KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROSTATİK TOZ BOYAMA TESİSİNİN OTOMASYON SİSTEMİNE GEÇİŞİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DEMET TAŞKAN ÜRGÜN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROSTATİK TOZ BOYAMA TESİSİNİN OTOMASYON SİSTEMİNE GEÇİŞİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DEMET TAŞKAN ÜRGÜN

Dr. Öğr. Üyesi Volkan ÇOBAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Selman ÇAĞMAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ
Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.02.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, elektrostatik toz kaplama yapan bir tesisin manuel sistemden otomasyonlu sisteme geçmesiyle, enerji verimliliğindeki ve boyama kalitesindeki iyileşmeler incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde emeği olan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Volkan ÇOBAN'a. Hayatımın her anında yanımda olan ve beni destekleyen annem Kudret hanım, hayatımın tüm anında yanımda olacak güzel kızım Asya, eşim Özcan ve tüm Taşkan Ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Şubat – 2019 Demet TAŞKAN ÜRGÜN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
GİRİŞ 1
1. ELEKTROSTATİK TOZ KAPLAMA ENDÜSTRİSİ 8
1.1. Genel Bakış 8
1.1.1. Ekonomik faydalar 10
1.1.2. Çevresel faydalar 11
1.2. Toz Kaplama Malzemeleri ve Performans Özellikleri 12
1.2.1. Termoplastik tozlar 14
1.2.1.1. Polietilen 14
1.2.1.2. Polipropilen 15
1.2.1.3. Naylon 15
1.2.1.4. Polivinil klorür 15
1.2.1.5. Termoplastik poliester 15
1.2.1.6. Etilen akrilik asit kopolimer 17
1.2.1.7. Surlyn® 17
1.2.2. Termoset tozlar 17
1.2.2.1. Epoksi reçine içeren sistemler 18
1.2.2.2. İşlevsel epoksiler 18
1.2.2.3. İnce film kaplamaları 18
1.2.2.4. Epoksi-poliester hibrit reçineler 20
1.2.2.5. Poliester 22
1.2.2.6. Hidroksil poliester (üretan) 22
1.2.2.7. Karboksil poliester 24
1.2.2.8. Akrilikler 25
1.2.2.9. Silikon ve modifiye silikonlu kaplama tozları 27
1.2.2.10. Diğer poliesterler 27
1.2.3. Radyasyonla kürlenen tozlar 28
1.2.4. Kaplama seçimi 29
1.3. Ekonomik Avantajlar 30
1.4. Elektrostatik Toz Kaplama Prensipleri 31
1.4.1. Elektrostatik prensipleri 31
1.4.2. Film oluşumu 37
1.4.3. Yapışma prensipleri 39
2. MALZEME VE YÖNTEM 41
2.1. Konveyör Sistemin Tanıtımı 41

2.1.3. Elektrostatik toz boyama uygulaması 47
2.1.4. Kürleme süreci 50
2.2. Üretim Hızı ve Enerji Tüketimi 52
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 54
3.1. Konveyör Sistemin Avantajları 57
3.2. Enerji Verimliliklerinin Karşılaştırılması 60
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 66
KAYNAKLAR 68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 73
ÖZGEÇMİŞ 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Toz boyama yöntemiyle kaplanan ürünlere örnekler 9
Şekil 1.2. Toz kaplamada yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerlerin kimyasal yapıları 16
Şekil 1.3. Tabanca duvarı ile partikül çarpışmalarını maksimize etmek için tasarlanmış triboelektrik tabanca şeması 33
Şekil 1.4. Korona yükleme ve elektrik alanı üretmek için bir elektroda yüksek voltaj uygulayan korona tabancasının şeması 35
Şekil 1.5. Zıt yüklü iyonların oluşmasından kaynaklanan geri iyonlaşma. 36
Şekil 1.6. Kuru toz kaplama parçacıklarının film oluşum mekanizması 38
Şekil 2.1. Püskürtme tipi yüzey temizleme hattı.....43
Şekil 2.2. Kurutma fırını (temizlenmiş malzemelerin kurutma işlemi).....46
Şekil 2.3. Elektrostatik toz boyama uygulama kabini.....49
Şekil 2.4. Kürleme (Pişirme) Fırını.....51
Şekil 3.1 Toz boya tesisine genel bakış 54
Şekil 3.2. Bir üretim günü boyunca saat başına ortalama elektrik kullanımı 56
Şekil 3.3. Elektriksel güç yükünün tesis içindeki farklı işlemler arasında yüzdesel dağılımı 57
Şekil 3.4. Manuel (soldaki) ve otomasyonlu (sağdaki) sistemde kaplanan malzemelerin parlaklık durumları.....59
Şekil 3.5. Manuel (soldaki) ve otomasyonlu (sağdaki) sistemde kaplanan malzemelerin yüzeylerinde biriken yabancı maddeler 59
Şekil 3.6. Manuel ve otomasyonlu sistemlerde tüketilen enerjilerin karşılaştırılması.....62
Şekil 3.7. Manuel ve otomasyonlu sistemlerde birim alan başına tüketilen enerjilerin karşılaştırılması 63
Şekil 3.8. Manuel sistemle otomasyonlu sistemin hız ve malzeme tüketimi bakımından karşılaştırılması.....64

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Epoksi tozunun tipik özellikleri 20
Tablo 1.2. Epoksi-poliester hibrit tozunun tipik özellikleri..... 21
Tablo 1.3. Hidroksil-poliester tozun tipik özellikleri 23
Tablo 1.4. Karboksil poliester tozun tipik özellikleri..... 25
Tablo 1.5. Akrilik tozların tipik özellikleri..... 26
Tablo 1.6. GMA Akrilik tozların tipik özellikleri 26
Tablo 1.7. Silikon esaslı tozların tipik özellikleri..... 28
Tablo 1.8. Poliester tozların tipik özellikleri 28
Tablo 1.9. Termoset toz boyaların temel özellikleri..... 30
Tablo 2.1. Kurutma Fırını Sıcaklık Ayar Tablosu..... 47
Tablo 2.2. Kürleme (pişirme) fırını sıcaklık ayar tablosu 52
Tablo 3.1. Manuel ve otomasyonlu sistemlerin karşılaştırılması 61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Elektrotun Etkili Alanı, (m^2)
^oC	: Santigrat Derece
I	: Akım, (A)
l	: Uzunluk, (m)
s	: Saniye
t	: Numune Kalınlığı, (mm)
T_g	: Camsı Geçiş Sıcaklığı, (^oC)
V	: Gerilim

Kısaltmalar

AFM	: Atomic Force Microscopy (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
ASTM D-257	: Direnç Ölçüm Standardı
CO2	: Karbondioksit
dak	: Dakika
EAA	: Etilen Akrilik Asit
GMA	: Glisidil Metakrilatakrilik
Kg	: Kilogram
kW	: Kilo Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
PE	: Polietilen
PTFE	: Teflon
PVC	: Polivinil Klorür
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TGIC	: Triglisidil-İzosiyanürat
TL	: Türk Lirası
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
µm	: Mikro Metre

ELEKTROSTATİK TOZ BOYAMA TESİSİNİN OTOMASYON SİSTEMİNE GEÇİŞİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ve artan enerji ihtiyacı sebebiyle enerjinin verimli kullanımı son yıllarda önem kazanmıştır. İşletmelerin, artan üretim maliyetleri ve rekabet koşulları nedeniyle gider kalemlerini de iyi planlaması gerekmektedir. Bu sayede firmaların rekabet güçlerinin yükselmesi ve iş potansiyellerinin artmasıyla üretim kapasiteleri de artış gösterecektir. Enerjiyi verimli kullanan firmaların birim iş üretimi için azalan enerji yoğunluğu sayesinde ulusal olduğu kadar uluslararası düzeyde de rekabet gücü artacaktır. Ülkemizde sürekli artan enerji ihtiyacı, enerjinin verimli kullanılmasına yönelik çalışmaları gitgide artırmaktadır. Sektör bazında incelendiğinde kimya, otomotiv, plastik, gıda, çimento, seramik, demir çelik gibi birçok sanayi sektöründe enerji yoğun olarak kullanılmaktadır. Enerji tasarruf oranları ise yapılan çeşitli çalışmalarda belirlenmiştir. Enerji maliyetlerinin yanında, üretim sektörlerinde kullanılan hammaddelerin yurt dışından temin edilmesi işletmelerin gider kalemleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Elektrostatik toz boyama teknolojisi çoğunlukla metal yüzeyler üzerinde uygulanmaktadır. Bu sayede korozyona karşı direnç kazanan malzeme çetin çevre koşullarına karşı da dayanıklı bir malzeme halini almaktadır. Kullanılan metot sayesinde boyama verimi yükselirken boyanın uygulama süresi de kısalmaktadır. Tez kapsamında, bir elektrostatik toz boyama tesisine kontrol ve otomasyon sistemleri eklenerek ortaya konabilecek tasarruf potansiyelleri hesaplanarak sistemin geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Elektrik ve doğalgaz tüketimi açısından tasarruflar hesaplanmış, iş yapma potansiyelindeki artış tespit edilerek boya hammaddesindeki tasarruf da ortaya konulmuştur.

Tez 5 bölüm altında toplanmaktadır. Giriş bölümünde boyama ve kaplama teknolojilerinin temel kavramları ve tarihçesi özetlenmektedir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirliğin önemi vurgulandıktan sonra tezin kapsamı ve amacı belirtilmektedir. 2. bölümde elektrostatik toz kaplama endüstrisi genel hatlarıyla ele alınmaktadır. Elektrostatik toz kaplamanın diğer kaplama yöntemlerine göre avantajları belirtildikten sonra kullanılan malzemeler ve kaplama süreçleri ele alınmaktadır. 3. bölümde malzeme ve yöntem anlatılmaktadır. 4. bölümde elde edilen bulgular tartışılmakta ve otomasyon ile kaplama sürecinin manuel kaplamaya göre avantajları ve enerji verimliliğine katkısı belirtilmektedir. Son kısımda elde edilen bilgiler ışığında genel değerlendirme yapılarak geleceğe yönelik perspektif sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğal Gaz, Elektrik, Elektrostatik Toz Boyama, Enerji Verimliliği, Otomasyon.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE AUTOMATION SYSTEM ON THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTROSTATIC POWDER COATING PLANT

ABSTRACT

In recent years, efficient use of energy has gained importance due to technological developments and increasing energy needs. Businesses are also required to plan their expenditure items well due to increased production costs and competitive conditions. In this way, the production capacities of the companies will increase with the increase of the competitiveness of the companies and the increase of their business potential. The energy efficiency of the companies that use energy efficient will decrease with the decreasing energy density in the unit business production in the national as well as international level. The increasing energy need in our country is increasing the efforts for the efficient use of energy. When analyzed by sector, energy is used in many industries such as in chemical, automotive, plastic, food, cement, ceramic, iron and steel industry. Energy saving rates was determined in various studies. In addition to energy costs, procurement of raw materials used in production sectors from abroad has an important place among the expense items of enterprises. Electrostatic powder coating technology is mostly applied on metal surfaces. In this way, the material that is resistant to corrosion also becomes a durable material against the harsh environmental conditions. When the dyeing efficiency increases, the application time of the dye is shortened. Within the scope of the thesis, the reimbursement period of the system is calculated by calculating the saving potentials that can be created by adding control and automation systems to an electrostatic powder coating plant. Savings in terms of electricity and natural gas consumption were calculated, and the increase in work potential was determined and the savings in paint raw materials were determined.

The thesis is divided into 5 sections. The basic concepts and history of painting and coating technologies are summarized in the introduction. After emphasizing the importance of energy efficiency and sustainability, the scope and purpose of the thesis are stated. Section 2 discusses the electrostatic powder coating industry in general terms. After specifying the advantages of electrostatic powder coating over other coating methods, the materials used and coating processes are discussed. Section 3 describes the material and method. The results obtained are discussed in Section 4 and the advantages of automated coating process over manual coating and their contribution to energy efficiency are mentioned. In the light of the information obtained, a general evaluation is made and a perspective is given for the future in the last section.

Keywords: Natural Gas, Electricity, Electrostatic Powder Coating, Energy Efficiency, Automation.

GİRİŞ

Boya veya kaplamalar, çeşitli yöntem ve ekipmanlarla yüzeylere uygulanan belirli kalınlıkta tabakalar oluşturan sıvı, macun veya toz ürünlerdir. Bunlar, uygulanan yüzey üzerinde yapışan filmler oluştururlar. Film oluşumu fiziksel veya kimyasal yolla oluşabilir [1]. Sıvı kaplamalardan fiziksel film oluşumu kurutma olarak bilinir, toz kaplamalar için ise eritme işlemidir. Kurutma her zaman organik çözücülerin veya suyun buharlaşması ile ilişkilidir. Fiziksel film oluşumu, ancak uygulanan yüzey üzerinde kalan kaplama bileşenlerinin katı ve yapışkan olmaması durumunda mümkündür.

Kaplama bileşenleri sıvı, yapışkan veya macunsu ise kimyasal film oluşumu gereklidir. Kimyasal film oluşumunda, katı olmayan bir filme dönüşüm bileşenler arasındaki kimyasal reaksiyon ile gerçekleşir. Reaktif bileşenler, kaplamanın bileşenleri olabilir ve reaksiyon, kaplamanın uygulanmasından sonra enerji (ısı veya radyasyon) ile başlatılabilir. Bununla birlikte, kaplamayı uygularken yeni bir reaksiyon bileşeni eklemek de mümkündür (çoklu boyalar). Özel bir kimyasal film oluşumu durumu kaplama bileşenlerinin atmosferik oksijenle (hava ile kurutma) oksitlenmesidir [2].

Fiziksel ve kimyasal film oluşumu, örneğin, çözücü içeren fırınlamalı boyamalarda, ilk aşamanın çözücü buharlaştırılması ve daha sonra filmin fırınlanarak kürlenmesi işlemlerinin genellikle birleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bir boyanın özellikleri, nitel ve nicel bileşimi ile belirlenir; viskozite, elektriksel iletkenlik ve kurutma davranışının uygulama koşullarına uygun olmasını sağlayacak şekilde seçilmesini gerektirir. Ayrıca, kaplama filminin özellikleri (parlaklık, elastikiyet, çizilme direnci, sertlik, yapışma ve yüzey yapısı) boya özellikleri tarafından belirlenir. Bununla birlikte, uygulanacak yüzeyin durumu da (temizlik, tozdan ve yağdan bağımsız olma) önemlidir.

Günlük hayatta kullandığımız pek çok nesnenin yüzeyinin belirli amaçlar için kaplanması gerekmektedir. Örneğin metaller paslanmaktan korumak için kaplanır ve bitkiler zararlı haşerelerden ve hastalıklardan korumak için spreylenir. Uygulandığı

yüzeyleri koruyarak ve güzelleştirerek; boya ve kaplamalar, evlerden üretilen malzemelere, köprülerden diğer mimari yapılara kadar her şeyin değerini arttırmaktadır. Bu iyileştirme, boya veya kaplama satın alma veya uygulama maliyetinin çok ötesinde bir değerdir. Kaplamalar birçok gerekliliği yerine getirmelidir: Uygulanan yüzeyi korozyona, hava koşullarına ve mekanik hasara karşı korumak; dekoratif bir işlev kazandırmak (otomotiv kaplamaları, ev aletleri, mobilya); bilgi sağlamak (trafik işaretleri, bilgi işaretleri, reklam).

"Boya" ve "yüzey kaplama" terimleri sıklıkla birbirinin yerine kullanılır. Yüzey kaplama, bir yüzeye ince bir sürekli tabaka olarak uygulanabilecek herhangi bir malzemenin daha genel bir tanımıdır. Boya, geleneksel olarak, laklar veya vernikler olarak adlandırılan berrak filmlerden farklı olarak pigmentli materyalleri daha uygun olarak tarif etmek için kullanılmıştır. Tez kapsamında “toz kaplama” veya “toz boyama” kavramları bazı yerlerde birbirinin yerine kullanılmaktadır.

Boyama ve kaplamanın tarihçesi, ilkel insanların avladıkları hayvanları mağara duvarlarına resmetmesiyle başlamıştır. M.Ö. 3000–600 arası dönemde Mısırlılar tarafından birçok boya yapımı çalışması yapıldı ve ilk sentetik pigmentler, koruyucu boyalar ve vernikler üretildi. Yüzlerce yıl boyunca boya reçeteleri bir nesilden diğerine aktarıldı ve çoğu zaman dikkatle korundu. Boyalar, küçük partiler halinde üretildiği için çokça üretim pahalıya mal olmaktaydı. Bununla birlikte, boya ve kaplama talebi, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyılın başlarında arttığı için seri üretime geçmek karlı hale geldi.

İlk boya ve vernik fabrikaları on dokuzuncu yüzyılda kuruldu. Sanayi devrimi ve otomobilin seri üretimi, boya ve kaplama endüstrisinin büyümesinin en büyük nedenlerindendir. Anti-korozif kaplamalara ve diğer özel amaçlı kaplamalara duyulan ihtiyaç, bilimsel buluşların artmasına yardımcı oldu. Beyaz kurşunun yerini alacak beyaz pigment olan titanyum dioksit 1918'de piyasaya sürüldü. Yirminci yüzyılın ortalarından sonra, boya formülasyonlarında kullanılan doğal yağlar sentetik reçinelerle değiştirildi. Günümüzün kaplama üreticileri, çocuk oyuncağından uzay aracına kadar ürün

yüzeylerinde özel fonksiyonları korumak, süslemek ve özel işlevler için çok çeşitli ürünler sunmaktadır [3].

Yirminci yüzyılın ilerleyen bölümlerinde, toplumun gelişen çevre bilinci, boya ve kaplama endüstrisine yeni arayışlara gidilmesini zorunlu kıldı. Üreticiler ve tüketicilerin taleplerini karşılayan ve aynı zamanda resmi kuruluşların çevresel kısıtlamalarına uyan kaplama ürünleri üretme kaçınılmaz hale geldi. Bazı kimyasalların insanlar ve/veya çevreleri için zehirli ve zararlı olduğu anlaşılmıştır. Düzenleyici kurumlar, kaplama üreticilerinin uyması gereken katı standartlar belirlemişlerdir. Bu, formülasyonlarında uçucu organik bileşikler yerine su kullanan ve hiç çözücü içermeyen toz kaplamalar gibi kaplamaların geliştirilmesine daha fazla ilgi çekmiştir [3].

Günümüzde fosil yakıtların kullanımının azaltılması zorunluluk haline geldiği tüm otoriteler tarafından kabul edilmektedir [4]. Dünyanın enerji arzının % 80'den fazlası fosil yakıtlardan karşılanmakta ve bu durum yüksek oranda karbondioksit emisyonuna neden olan sürdürülebilir olmayan bir duruma yol açmaktadır [5]. Daha sürdürülebilir bir gelecek için bir çözüm, sanayi süreçlerini karbon dioksit emisyonlarını azaltmayı da içeren daha verimli hale getirmektir. Enerji verimliliği, küresel ölçekte, ulusal ölçekte ve şirket ölçeğinde önemlidir. Küresel bir perspektifte enerji verimliliği daha az küresel ısınmaya, ulusal ölçekte fosil yakıt kaynaklı ithalatın azalmasına ve şirket ölçeğinde enerji maliyetlerinden tasarrufa katkı sağlar.

Sürdürülebilir bir dünya için ülkelerin enerjiye olan ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır. Ülkelerin özellikle de ekonomisinin hızla büyüdüğü ve aynı zamanda fosil yakıtlara olan enerji ihtiyacının gün geçtikçe daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Enerji ihtiyacının sürekli arttığı fakat rezervlerin giderek azaldığı bir durumda enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması önemini git gide arttığının farkına varılmıştır. Ülkemizde enerjinin verimli kullanılmasına yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır [6].

Teknolojik gelişmeler ve artan enerji ihtiyacı sebebiyle enerjinin verimli kullanımı son yıllarda önem kazanmıştır. İşletmelerin artan üretim maliyetleri ve rekabet koşulları

nedeniyle gider kalemlerini de iyi planlaması gerekmektedir. Bu sayede firmaların rekabet güçleri yükselerek, iş potansiyelleri artarak üretim kapasiteleri de artış göstermektedir. Enerjiyi verimli kullanan firmaların birim iş üretimi için azalan enerji yoğunluğu sayesinde ulusal olduğu kadar uluslararası düzeyde de ihracat potansiyeli yükselmektedir [7].

Ülkemizin gelişmişlik düzeyi ve büyüme hızı göz önüne alındığında, enerji tüketimi de hızla artış göstermektedir. Yapılan çalışmalarda enerji tüketiminin artması ekonomik büyümeyi tetiklemekte ancak enerji kaynağı açısından dışa bağımlılığımız nedeniyle cari açık üzerinde de olumsuz etkiler taşımaktadır [8].

Tüm dünyada otomotiv ve beyaz eşya gibi endüstriler için yakıt tüketimi çok önemli bir konu haline gelmiştir. Yerel ve küresel düzenlemeler, üreticileri, ürünlerinin yakıt tüketimini azaltmak için araştırma birimlerinde büyük yatırımlar yaparak teknolojilerini geliştirmeye zorlamaktadır. Ayrıca, şirketler sürdürülebilirlik fikrine daha fazla duyarlı hale gelmekte ve üretimde kullanılan enerjiyi düşürmek için kendi kendini düzenlemektedir. Böylece, üretim süreçlerindeki karbon ayak izinin düşük tutulması, hem imalatçı için maliyetin düşürülmesine hem de sonraki nesiller için sürdürülebilir bir gelecek fikrinin geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Toz kaplama veya boyama süreçleri pek çok endüstride en çok enerji harcanan kalemlerden biridir. Bir otomobil üretim sürecindeki elektrik tüketiminin bölümlere göre dağılımını incelenirse elektrik tüketimin yarıya yakını boyama atölyesinde gerçekleşmekte olduğu anlaşılmaktadır [9]. Diğer üretim endüstrilerinde de durum buna benzerdir. Bu nedenle boyama ve kaplama teknolojilerindeki herhangi bir iyileşme enerji verimliliğini arttıracak ve ilgili sektörlerin üretimlerini daha ucuza mal etmesiyle ülke ekonomilerine büyük katkı sağlanmış olacaktır.

Ülkemizde sürekli artan enerji ihtiyacı, enerjinin verimli kullanılmasına yönelik çalışmaları gitgide artırmaktadır. Sektör bazında incelendiğinde kimya, otomotiv, plastik, gıda, çimento, seramik, demir çelik gibi birçok sanayi sektöründe enerji yoğun olarak kullanılmaktadır. Enerji tasarruf oranları ise yapılan çeşitli çalışmalarda

belirlenmiştir [10]. Enerji maliyetlerinin yanında, üretim sektörlerinde kullanılan hammaddelerin yurt dışından temin edilmesi işletmelerin gider kalemleri arasında önemli bir yer tutmaktadır.

Elektrostatik boyama teknolojisi çoğunlukla metal yüzeyler üzerinde uygulanmaktadır. Bu sayede korozyona karşı direnç kazanan malzeme çetin çevre koşullarına karşı da dayanıklı bir malzeme halini almaktadır [11]. Kullanılan metot sayesinde boyama verimi yükselirken boyanın uygulama süresi de kısalmaktadır. Tez kapsamında elektrostatik toz boyama tesisinin manuel uygulamadan otomasyon uygulamasına geçişi ve bunun enerji verimliliğine katkısı incelenmiştir.

Elektrostatik kaplama kavramı, 1930'larda ve 1940'larda tanınmıştır. Elektrostatik kaplama, partiküllerin yüklenmesini, yüklü partiküllerin püskürtülmesini veya atomize edilmesini ve yüklü partikülün topraklanmış bir yüzeye biriktirilmesini içerir. Depolanan parçacıklar daha sonra bir film üretmek için, genellikle ısıyla kürlenir. Elektrostatik toz kaplamanın avantajı, organik veya sulu çözücü kullanmadan kaplama yapmayı sağlamasıdır.

Organik çözücülerin kullanımı, çevresel ve işletme maliyeti açısından istenmeyen bir durumdur, çünkü operatörlerin zararlı kimyasallara maruz kalmasını ve uçucuların çevreye salınmasını önlemek için taşıma ve toplama sistemleri bulunmalıdır. Sulu çözeltilerin veya süspansiyonların kullanılması, genellikle suyun yavaş kuruma hızından (buharlaşma ısısı: 40,65 kJ/mol) dolayı daha uzun işlem süreleri ve yüksek enerji tüketimi gerektirir. Ek olarak, elektrostatik toz kaplama işleminin transfer verimlerinin, geleneksel sıvı sprey kaplama ya da kuru toz akışkanlaştırılmış yatak işlemleriyle görüldüğünden daha büyük olduğu bulunmuştur [12, 13].

Elektrostatik toz kaplama ayrıca, elektrostatik yük (veya elektrostatik olmayan toz kaplama) kullanmadan kuru toz kaplamaya kıyasla daha yüksek transfer verimleri sağlar. 40-100 kV yük gerilimi uygulandığında genellikle % 20 daha yüksek transfer verimi görülür. Bu verimler kaplama malzemesinin parçacık boyutunun küçülmesiyle artar [14, 15]. Elektrostatik toz boya ile rapor edilen % 80-90'dan daha yüksek transfer

verimlerine ek olarak, geri dönüşüm sistemleri % 100 oranında kaplama tozu geri kazanımına izin vermiş ve üretim israfını daha da azaltmıştır [16, 17]. Kaplama çözücülerinden kaynaklanan uçucu organik bileşik (UOB) emisyonlarını sınırlayan giderek artan katı çevre yasaları, bu teknolojinin hem Avrupa hem de ABD'de, 1960'larda ve 1970'lerin başlarında metal terbiye endüstrisi tarafından hızlı bir şekilde benimsenmesini sağlamıştır [18]. Diğer endüstrilerde daha çevre dostu ve enerji açısından verimli süreçler için devam eden çabalar, bu teknolojinin elektronik, plastik ve ahşap ürünlerini işlemekte kullanmasına ve hatta gıda işlemede kullanılmak üzere uyarlanmasına yol açmıştır [19].

Son zamanlarda, elektrostatik toz kaplama, farmasötik imalatta kullanım için araştırılmıştır [20]. Birçok farmasötik toz, yalıtkan malzeme olarak sınıflandırıldığından, birikimi yavaş yük azalmasıyla yüklemeye elverişlidir ve elektrostatik toz boya ile kullanım için uygun hale getirilebilmektedir [21] Farmasötik işlemlerde kuru toz kaplama, çözücülere ihtiyaç duymadan, özellikle neme duyarlı aktif farmasötik terkip maddelerinin veya biyolojik maddelerin işlenmesinde imalat için avantajlı olabilir. Aynı zamanda, kaplama çözeltilerinin/süspansiyonlarının mikrobiyal test edilme ihtiyacını ortadan kaldırır ve işlem zamanlarını ve enerji tüketimini azaltır, böylece işletme maliyetlerini azaltır.

Elektrostatik toz kaplamanın, kuru toz kaplama verimliliğini arttırdığı, uygulanan voltaj olmadan kuru toz kaplama ile karşılaştırıldığında, tablet kaplama sırasında elde edilen daha yüksek kaplama seviyeleri olarak bildirildiği gösterilmiştir [22]. Elektrostatik toz boya kaplamanın daha yüksek transfer verimi, bu tekniği farmasötik olarak daha çevre dostu ve enerji verimli kuru toz boya kaplamaya doğru ilerletmek için çekici kılmaktadır.

Shah ve ark. yaptıkları çalışmada, ince ve kalın toz partiküllerini kullanarak boyama işlemini gerçekleştirmişler ve Navier-Stokes denklemini de kullanarak boyama kalitesi ve boyanın verimli kullanımı için analiz gerçekleştirmişlerdir. İnce olarak kullanılan toz tanelerinin üstünlüğünü ortaya koymuşlardır. Yüzeyin özellikleri de boyama işleminin sağlıklı yapılabilmesi açısından önemlidir. Bu maksatla geliştirilen yüzey temizleme

solüsyonları da ön işlem için kullanılmaktadır [23]. Cazaux yapmış olduğu çalışmada elektrostatik toz boyama için kritik kalınlığın belirlenmesi için bir analiz yapmıştır. Elektrik alanın ve yalıtkan yüzey için dielektrik alanın etkileri hakkında incelemeler yapmıştır [24]. İncelenen çalışmalarda elektrostatik toz boyama teknolojisi ilaç sanayisinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Çözücüsüz olarak uygulanabilen boyama teknolojisi sayesinde ilaç üzerinde ve kullanıcı açısından olumsuz etkiler de en aza indirilmektedir [20, 25-27].

Tez kapsamında elektrostatik toz boyama sisteminin kontrol ve otomasyon sistemleri eklenerek ortaya konabilecek tasarruf potansiyelleri hesaplanarak sistemin geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Elektrik ve doğalgaz tüketimi açısından tasarruflar hesaplanmış, iş yapma potansiyelindeki artış tespit edilerek boya hammaddesindeki tasarruf da ortaya konulmuştur. Elektrostatik boyama işlemi, otomobil ve beyaz eşya endüstrisi dahil olmak üzere geniş bir yelpazede endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir kaplama yöntemi haline gelmiştir.

Püskürtme kaplamasının genel prensibi, çeşitli şekillerde kaplanmış hedefler üzerinde sıvı damlacıkları veya katı toz parçacıklarını biriktirmektir. Elektrostatik kaplama işlemi üç ana aşamadan oluşur: damlacık oluşumu ve şarjı, nakliye ve depolama. Bu işlemin komplikasyonuna (özellikle bazı keskin kenarlar ve girintili alanlar olduğu zaman), kullanılacak malzemenin fiziksel özellikleri, uygun elektriksel ve mekanik koşullar ve kaplanacak hedef yüzey gibi çeşitli faktörler neden olmaktadır. Bu neden otomasyonlu sistemler enerji verimliliğin yanı sıra kullanıcıdan kaynaklanabilecek pek çok üretim hatalarını da ortandan kaldırmış olacaktır.

Tez 5 bölüm altında toplanmaktadır. Giriş bölümünde boyama ve kaplama teknolojilerinin temel kavramları ve tarihçesi özetlenmektedir. Enerji verimi ve sürdürülebilirliğin önemi vurgulandıktan sonra tezin kapsamı ve amacı belirtilmektedir. 2. bölümde elektrostatik toz kaplama endüstrisi genel hatlarıyla ele alınmaktadır. Elektrostatik toz kaplamanın diğer kaplama yöntemlerine göre avantajları belirtildikten sonra kullanılan malzemeler ve kaplama süreçleri ele alınmaktadır. 3. bölümde malzeme ve yöntem anlatılmaktadır.

1. ELEKTROSTATİK TOZ KAPLAMA ENDÜSTRİSİ

1.1. Genel Bakış

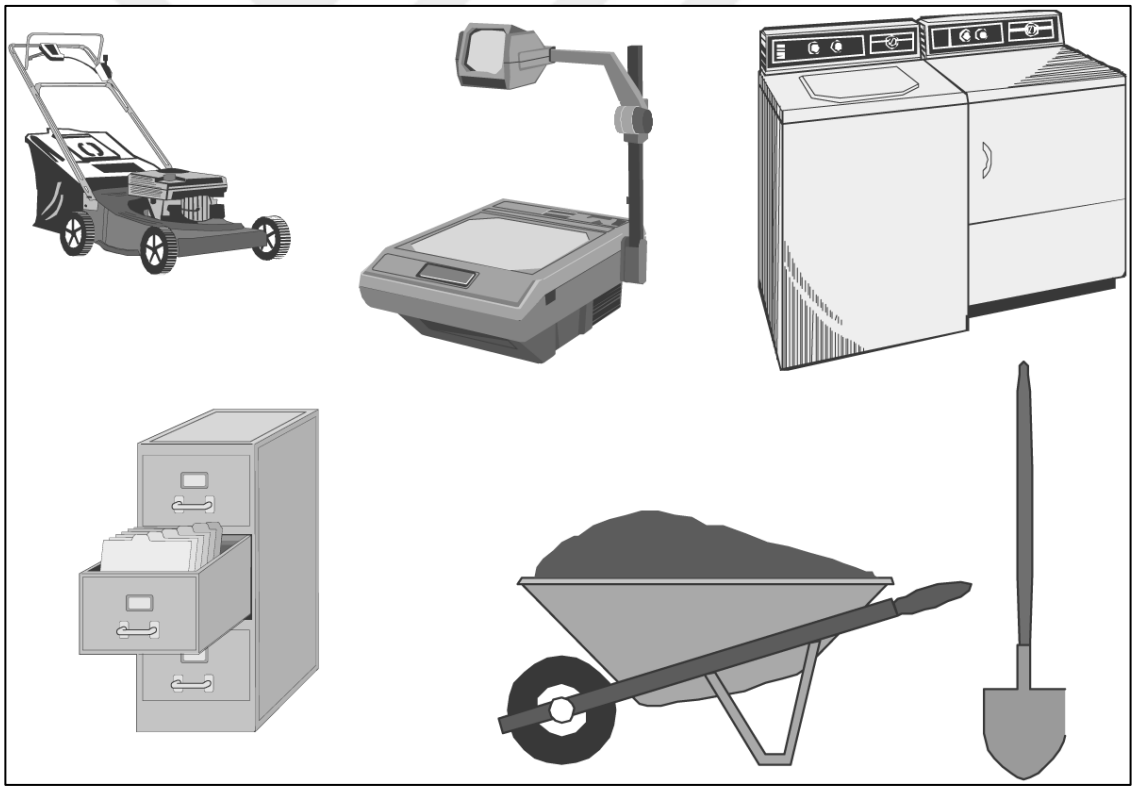
Toz boyama, ince şekilde öğütülmüş bir reçinenin (toz) bir yüzeye uygulanması ve bu tozun ısıtılması sürecidir. Isıtma işlemi sırasında, toz eriyerek düzgün, homojen ve sürekli bir kaplama oluşturur. Toz kaplamalar uygulandığı yüzeylere mükemmel korozyon, darbe ve aşınma direnci kazandırmanın yanında kalıcı parlaklık sağlarlar. Toz kaplama süreci dayanıklı kaplamaların elde edilmesine bağlı olarak, insan gücü, malzeme ve enerji maliyetlerinde sağladığı avantajlarından dolayı farklı uygulamalar için üreticiler tarafından tercih edilmektedir.

Toz kaplama yönteminin kullanılması, paslanma ve aşınmaya karşı korunması için metal yüzeylere tozların alev püskürmesi yapıldığı 1950'lere kadar uzanmaktadır. Ancak ilk çalışmalarda tutarsız film kalınlıklarının oluşmasından dolayı bu yöntem istenilen seviyede uygulama alanı bulamamıştır. 1960'ların başında piyasaya sunulan elektrostatik sprey ekipmanı, soğuk yüzeylere uygulanacak toz kaplamaların kullanılmasını sağladı, böylece daha düzgün, daha ince bir yüzey uygulaması ve buna bağlı hammadde tasarrufu sağlandı.

Günümüzde, koruyucu kaplama gerektiren birçok üretim ortamında toz kaplama işlemleri kullanılmaktadır. Farklı sektörler için estetik, koruyucu ve uzun ömür özellikleri sağlamak ve maksimum sertlik, kimyasal direnç ve parlaklık elde etmek için toz formülasyonları oluşturulabilmektedir. Toz kaplamalar sıcak ve soğuk yüzeylere aşındırıcılar veya yüksek basınç kullanıldığında uygulanabilir. Ayrıca, sürecin sadeliği otomasyonu kolaylaştırır.

Otomobil üreticileri, örneğin, kaput altındaki parçaları sıcaklık, atmosfer ve basınçtaki aşırılıklardan korumak için toz kaplamalar kullanmaktadır. Otomobil endüstri aynı zamanda, toz kaplamaların tekerlekler, tamponlar, ayna çerçeveleri, yağ filtreleri, akü

tepsileri ve helezon yaylar üzerindeki yüzey kalitesini iyileştirdiğini de keşfetti. Bazı cihaz üreticileri, çok enerji harcanan çamaşır makinesi kapaklarına porselen bir son uygulama işlemini özel olarak formüle edilmiş çizilmeye dayanıklı toz boyamayla değiştirmişlerdir. Menzil muhafazaları, dondurucu dolapları, kurutucu tamburları ve mikrodalga fırın boşlukları ve dış kabuklar gibi ana cihaz parçaları artık toz kaplıdır. Açık çim mobilya, bahçe traktörleri, el arabaları ve kürek de toz kaplamadan faydalanır. Şekil 1.1, toz kaplı öğelerin bazı örneklerini göstermektedir. Endüstri araştırmacıları, akıcılık ve parlaklık, düşük sıcaklıkta sertleşen kaplamalar, yüksek sıcaklık kaplamaları ve ahşap tozu kaplamaları için akrilikler gibi yeni toz kaplama malzemelerini araştırmaya ve geliştirmeye devam etmektedir.



Şekil 1.1. Toz boyama yöntemiyle kaplanan ürünlere örnekler

1.1.1. Ekonomik faydalar

Toz kaplama ve sıvı kaplama işlemlerindeki donanım ve malzeme maliyetleri yakın olsa da, toz kaplama işlemleri diğer yüzey kaplama yöntemlerine göre bir dizi avantaj sağlar. Bunlar şunları içerir:

- Daha düşük reddetme
- Daha az yer gereklidir
- Daha az malzeme kaybı
- Düşük enerji maliyetleri
- Düşük eğitim ve işçilik maliyetleri
- Daha düşük atık bertaraf maliyetleri
- Daha verimli temizlik işlemleri
- Daha düzgün bitişler

Toz kaplama malzemeleri kullanıma hazır olarak sevk edilir ve uygulanması kolaydır, böylece sıvı kaplama işlemleriyle karşılaştırıldığında eğitim, kurulum ve işleme ile ilgili işgücü maliyetleri düşüktür. Toz kaplamanın genel kullanım verimliliği, birçok sıvı sprey kaplama yöntemine kıyasla yüksektir (% 90-95). Bu yüzden aynı miktardaki kaplama malzemesiyle toz kaplama prosesinde daha fazla alan kaplanır. Ayrıca, sıvı kaplamalar genellikle uygulamadan önce inceltme gerektirir, bu da ek malzeme ve işçilik maliyetlerine yol açar. Toz kaplamada durum böyle değildir.

Toz kaplamalar genellikle elektrostatik olarak uygulanır. Toz, yüklü bir korona alanından geçerken, pozitif veya negatif bir yük kazanır. Tozun çoğu, parça olan en yakın zemine bağlanır ve kalan toz, tekrardan elenip kullanılabilen bir toplama haznesine düşer. Prosesin bu yönü, sıvı kaplama sistemleri ile karşılaştırıldığında, ilk geçiş verimliliğini arttırdığı ve malzeme atıklarını azalttığı için, muazzam bir maliyet tasarrufu sağlar. Malzeme kullanımı %95 seviyesindedir.

Toz kaplama işlemleri, sıvı kaplama işlemlerinden daha az ret ile sonuçlanır. Toz kaplama kuru bir işlem olduğu için hava ve su ile ilişkili sarkma, akma ve kirlenme gibi

sorunlar neredeyse ortadan kalkar. Yüzeyi bir hava hortumuyla havaya uçurmak ve tozu tekrar uygulamak, kabin veya uygulama alanında kaplama reddini kolayca onarabilir.

Toz kaplama ekipmanının temizlenmesi, hortum veya haznenin içinde kalan artık tozu geri püskürtmek için hava kullanılarak kolayca yapılabilir. Sıvı sistemleri temizlemek için, çözücü veya su hatlardan ve ekipmandan geçirilmelidir ve bu zehirli sıvılar bertaraf edilmelidir. Toz kaplama işlemlerinin aktarım verimliliği nedeniyle, sıvı kaplama sistemlerinden daha az malzeme bertarafı gerektirir. Ayrıca, düzgün bir şekilde iyileştirilmiş atık toz, tehlikeli bir atık olarak kabul edilmez, bu nedenle toprak altında depolanabilir.

1.1.2. Çevresel faydalar

Toz kaplama, hava kirliliğinin azaltılmasında etkili bir araç olarak finisaj endüstrisinde büyük ilgi görmüştür. Toz kaplama performans özellikleri sıvı kaplamanınkine eşittir, ancak toz kaplamanın çevresel faydaları onu çok daha üstün kılmaktadır.

Geçmişte, üreticiler geleneksel yüzey kaplama yöntemlerini tercih ettiler, çünkü uçucu organik bileşikler (UOB) sıkı bir şekilde denetlenmemekteydi. Ancak, birçok ülkede çevre düzenleme kurumları, her endüstrinin atmosfere salınan uçucu organik kimyasalları azaltmasını zorunlu kılmıştır. Sonuç olarak, üretim ve düzeltme maliyetlerini azaltmaya çalışan mühendisler, planlarına çevresel düzenleme uyumunu da katması gerekmektedir. Şirketler yalnızca büyüme ve tutarlılığının ölçütleri olan iş hacmi, envanteri ve işletme giderleriyle değil; ayrıca, faaliyetlerinin işçilerin, toplumun ve çevrenin sağlığı üzerindeki etkisiyle de ilgilenmelidirler. Birçok üretim şirketi, bu alanda toz kaplama işlemleri kullanarak büyük tasarruflar gerçekleştirmektedir. Çevresel standartların giderek daha da sıkılaştırılmasıyla birlikte, daha fazla sayıda şirket, geleneksel yüzey kaplama işlemlerinin yerine maliyet etkin ve daha az toksik bir alternatif olarak toz kaplamaya yönelecektir.

Geleneksel kaplama sistemleri, reçineli bağlayıcının bir yüzey üzerinde taşınması için uçucu organik bileşiklere (çözücüler) veya suya dayanır. Kuru olan toz kaplama sistemleri, kaplama ve akış sağlamak için bir çözücü gerektirmez. Bu nedenle, eğer

varsa, işleme sırasında havaya ya da suya çok az toksik bileşik salınmaktadır. Toz kaplama sistemlerinde karıştırma, temizleme veya bakım için hiçbir çözücü gerekli değildir ve bu nedenle tehlikeli maddelerin depolanması için güvenlik odaları gereksizdir. Çözücü emisyonları neredeyse ortadan kalktığı için, uygun şekilde tasarlanmış bir toz kaplama sisteminde dışarıya hava tahliyesi gereksizdir. Tozların kürlenmesi sırasında ortaya çıkan düşük miktarda toksik, gaz veya patlayıcı dumanlar, kürleme fırınındaki havalandırma gereksinimlerini de azaltmaktadır. Ek olarak, toz kaplama malzemelerinin çoğu, ağır metal içermez ve malzemelerin taşınması için özel bir izin veya kamyona gerek yoktur (soğutmaya ihtiyaç duyabilen çok düşük sıcaklık veya çok hızlı sertleşen malzemelerin taşınması haricinde). Gereğinden fazla püskürtülen toz yüksek sonra da geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir; geri kalan kısım kürlenebilir ve bir blok olarak depolama sahasına gönderilebilir.

Sıvı sistemlere göre avantajları nedeniyle, toz kaplama sistemi kurulumları dramatik bir oranda devam etmektedir. Malzeme, ekipman ve yeni uygulamalar ve yüzeyler üzerindeki geliştirme çalışmaları, toz kaplama endüstrisine dinamik değişiklikler getirecektir. Birkaç yıl önce mümkün olmayan uygulamalar, yakın gelecekte pratik ve avantajlı hale gelebilir. Potansiyel toz kullanıcısı, toz kaplama malzemeleri, uygulama, bakım ve temizlik konusundaki en son gelişmelerden haberdar olmak için tedarikçilerle yakın bir şekilde çalışmalıdır. Toz kaplama işleminin bir son işlem olarak kullanılması, hızlı bir şekilde büyüdü ve yakın bir gelecekte hiçbir zaman yavaşlama belirtisi göstermemektedir.

1.2. Toz Kaplama Malzemeleri ve Performans Özellikleri

Toz formunda üretilen ve kullanılan eşsiz bir kaplama yöntemi olan toz kaplama, günümüzün kaplamalarına uyumlu olmasıyla ünlüdür. Kuru, katı ve film oluşturucu kaplama tozları, yüksek katılarda, suda indirgenebilen, radyasyonla sertleşen ve elektro-kaplama teknolojilerinde kullanılan sıvı malzemelerden ayrılır.

Toz kaplama aslında kaplanmış bir madde kürlemeyi veya füzyonu tamamlamak için gerekli olan sıcak fırın döngüsünden çıkana kadar koruyucu, dekoratif bir boya değildir.

Pişirme öncesinde, kaplama tozları ince öğütülmüş plastik bileşimlerdir. Sonuç olarak, toz kaplamalarda kullanılan çoğu reçine, sıvı boyalarla kullanılanlardan oldukça farklıdır. Sıvı boyalar, çözücülerde ve/veya suda çözülebilen veya bunlarla karışabilen reçineler gerektirirken, toz kaplamalar katı olan reçineler kullanılır. Toz kaplama reçineleri, ortam sıcaklığında ve makul ölçüdeki yüksek depolama sıcaklıklarında katı formda olmalıdır. Aynı zamanda, ısıtıldığında sürekli bir kaplama filmine akışa izin vermek için düşük viskozite indeksine keskin bir şekilde eritebilecek kapasitede olmalıdırlar.

Toz kaplama yönteminin ilk yıllarında, 1960 ve 70'lerde, kaplama tozlarının üretimi için mevcut katı reçine sistemlerinin sayısı nispeten kısıtlıydı. Sonuç olarak, endüstrinin finisaj endüstrisinin farklı ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetleri üzerinde sınırlamalar vardı. Bununla birlikte, toz kaplama endüstrisinin büyümesine birçok yeni reçine sistemi ve diğer fonksiyonel bileşenlerle sonuçlanan teknolojik genişleme eşlik etmiştir. Bu sayede, günümüzün çözücü veya su bazlı pişirme emayelerinin çoğunun özelliklerini karşılamak ve çoğu kez yenmek için daha geniş çapta kaplama tozları üretilmiştir.

Endüstri finisajları için termoplastik, termoset ve radyasyonla kürlenen üç ana kaplama tozu çeşidi mevcuttur [28]. Diğer endüstriyel yüzey kaplamaları gibi, kaplama tozları da son kullanıcı tarafından tanımlanan çok özel son işlem ihtiyaçlarını karşılamak için ayrı ayrı formüle edilir. Bu, son işlemcinin istenen renk ve görünüm ve film performansı gereksinimlerini eşleme kaplama işlemindeki belirli kısıtlamalar dahilinde eşleştirmeyi içerir. Benzersiz özelliklere sahip yeni tozlar sürekli olarak ortaya çıkmaktadır. Buna göre, herhangi bir endüstriyel finiş seçiminde olduğu gibi, kullanıcılar ve toz tedarikçileri arasında yakın bir ilişki geliştirilmelidir. Bu, titiz şartların tam olarak anlaşılmasını ve doğru son işlem tozunun sağlanmasını sağlar.

Toz kaplama endüstrisi olgunlaşmaya devam ederken, pek çok toz formülü hazırlayıcı, çok çeşitli kullanıma hazır formülasyonlar içerecek şekilde standart ürünlerini genişletmektedir. Bu, son kullanıcılara daha düşük bir maliyetle hızlı teslimat için stoktan bir toz seçme seçeneğine izin verir. Bir stok malzemesinin veya özel bir formülasyonun seçilmesi olsun, son kullanıcının, bir kaplamanın son kullanımında

gerekli olan tüm uygun fiziksel ve görünüş özelliklerinin sayıldığı detaylı spesifikasyonlara dayanan bir kaplama seçmesi önerilir [29-31].

1.2.1. Termoplastik tozlar

Isı uygulamasından sonra, termoplastik toz erir ve bir film oluşturacak biçimde yüzey üstünde akar. Soğutma işleminden sonra oluşan katı form aynı kimyasal bileşime sahip olmaya devam eder. Termoplastik kaplama tozları, yüksek moleküler ağırlığa sahip termoplastik reçinelere dayanmaktadır. Bu kaplamaların akış ve film özellikleri, reçinelerin temel özelliklerine bağlıdır. Bu sert, esnek ve daha maliyetli reçineler, sprey uygulama ve ince filmlerin birleştirilmesi için gerekli olan çok ince parçacıkların içine yerleştirildiğinde zorluklar sergilemektedir. Sonuç olarak, termoplastik reçine sistemleri, daha yüksek film kalınlıklarında fonksiyