 13,23 \text{ kg hava /kg yakıt}$$

Yanma işlemi sırasında yakılan her kg yakıt için 13,23 kg hava kullanılmaktadır. Buna göre;

Yakma havası = 25,82 kg/h . 13,23 = 341,6 kg/h yakma havası gereklidir. Bu da bize sisteme dışarıdan sağlanan ek yakma havası miktarı \dot{m}_9 'u vermektedir. Paydadaki değer 51,1 kg/kmol bize oluşturulan yakıt + çözücü karışımının birim kütleini vermektedir.

Bütün bu verileri kimyasal reaksiyonlar için yazılan (7.8) daki eşitlikte yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} \dot{Q} - 0 = & (3,2 \text{ kmol CO}_2)[(-393520 + 42769 - 9364) \text{ kJ/kmol CO}_2] + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})[(-241820 \\ & + 35882 - 9904) \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}] + (18,6 \text{ kmol N}_2)[(0 + 29282 - 8669) \text{ kJ/kmol N}_2] - (0,9 \text{ kmol} \\ & \text{CH}_4)[-74520 \text{ kJ/kmol CH}_4] - (0,053 \text{ kmol C}_2\text{H}_6)[-83820 \text{ kJ/kmol C}_2\text{H}_6] - (0,01 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)[- \\ & 104680 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8] - (0,004 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10})[-125790 \text{ kJ/kmol C}_4\text{H}_{10}] - (0,15 \text{ kmol} \\ & \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2)[-485600 \text{ kJ/kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2] - (0,075 \text{ kmol C}_9\text{H}_{12})[-13800 \text{ kJ/kmol C}_9\text{H}_{12}] - (0,075 \\ & \text{kmol C}_8\text{H}_{10})[29920 \text{ kJ/kmol C}_8\text{H}_{10}] - (4,9 \text{ kmol O}_2)[(0 + 31389 - 8682) \text{ kJ/kmol O}_2] \end{aligned}$$

$$\dot{Q} = -1534154,5 \text{ kJ/kmol}$$

Böylece 1 kmol yakıt + çözücü karışımı için yanma odasından çevreye 1534154,5 kJ/kmol ısı geçişi olmaktadır. Yakıt + çözücü karışımının birim kütlesi için bu değer ;
 $\frac{1534154,5 \text{ kJ/kmol}}{51,1 \text{ kg/kmol}} = 30022,6 \text{ kJ/kmol}$ olur.

Saatte yakılan yakıt + çözücü buharı miktarına (\dot{m}_{10}) göre çevreye transfer olan ısı miktarı ;

$$\dot{Q} = 25,82 \text{ kg/h} \cdot 30022,6 \text{ kJ/kg} / 3600 = 215,3 \text{ kW} \text{ (çevreye transfer olan ısı miktarı)}$$

Ekserji analizi :

$$\dot{W}_{tr} = \sum n_g \cdot \overline{g}_{f,g}^0 - \sum n_\zeta \cdot \overline{g}_{f,\zeta}^0 \quad (7.9)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{tr} = & n_{\text{CH}_4} \cdot \overline{g}_{f,\text{CH}_4}^0 + n_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_2\text{H}_6}^0 + n_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_3\text{H}_8}^0 + n_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_4\text{H}_{10}}^0 + n_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2}^0 + n_{\text{C}_9\text{H}_{12}} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_9\text{H}_{12}}^0 \\ & + n_{\text{C}_8\text{H}_{10}} \cdot \overline{g}_{f,\text{C}_8\text{H}_{10}}^0 + n_{\text{O}_2} \cdot \overline{g}_{f,\text{O}_2}^0 - n_{\text{CO}_2} \cdot \overline{g}_{f,\text{CO}_2}^0 - n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \overline{g}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 - n_{\text{N}_2} \cdot \overline{g}_{f,\text{N}_2}^0 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{KE} = 0, \Delta \text{PE} = 0, T_0 = 25^\circ\text{C}$$

Çizelge 7.4 'de ki değerleri (7.9) ve (7.10) 'da bulunan denklemlerde yerlerine koyarak fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri bulunur.

Çizelge 7.4 Sistemde reaksiyona giren ve çıkan bileşiklerin Gibbs oluşum fonksiyonu ve standart kimyasal ekserji değerleri (Kotas, 1995)

Giren ve çıkan bileşikler	\overline{g}_f^0 (kJ/kmol)	ε^0 (kJ/kmol)
Metan (CH ₄)	-50490	836,510
Etan (C ₂ H ₆)	-31920	1504,360
Propan (C ₃ H ₈)	-24390	2163,190
Bütan (C ₄ H ₁₀)	-16700	2818,930
n-Bütül asetat (C ₆ H ₁₂ O ₂)	-312600	3764,560
1,2,4-Trimetil benzen (C ₉ H ₁₂)	117100	5262,930
Etil benzen (C ₈ H ₁₀)	130730	4610,250
Oksijen (O ₂)	0	3,790
Azot (N ₂)	0	0,690
Karbondioksit (CO ₂)	-394370	20,140
Su (H ₂ O)	-228590	11,710

$$\dot{W}_{tr} = (3,2 \text{ kmol CO}_2)(-394370 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(-228590 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + (18,6 \text{ kmol N}_2)(0) - (0,9 \text{ kmol CH}_4)(-50490 \text{ kJ/kmol CH}_4) - (0,053 \text{ kmol C}_2\text{H}_6)(-31920 \text{ kJ/kmol C}_2\text{H}_6) - (0,01 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)(-24390 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8) - (0,004 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10})(-16700 \text{ kJ/kmol C}_4\text{H}_{10}) - (0,15 \text{ kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2)(-312600 \text{ kJ/kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2) - (0,075 \text{ kmol C}_9\text{H}_{12})(117100 \text{ kJ/kmol C}_9\text{H}_{12}) - (0,075 \text{ kmol C}_8\text{H}_{10})(130730 \text{ kJ/kmol C}_8\text{H}_{10}) - (4,9 \text{ kmol O}_2)(0)$$

$$\dot{W}_{tr} = 2032020,8 \text{ kJ/kmol}$$

$$\dot{W}_{tr,Chemical} = \sum n_g \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow g}^0 - \sum n_{\xi} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow \xi}^0 \quad (7.10)$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{tr,Chemical} = & n_{CH_4} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow CH_4}^0 + n_{C_2H_6} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_2H_6}^0 + n_{C_3H_8} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_3H_8}^0 + n_{C_4H_{10}} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_4H_{10}}^0 + n_{C_6H_{12}O_2} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_6H_{12}O_2}^0 \\ & + n_{C_9H_{12}} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_9H_{12}}^0 + n_{C_8H_{10}} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow C_8H_{10}}^0 + n_{O_2} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow O_2}^0 - n_{CO_2} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow CO_2}^0 - n_{H_2O} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow H_2O}^0 - n_{N_2} \cdot \overline{\mathcal{E}}_{chem \rightarrow N_2}^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{tr,Chemical} = & (3,2 \text{ kmol CO}_2)(20,14 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(11,71 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (18,6 \text{ kmol N}_2)(0,69 \text{ kJ/kmol N}_2) - (0,9 \text{ kmol CH}_4)(836,51 \text{ kJ/kmol CH}_4) - (0,053 \text{ kmol C}_2\text{H}_6)(1504,36 \text{ kJ/kmol C}_2\text{H}_6) \\ & - (0,01 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)(2163,19 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8) - (0,004 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10})(2818,93 \text{ kJ/kmol C}_4\text{H}_{10}) \\ & - (0,15 \text{ kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2)(3764,56 \text{ kJ/kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2) - (0,075 \end{aligned}$$

kmol C₉H₁₂)(5262,93 kJ/kmol C₉H₁₂) – (0,075 kmol C₈H₁₀)(4610,25 kJ/kmol C₈H₁₀) – (4,9 kmol O₂)(3,7 kJ/kmol O₂)

$$\dot{W}_{tr,Chemical} = 2068,2 \text{ kJ/kmol}$$

$$\dot{W}_{tr,toplam} = \dot{W}_{tr} + \dot{W}_{tr,Chemical} = 2034089 \text{ kJ/kmol}$$

Böylece 1 kmol yakıt + çözücü karışımı için yanma odasından çevreye 2034089 kJ/kmol ısı geçişi olmaktadır. Yakıt + çözücü karışımının birim kütlesi için bu değer ;

$$\frac{2034089 \text{ kJ/kmol}}{51,1 \text{ kg/kmol}} = 39806,05 \text{ kJ/kmol olur.}$$

Saatte yakılan yakıt + çözücü buharı miktarına (\dot{m}_{10}) göre çevreye transfer olan ısı miktarı ;

$$\dot{W}_{tr,toplam} = 25,82 \text{ kg/h} \cdot 39806,05 \text{ kJ/kg} / 3600 = 285,5 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} = 285,5 \text{ kW}$$

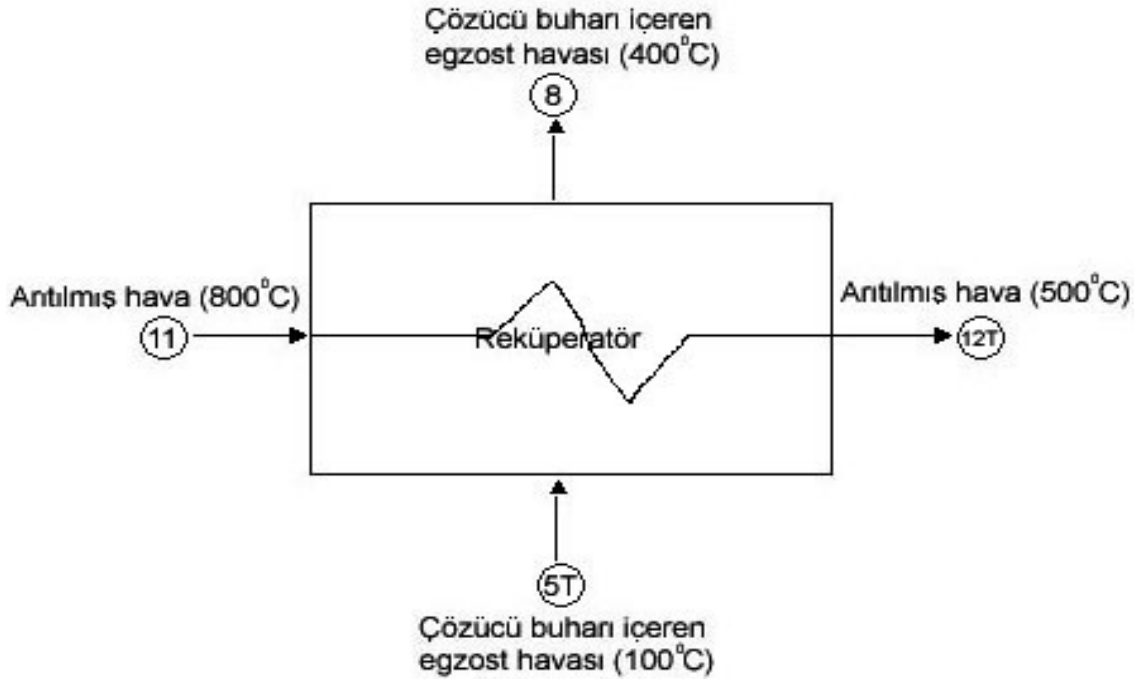
Ekserji verimi :

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{tr,toplamçkan} - \dot{W}_{tr,toplamgiren}}{\dot{W}_{tr,toplamçkan}} \quad (7.11)$$

$$\begin{aligned} & (3,2 \text{ kmol CO}_2)(-394370 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(-228590 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (3,2 \text{ kmol CO}_2)(20,14 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(11,71 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (18,6 \text{ kmol N}_2)(0,69 \text{ kJ/kmol N}_2) - (0,9 \text{ kmol CH}_4)(-50490 \text{ kJ/kmol CH}_4) - \\ & (0,053 \text{ kmol C}_2\text{H}_6)(-31920 \text{ kJ/kmol C}_2\text{H}_6) - (0,01 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)(-24390 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8) - \\ & (0,004 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10})(-16700 \text{ kJ/kmol C}_4\text{H}_{10}) - (0,15 \text{ kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2)(-312600 \text{ kJ/kmol} \\ & \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2) - (0,075 \text{ kmol C}_9\text{H}_{12})(117100 \text{ kJ/kmol C}_9\text{H}_{12}) - (0,075 \text{ kmol C}_8\text{H}_{10})(130730 \\ & \text{kJ/kmol C}_8\text{H}_{10}) - (0,9 \text{ kmol CH}_4)(836,51 \text{ kJ/kmol CH}_4) - (0,053 \text{ kmol C}_2\text{H}_6)(1504,36 \\ & \text{kJ/kmol C}_2\text{H}_6) - (0,01 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)(2163,19 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8) - (0,004 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10})(2818,93 \\ & \text{kJ/kmol C}_4\text{H}_{10}) - (0,15 \text{ kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2)(3764,56 \text{ kJ/kmol C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2) - (0,075 \text{ kmol C}_9\text{H}_{12}) \\ & (5262,93 \text{ kJ/kmol C}_9\text{H}_{12}) - (0,075 \text{ kmol C}_8\text{H}_{10})(4610,25 \text{ kJ/kmol C}_8\text{H}_{10}) - \\ & (4,9 \text{ kmol O}_2)(3,7 \text{ kJ/kmol O}_2) \\ \eta_{II} = & \frac{(3,2 \text{ kmol CO}_2)(-394370 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(-228590 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (3,2 \text{ kmol CO}_2)(20,14 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(11,71 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (18,6 \text{ kmol N}_2)(0,69 \text{ kJ/kmol N}_2)}{(3,2 \text{ kmol CO}_2)(-394370 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(-228590 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (3,2 \text{ kmol CO}_2)(20,14 \text{ kJ/kmol CO}_2) + (3,7 \text{ kmol H}_2\text{O})(11,71 \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}) + \\ & (18,6 \text{ kmol N}_2)(0,69 \text{ kJ/kmol N}_2)} \end{aligned}$$

$$\eta_{II} = \frac{(-2107646,4) - (-73557,4)}{(-2107646,4)} = 0,96$$

7.3 Termal İnsineratörün Reküperatörü



Şekil 7.5 Termal İnsineratörün Reküperatörüne giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Reküperatör, fırın sistemlerinde yanma sonucu oluşan gazların sistemden uzaklaştırılmadan önce sahip oldukları yüksek sıcaklığı sistemde kullanılacak olan havaya transfer etmesini sağlayan sistemlerdir. Şekil 7.5 'te görülen reküperatöre, 30 kW gücündeki bir fan vasıtasıyla, her 3 kurutma fırınından gelen egzost gazlarını düşük NO_x prensibine göre 800°C de yakarak bacaya göndermektedir. Burada kullanılan reküperatör borulu tipte dizayn edilmiştir. Tabi ki modern enerji anlayışına göre de bu yüksek sıcaklıktaki arıtılmış egzost havasındaki ısının geri kazanılması amacıyla termal insineratörün içerisindeki reküperatörden, sirkülasyon havası eşanjörü ve son olarak ta dış ortamdan alınan giriş havası ön ısıtıcısından geçirildikten sonra bacadan dışarı atılmaktadır.

Kütlenin korunumu :

Aşağıdaki veriler Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikası boyahanesinin mevcut sistemine göre hazırlanmıştır.

$$\dot{q}_{5T} = 4476,1 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Kurutma kabinlerinden gelen çözücü buharı içeren egzost havası(3 adet kurutma fırınının toplam çözücü buharı miktarı))}$$

$$\dot{q}_8 = 8415 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Yanma odasına giden çözücü buharı içeren egzost havası)}$$

$$\dot{q}_{11} = 13071,2 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Yanma odasına gelen arıtılmış egzost havası)}$$

$\dot{Q}_{12T} = 10166,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (Bacaya giden artırılmış hava miktarı(3 adet kurutma fırınının toplam egzost havası miktarı))

verilen bu hacim değerlerine göre kütle denkliğini bulmak için kütle değerlerini hesaplırsak (Çengel, 2000);

$\dot{m}_{5T} = 4476,1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,94 \text{ kg/m}^3 = 4207,5 \text{ kg/h} = (1402,5 \text{ kg/h} \cdot 3)$ (Kurutma kabinlerinden gelen çözücü buharı içeren egzost havası) $T_5 = 100^\circ\text{C}$ (373 K)

$\dot{m}_8 = 8415 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,5 \text{ kg/m}^3 = 4207,5 \text{ kg/h}$ (Yanma odasına giden çözücü buharı içeren egzost havası) $T_8 = 400^\circ\text{C}$ (673 K)

$\dot{m}_{11} = 13071,2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,35 \text{ kg/m}^3 = 4574,92 \text{ kg/h}$ (Yanma odasına gelen artırılmış egzost havası) $T_{11} = 800^\circ\text{C}$ (1073K)

$\dot{m}_{12T} = 10166,5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,45 \text{ kg/m}^3 = 4574,92 \text{ kg/h}$ (Bacaya giden artırılmış egzost havası)
 $T_{12T} = 500^\circ\text{C}$ (773 K)

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_{5T} + \dot{m}_{11} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{12T}$$

$$(4207,5 + 4574,92) \text{ kg/h} = (4207,5 + 4574,92) \text{ kg/h}$$

$$8782,42 \text{ kg/h} = 8782,42 \text{ kg/h}$$

1. Yasa analizi :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi \theta_\varphi - \sum \dot{m}_g \theta_g$$

$$\theta = h + ke + pe \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{W} = 30 \text{ kW (Fan motorunun gücü)}$$

$ke = 0, pe = 0$ (Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir.)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi h_\varphi - \sum \dot{m}_g h_g$$

Aşağıda Termal insineratörün reküperatörüne giren ve çıkan maddelerin özgül ısıları ile sıcaklık değerleri verilmiştir (Çengel, 2000).

$$c_{5T} = 1,01 \text{ kJ/kgK}, T_{5T} = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$c_8 = 1,075 \text{ kJ/kgK}, T_8 = 400^\circ\text{C} \text{ (673 K)}$$

$$c_{11} = 1,16 \text{ kJ/kgK}, T_{11} = 800^\circ\text{C} \text{ (1073 K)}$$

$$c_{12T} = 1,097 \text{ kJ/kgK}, T_{12T} = 500^\circ\text{C} \text{ (773 K)}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = (\dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_{12T} \cdot h_{12T}) - (\dot{m}_{5T} \cdot h_{5T} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11})$$

$$\dot{m}_{5T} \cdot h_{5T} = \dot{m}_{5T} \cdot c_{5T} T_{5T} = (4207,5 \text{ kg/h}) (1,01 \text{ kJ/kgK}) (373 \text{ K}) / 3600 = 442 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_8 \cdot h_8 = \dot{m}_8 \cdot c_8 T_8 = (4207,5 \text{ kg/h}) (1,075 \text{ kJ/kgK}) (673 \text{ K}) / 3600 = 845,6 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} = \dot{m}_{11} \cdot c_{11} T_{11} = (4574,92 \text{ kg/h}) (1,16 \text{ kJ/kgK}) (1073 \text{ K}) / 3600 = 1581,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{12T} \cdot h_{12T} = \dot{m}_{12T} \cdot c_{12T} T_{12T} = (4574,92 \text{ kg/h}) (1,097 \text{ kJ/kgK}) (773 \text{ K}) / 3600 = 1077,6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} - (-30) = (845,6 + 1077,6) - (442 + 1581,8)$$

$$\dot{Q} = -130,6 \text{ kW (çevreye transfer olan ısı miktarı)}$$

Ekserji analizi :

$$\dot{W}_r = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\varphi \left(h_\varphi + \frac{v_\varphi^2}{2} + gz_\varphi - T_0 s_\varphi \right)$$

$\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (Çevre sıcaklığı, yapılan hesaplamalardan ve tablolardan alınan değerlerin referans alınan sıcaklık değeri)

$$\dot{W}_r = \sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0 s_\varphi)$$

$$\dot{m}_{5T} (c_{5T} T_{5T} - T_0 c_{5T} \ln \frac{T_{5T}}{T_0}) = [4207,5 \text{ kg/h} [(1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)]$$

$$/ 3600 = 363,3 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{11} (c_{11} T_{11} - T_0 c_{11} \ln \frac{T_{11}}{T_0}) = [4574,92 \text{ kg/h} [(1,16 \text{ kJ/kgK} \cdot 1073 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,16 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 3,6)]$$

$$/ 3600 = 1019,1 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) = (363,3 + 1019,1) = 1382,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_8 (c_8 T_8 - T_0 c_8 \ln \frac{T_8}{T_0}) = [4207,5 \text{ kg/h} [(1,075 \text{ kJ/kgK} \cdot 673 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,075 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 2,26)] /$$

$$3600 = 540,3 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{12T} (c_{12T} T_{12T} - T_0 c_{12T} \ln \frac{T_{12T}}{T_0}) = [4574,92 \text{ kg/h} [(1,097 \text{ kJ/kgK} \cdot 773 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,097$$

$$\text{kJ/kgK} \cdot \ln 2,6)] / 3600 = 681,4 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0 s_\varphi) = (540,3 + 681,4) = 1221,7 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{tr} = (1382,4 - 1221,7) = 160,7 \text{ kW}$$

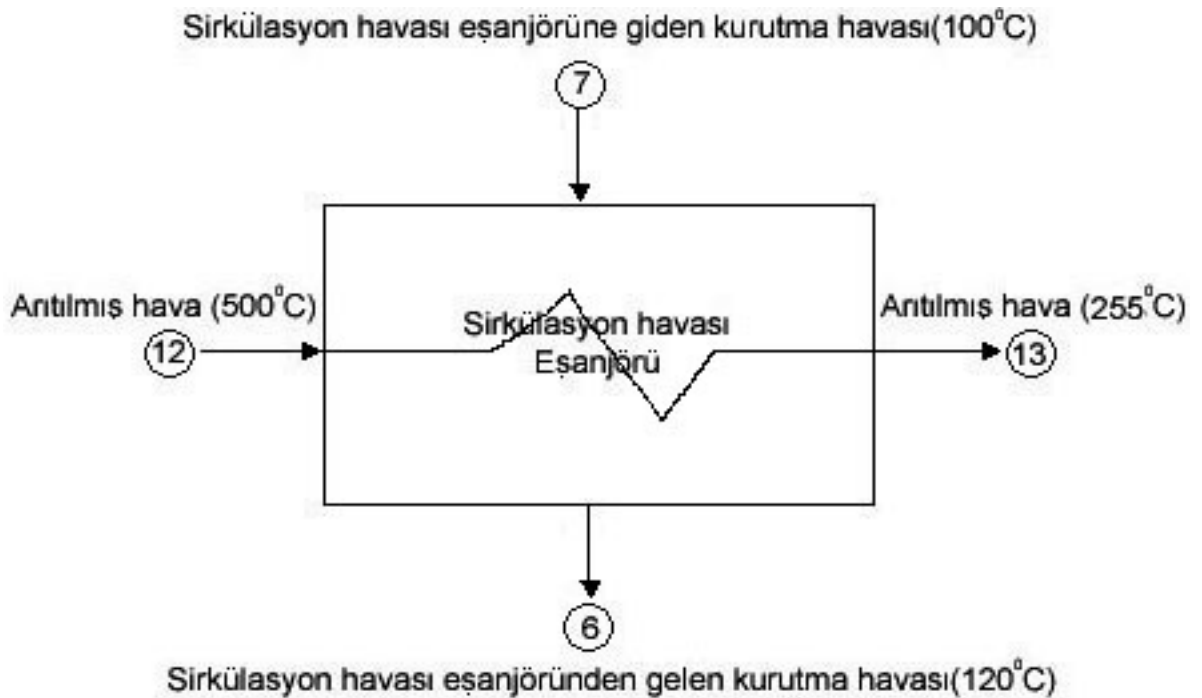
$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = 160,7 - (-30) = 190,7 \text{ kW}$$

Ekserji verimi :

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{tr,8} - \dot{W}_{tr,5T}}{\dot{W}_{tr,11} - \dot{W}_{tr,12T} + \dot{W}_y} = \frac{540,3 - 363,3}{1019,1 - 681,4 + 30} = 0,48 \quad (7.12)$$

7.4 Sirkülasyon Havası Eşanjörü

Şekil 7.6 'daki şemada görüldüğü gibi insineratörden gelen arıtılmış sıcak egzost havası, eşanjörden geçerek kurutma fırınının iç ortamının ısıtılmasını sağlayacak olan ısıyı bırakarak ön ısıtıcıya gider. Eşanjördeki ısı 10 kW 'lık fanlarla fırın iç ortamına cebri olarak gönderilmektedir. Ayrıca Şekil 7.1 'de görüldüğü üzere insineratöre giden 3 farklı hat olduğu gibi insineratörden gelen arıtılmış sıcak egzost havası her bir kurutma fırınına gelirken de 3 ayrı hat bulunmaktadır. Her bir hatta otomatik kontroller vasıtasıyla ısı dengesi sağlamak amacıyla egzost borularının ayırım yerinde bulunan ve dijital iç ortam termostatlarıyla bağlantılı olarak ihtiyaca göre sıcak egzost gazları yönlendirilmektedir. Bunların haricinde acil durum güvenliği sağlamak amacıyla 4. bir hat olarak by-pass hattı bulunmaktadır. Her bir boya kurutma kabini için toplamda 3 adet sirkülasyon havası eşanjörü bulunmaktadır. Burada kullanılan sirkülasyon havası eşanjörleri borulu tipte dizayn edilmiştir.



Şekil 7.6 Sirkülasyon havası eşanjörüne giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Kütlenin korunumu :

Aşağıdaki veriler Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikası boyahanesinin mevcut sistemine göre hazırlanmıştır.

$$\dot{Q}_6 = 20000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Kurutma kabinine giden kurutma havası)}$$

$$\dot{Q}_7 = 18723,4 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Kurutma kabininden gelen kurutmahavasası)}$$

$$\dot{Q}_{12} = 3388,9 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Rekuperatörden gelen arıtılmış egzost havası)}$$

$$\dot{Q}_{13} = 2382,8 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Fırın giriş havası ön ısıtıcısına gönderilen egzost havası)}$$

verilen bu hacim değerlerine göre kütle denkleğini bulmak için kütle değerlerini hesaplırsak (Çengel, 2000); burada dikkat etmemiz gereken durum; 3 adet boya kurutma kabininden toplanan egzost havalarının daha sonradanda aynı şekilde 3 'e ayrılmış şekilde her bir kabini ısıtacak olan sirkülasyon havası eşanjöründen geçtiğidir.

$$\dot{m}_6 = 20000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,88 \text{ kg/m}^3 = 17600 \text{ kg/h} \text{ (Kurutma kabinine giden kurutma havası)}$$

$$T_6 = 120^\circ\text{C} \text{ (393 K)}$$

$$\dot{m}_7 = 18723,4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,94 \text{ kg/m}^3 = 17600 \text{ kg/h} \text{ (Kurutma kabininden gelen kurutma havası)}$$

$$T_7 = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$\dot{m}_{12} = 3388,9 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,45 \text{ kg/m}^3 = 1525 \text{ kg/h} = [(4574,92 \text{ kg/h}) / 3] \text{ (Rekuperatörden gelen arıtılmış egzost havası)} \quad T_{12} = 500^\circ\text{C} \text{ (773 K)}$$

$$\dot{m}_{13} = 2382,8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,64 \text{ kg/m}^3 = 1525 \text{ kg/h} \text{ (Fırın giriş havası ön ısıtıcısına gönderilen egzost havası)} \quad T_{13} = 255^\circ\text{C} \text{ (528 K)}$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_6 + \dot{m}_{13}$$

$$(17600 + 1525) \text{ kg/h} = (17600 + 1525) \text{ kg/h}$$

$$19125 \text{ kg/h} = 19125 \text{ kg/h}$$

1. Yasa analizi :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi \theta_\varphi - \sum \dot{m}_g \theta_g$$

$$\theta = h + ke + pe \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{W} = 10 \text{ kW} \text{ (Fan motorunun gücü)}$$

$$\Delta ke = 0, \Delta pe = 0 \text{ (Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir.)}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\phi h_\phi - \sum \dot{m}_g h_g$$

Aşağıda sirkülasyon havası eşanjöre giren ve çıkan maddelerin özgül ısıları ile sıcaklık değerleri verilmiştir (Çengel, 2000).

$$c_6 = 1,013 \text{ kJ/kgK}, T_6 = 120^\circ\text{C} \text{ (393 K)}$$

$$c_7 = 1,01 \text{ kJ/kgK}, T_7 = 100^\circ\text{C} \text{ (373 K)}$$

$$c_{12} = 1,097 \text{ kJ/kgK}, T_{12} = 500^\circ\text{C} \text{ (773 K)}$$

$$c_{13} = 1,04 \text{ kJ/kgK}, T_{13} = 255^\circ\text{C} \text{ (528 K)}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = (\dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{13} \cdot h_{13}) - (\dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{12} \cdot h_{12})$$

$$\dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_6 \cdot c_6 T_6 = (17600 \text{ kg/h})(1,013 \text{ kJ/kgK})(393 \text{ K}) / 3600 = 1946,3 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_7 \cdot h_7 = \dot{m}_7 \cdot c_7 T_7 = (17600 \text{ kg/h})(1,01 \text{ kJ/kgK})(373 \text{ K}) / 3600 = 1841,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{12} \cdot h_{12} = \dot{m}_{12} \cdot c_{12} T_{12} = (1525 \text{ kg/h})(1,097 \text{ kJ/kgK})(773 \text{ K}) / 3600 = 359,2 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{13} \cdot h_{13} = \dot{m}_{13} \cdot c_{13} T_{13} = (1525 \text{ kg/h})(1,04 \text{ kJ/kgK})(528 \text{ K}) / 3600 = 232,6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} - (-10) = (1946,3 + 232,6) - (1841,8 + 359,2)$$

$$\dot{Q} = -12,1 \text{ kW} \text{ (çevreye transfer olan ısı miktarı)}$$

Ekserji analizi :

$$\dot{W}_r = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\phi \left(h_\phi + \frac{v_\phi^2}{2} + gz_\phi - T_0 s_\phi \right)$$

$\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (Çevre sıcaklığı, yapılan hesaplamalardan ve tablolardan alınan değerlerin referans alınan sıcaklık değeri)

$$\dot{W}_r = \sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum \dot{m}_\phi (h_\phi - T_0 s_\phi)$$

$$\dot{m}_7 (c_7 T_7 - T_0 c_7 \ln \frac{T_7}{T_0}) = [17600 \text{ kg/h} [(1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot 373 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,01 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,25)] /$$

$$3600 = 1513,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{12} (c_{12} T_{12} - T_0 c_{12} \ln \frac{T_{12}}{T_0}) = [1525 \text{ kg/h} [(1,097 \text{ kJ/kgK} \cdot 773 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,097 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 2,59)]$$

$$/ 3600 = 227,4 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) = (1513,4 + 227,4) = 1740,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_6(c_6 T_6 - T_0 c_6 \ln \frac{T_6}{T_0}) = [17600 \text{ kg/h} [(1,013 \text{ kJ/kgK} \cdot 393 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,013 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,32)] /$$

$$3600 = 1536,6 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{13}(c_{13} T_{13} - T_0 c_{13} \ln \frac{T_{13}}{T_0}) = [1525 \text{ kg/h} [(1,04 \text{ kJ/kgK} \cdot 528 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,04 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,77)] /$$

$$3600 = 157,6 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0 s_\varphi) = (1536,6 + 157,6) = 1694,2 \text{ kW}$$

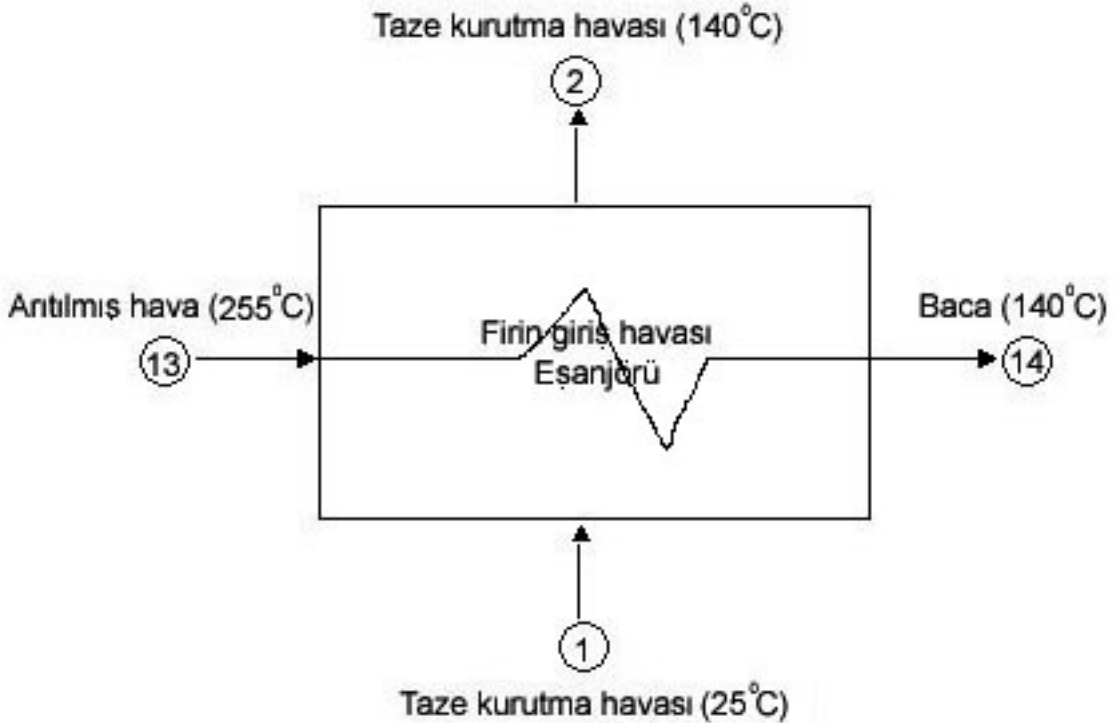
$$\dot{W}_{tr} = (1740,8 - 1694,2) = 46,6 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = 46,6 - (-10) = 56,6 \text{ kW}$$

Ekserji verimi :

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{tr,6} - \dot{W}_{tr,7}}{\dot{W}_{tr,12} - \dot{W}_{tr,13} + \dot{W}_y} = \frac{1536,6 - 1513,4}{227,4 - 157,6 + 10} = 0,29$$

7.5 Fırın Giriş Havaşı Eşanjörü



Şekil 7.7 Fırın giriş havaşı eşanjörü giren ve çıkanların numaralı akım şeması

Şekil 7.7 'deki şemada görüldüğü insineratörden gelen arıtılmış egzost havasının bacadan atılmadan önce ısısının mümkün olduğu kadar sisteme geri kazandırmasıdır. Bu amaçla en

son işlem olarak fırına alınacak olan proses havasını ortam sıcaklığı olarak alınan 25°C 'den fırına giriş sıcaklığı olan 140°C 'ye çıkarmaktır. Bu ön ısıtıcıdaki ısı 7 kW 'lık fanlarla fırın iç ortamına cebri olarak gönderilmektedir. Her bir boya kurutma kabini girişi için toplamda 3 adet fırın giriş havası ön ısıtıcısı bulunmaktadır. Burada kullanılan fırın giriş havası ön ısıtıcıları borulu tipte dizayn edilmiştir.

Kütlenin korunumu :

Aşağıdaki veriler Mercedes Benz Türk Hoşdere Fabrikası boyahanesinin mevcut sistemine göre hazırlanmıştır.

$$\dot{Q}_{13} = 2382,8 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Sirkülasyon havası eşanjörden gelen arıtılmış egzost havası)}$$

$$\dot{Q}_2 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Kurutma kabine giden taze kurutma havası)}$$

$$\dot{Q}_1 = 1167,8 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Dış ortam havası)}$$

$$\dot{Q}_{14} = 1794,1 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Bacaya gönderilen egzost havası)}$$

verilen bu hacim değerlerine göre kütle denkleğini bulmak için kütle değerlerini hesaplırsak (Çengel, 2000);

$$\dot{m}_1 = 1167,8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,201 \text{ kg/m}^3 = 1402,5 \text{ kg/h} \text{ (Dış ortam havası)} \quad T_1 = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

$$\dot{m}_2 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,85 \text{ kg/m}^3 = 1402,5 \text{ kg/h} \text{ (Kurutma kabine giden taze kurutma havası)}$$

$$T_2 = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$\dot{m}_{13} = 2382,8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,64 \text{ kg/m}^3 = 1525 \text{ kg/h} \text{ (Sirkülasyon havası eşanjörden gelen arıtılmış egzost havası)} \quad T_{13} = 255^\circ\text{C} \text{ (528 K)}$$

$$\dot{m}_{14} = 1794,1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,85 \text{ kg/m}^3 = 1525 \text{ kg/h} \text{ (Bacaya gönderilen egzost havası)}$$

$$T_{14} = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{14}$$

$$(1402,5 + 1525) \text{ kg/h} = (1402,5 + 1525) \text{ kg/h}$$

$$2927,5 \text{ kg/h} = 2927,5 \text{ kg/h}$$

1. Yasa analizi :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi \theta_\varphi - \sum \dot{m}_g \theta_g$$

$$\theta = h + ke + pe \text{ (kJ/kg)}$$

$\dot{W} = 7 \text{ kW}$ (Fan motorunun gücü)

$\Delta ke = 0, \Delta pe = 0$ (Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir.)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum \dot{m}_g h_g$$

Aşağıda Fırın giriş havası eşanjöre giren ve çıkan maddelerin özgül ısıları ile sıcaklık değerleri verilmiştir (Çengel, 2000).

$$c_1 = 1,006 \text{ kJ/kgK}, T_1 = 25^\circ\text{C} \text{ (298 K)}$$

$$c_2 = 1,015 \text{ kJ/kgK}, T_2 = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$c_{13} = 1,04 \text{ kJ/kgK}, T_{13} = 255^\circ\text{C} \text{ (528 K)}$$

$$c_{14} = 1,015 \text{ kJ/kgK}, T_{14} = 140^\circ\text{C} \text{ (413 K)}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = (\dot{m}_2.h_2 + \dot{m}_{14}.h_{14}) - (\dot{m}_1.h_1 + \dot{m}_{13}.h_{13})$$

$$\dot{m}_1.h_1 = \dot{m}_1.c_1.T_1 = (1402,5 \text{ kg/h} (1,006 \text{ kJ/kgK})(298 \text{ K}) / 3600 = 116,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_2.h_2 = \dot{m}_2.c_2.T_2 = (1402,5 \text{ kg/h})(1,015 \text{ kJ/kgK})(413 \text{ K}) / 3600 = 163,3 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{13}.h_{13} = \dot{m}_{13}.c_{13}.T_{13} = (1525 \text{ kg/h})(1,04 \text{ kJ/kgK})(528 \text{ K}) / 3600 = 232,6 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{14}.h_{14} = \dot{m}_{14}.c_{14}.T_{14} = (1525 \text{ kg/h})(1,015 \text{ kJ/kgK})(413 \text{ K}) / 3600 = 177,6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} - (-7) = (163,3 + 177,6) - (116,8 + 232,6)$$

$$\dot{Q} = -15,5 \text{ kW} \text{ (çevreye transfer olan ısı miktarı)}$$

Ekserji analizi :

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta - T_0 s_\zeta \right)$$

$\Delta KE = 0, \Delta PE = 0, T_0 = 25^\circ\text{C}$ (Çevre sıcaklığı, yapılan hesaplamalardan ve tablolardan alınan değerlerin referans alınan sıcaklık değeri)

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g (h_g - T_0 s_g) - \sum \dot{m}_\zeta (h_\zeta - T_0 s_\zeta)$$

$$\dot{m}_1 (c_1 T_1 - T_0 c_1 \ln \frac{T_1}{T_0}) = [1402,5 \text{ kg/h} [(1,006 \text{ kJ/kgK} \cdot 298 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,006 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1)] /$$

$$3600 = 116,8 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{13}(c_{13}T_{13} - T_0c_{13}\ln\frac{T_{13}}{T_0}) = [1525 \text{ kg/h} [(1,04 \text{ kJ/kgK} \cdot 528 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,04 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,77)] /$$

$$3600 = 157,7 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_g (h_g - T_0s_g) = (116,8 + 157,7) = 274,5 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_2(c_2T_2 - T_0c_2\ln\frac{T_2}{T_0}) = [1402,5 \text{ kg/h} [(1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot 413 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,38)] /$$

$$3600 = 125,4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{14}(c_{14}T_{14} - T_0c_{14}\ln\frac{T_{14}}{T_0}) = [1525 \text{ kg/h} [(1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot 413 \text{ K}) - (298 \text{ K} \cdot 1,015 \text{ kJ/kgK} \cdot \ln 1,38)]$$

$$/ 3600 = 136,3 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi - T_0s_\varphi) = (125,4 + 136,3) = 261,7 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{tr} = (274,5 - 261,7) = 12,8 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = 13,8 - (-7) = 19,8 \text{ kW}$$

Ekserji verimi :

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{tr,2} - \dot{W}_{tr,1}}{\dot{W}_{tr,13} - \dot{W}_{tr,14} + \dot{W}_y} = \frac{125,4 - 116,8}{157,7 - 136,3 + 7} = 0,30$$

8. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada öncelikle boya kavramı ve boyama üzerinde durulmuş, daha sonra araç üzerine tatbik edilen bu boyanın kurutulması için kullanılan termal insineratör sistemlerinden ve kurutma işlemlerinden kısaca bahsedilerek yapılan boya kurutma fırını hesaplarının önemi vurgulanmak istenmiştir. Bu doğrultuda yaptığımız hesaplar, çevre sıcaklığında ve basıncında olan bir kurutma sisteminin, bir boyama prosesi sonrasında montaj hattına gitmeden önce yaş boyalı araca uygulanacak kurutma işlemini, bu kurutma işlemini gerçekleştiren termal insineratör, termal insineratörün içinde bulunan reküperatör, kurutma kabini ve termal insineratörden elde edilen ısıyı kurutma kabinine taşıyacak olan eşanjörlerin, böylelikle tüm kurutma sisteminin ekserji analizi metoduyla hesaplanması amaçlanmaktadır.

Alınan referans ortamı $T_0 = 25^\circ\text{C}$ $P_0 = 1$ atm koşullarına göre tablolardan alınan ve firma kullanım verilerinden temin edilen değerlere göre hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar doğrultusunda, tüm sistemin enerji ve ekserji kayıpları ile sistemin iyilik derecesini belirten ekserji verimleri elde edilerek Çizelge 8.1 'de gösterilmiştir. Bu çizelgede ifade edilen ekserji verimi, çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 8.1 Sistemin enerji ve ekserji analiz sonuçları

Bölüm	Enerji Kaybı (kW)	Ekserji Kaybı (kW)	Ekserji Verimi (%)
Boya Kurutma Fırını	72,8	33,9	72
Termal İnsineratörün Yanma Odası	215,3	285,5	96
Reküperatör	130,6	190,7	48
Sirkülasyon Havası Eşanjörü	12,1	56,6	29
Fırın Giriş Havası Eşanjörü	15,5	19,8	30

Kurutma sisteminin hesaplamasında esas alınan ve sistem içerisinde bulunan araçtan buharlaştırılan çözücü olarak 2K akrilik tiner kullanılmasına rağmen, fırında başka nitelikteki çözücülerin kurutulması için de kullanılmaktadır. Ancak kurutma fırınında, ağırlık olarak 2K akrilik son kat boyası kurutulduğu için yapılan hesaplar bu doğrultuda elde edilmiştir. Ama sistem tasarımlarında belirli bir çözücüden ziyade, çeşitli çözücü değer aralıkları için tasarım yapılması esastır.

Bu çalışmada yapılan hesaplarda direkt alevli insineratöre göre düşünüldüğünde fırın sistemlerinde kullanılabilecek en ileri düzeyde bir hava ısıtma sistemi tasarımı görülmektedir. Kurutma prosesleri enerjinin çok yoğun olarak kullanıldığı ve bu sebeple de önemi tam olarak

kavranamamış proseslerdir. Kurutma endüstrisinde enerjinin büyük miktarda kullanımı kurutmayı büyük endüstriyel anlamıyla birlikte yoğun enerji operasyonlarından yapmaktadır. Kurutucunun gayesi ortam koşulları altında daha fazla ısı ile ürünü tedarik etmektir.

Termodinamiğin ikinci yasası sistemdeki enerjinin niteliğini sorgulamakta ve bu analizleri gerçekleştirmek için gerekli olan araçları içermektedir. İkinci yasanın temelinde enerjinin bir türden başka bir türe dönüşümünde birinci yasa gereği enerjinin toplam miktarında değişiklik olmasa bile enerjinin niteliğinde mutlaka bir değişim olacağını savunmaktadır.

Geçmiş son 10 yılda, termodinamik analiz, özellikle ekserji analizi, ısı sistemlerin tasarım, analiz ve optimizasyonları için gerekli bir araç olarak görülmektedir. Bir termodinamik bakış açısından ekserji, işin maksimum miktarının referans alınan ortamla dengeye gelmiş olan maddenin akışı, ısı veya iş tarafından üretilebilmesi olarak tanımlanır. Bu sebeple referans çevrenin durumu, veya referans durum tamamen belirlenmiş olmalıdır. Bu genelde referans çevrenin sıcaklığı basıncı ve kimyasal birleşimi belirtilmesiyle yapılmıştır.

En genel şekliyle ısı geri kazanımı, temizlenmiş olan havanın egzost havasının ön ısıtıcısından geçerken ısını bırakmasıdır. Egzost havasının artan sıcaklığı temizleme ünitesinde ısı enerjisi olarak almasıdır. Bu eşanjör bununla beraber, teknik olarak ve yapıldığı malzemeye göre sınırlanmaktadır. Ön ısıtma yaparken kirli havanın kendiliğinden alev alması ve bunun sonucu olan sıcaklık artışı insineratörün her noktasında istenmeyen bir durumdur. Aynı zamanda bu kontrolsüz ve eşanjöre zarar verebilecek bir durumdur. Bunu önlemek için yanma odasına ek yakıt göndererek tam yanma sağlanmalıdır.

Termodinamikte 1. yasa verimi, bir sistemde yapılan işin sisteme sağlanan ısıya oranı olarak tanımlanır. Ancak kurutma sistemlerinde, herhangi bir iş yapılmadığı veya iş harcanmadığı için 1. yasa veriminden söz etmemiz mümkün değildir. Fakat, çok büyük miktarlarda enerji kullanılan bu sistemlerde, sisteme sağlanan ısı enerjisinin en verimli şekilde kullanımını belirlemek açısından; ekserji verimin hesaplanarak, kayıpların maksimum olduğu yerlerde iyileştirme çalışmaları yapmak mümkündür.

Sonuç olarak, yapılmış olan bu çalışma sadece araç kurutma prosesinin ısı analizindeki ekserji analiziyle faydalanılabilirliği gösterilmekle kalmamış, bundan başka verimliliklerindeki anlayış sağlanması tasarlanmıştır. Sunulan çalışma; mühendislerin arayışlarına, kurutma sistemleriyle beraber bileşenlerinin tasarımını optimize etmek; kurutma sistemi için en uygun konfigürasyonları ve en uygun tasarımları belirlemede faydalı olacağı düşüncesindeyiz.

KAYNAKLAR

Ansdel, D.A., (1995) Automative Paints , Elsevier Science Publ. , New York.

Bejan, A., (1997), Advanced Engineering Thermodynamics : Second Editions, John Wiley & Sons, New York.

Bejan, A., (1982), Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow, John Wiley & Sons Inc., Nev York.

Bejan A.,Tsatsaronis G., Moran M.,(1996) Thermal design and optimization , Wiley Interscience Publication, New York.

Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., (2000), Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw Hill-Literatür, İstanbul.

Demirel Y., Sandler S.I., (2001) "Linear-Nonequilibrium Thermodynamics Theory for Coupled Heat and Mass Transport", Int. J. Heat Mass Transfer 44 (13) 2439–2451.

Dincer, I., (2002) "On Energetic, Exergetic and Environmental Aspects of Drying Systems", Int J Energy Res;26:717–27.

Dincer, I., (2002) "On Energetic, Exergetic and Environmental Aspects of Drying Systems", Int J Energy Res;26:717–27.

Diğer İ., Çengel Y.,(2001), "Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering" , Entropy, Vol 3, 116-149

Dincer, I., Sahin, A.Z., (2003) , " A New Model for Thermodynamic Analysis of a drying Process" , International Journal of Heat and Mass Transfer , Vol 47 , 645–652

Dürr Environmental Technology , (2005) , Guide Line For Air Prurification and Systems Design Brochures , Dürr Environmental, GmbH., Stuttgart

Goldschmidt. A., Streitberger, H.J., (2003) , BASF Handbook on Basics of Coating Technology, BASF Coating , Hannover

Horlock J.H., Young J.B., Manfrida G., (2000), " Exergy analysis of modern fossil-fuel power plant", Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol 122,1-7

Keey, R.B., (1992) , Drying Principles and Practice , Pergamon Press , New York.

Kotas T.,(1995), The exergy method of thermal plant analysis , Krieger Publusing Company, Malabar, Florida.

Kudra, T., Mujumdar, A.S., (2002) , Advanced Drying Technologies , Marcel Dekker , New York.

Lewis, P., (1995) , Automotive Paints and Coatings , John Wiley & Sons, New York.

McBane, B.N., (1999) , Automotive Coatings, FSBT, Philadelphia

Miguel A.F., (2000) "Contribution to Flow Characterization Through Porous Media", Int. J. Heat Mass Transfer 43 (13) 2267–2272.

Müezzinoğlu, A., (2000) , Hava Kirliliği ve Kontrolünün Esasları , Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, İzmir.

Paksoy, A.S., (1999) ,Boya El Kitabı, KMO Yayını , İstanbul

Perry R.H., (1997) , Perry's Chemical Engineers' Handbook , The McGraw-Hill Companies , Inc., New York.

Rivero, R., (2002) , "The Effect of environmental Temperature on The Chemical exergy of hydrocarbons" , Proceedings of ECOS , July, 2002 , Berlin.

Sanayi Boyacılığı ve Uygulama Tekniği Seminer Notları, (2000) , Mercedes Benz Turk A.Ş.,İstanbul

Sanayide Enerji Tasarrufu Seminer Notları, (1997) , Tübitak MAM EİE/UETM , Gebze, Kocaeli.

Seymour, R.B., Mark, H.F., (1990) , Organic Coatings: Their Origin and Development, Elsevier Science Publ. , New York.

Sieniutycz S., (2000) "Thermodynamic Optimization for Work-Assisted Heating Anddrying Operations" Energy Conversion & Management 41 2009±2039

Sieniutycz S., Kubiak M., (2002) "Dynamical Energy Limits in Traditional and Work-Driven Operations I. Heat-Mechanical Systems", Int. J. Heat Mass Transfer 45 (14) 2995–3012.

Szargut, Morris D.R., Steward F.R., (1998), Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metalurgical Processes, Hemisphere Publishing Corp., New York.

Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I., (2002) "Energy Analysis in Fluidized Bed Drying of Wet Particles", Int. J. Energy Res. 26 (6) 507–525.

Topic R., (1995) "Mathematical Model for Exergy Analysis of Drying Plants", Dry. Technol. 13 (1&2) 437–445.

William L.H., (1997) , Industrial Air Pollution Control Systems , The McGraw-Hill Companies , Inc., New York.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.sciencedirect.com

[2] www.durrenvironmental.com

[3] www.durr.de

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 01.01.1980

Doğum yeri Eskişehir

Lise 1994-1997 Eskişehir Fen Lisesi

Lisans 1998-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004 – Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı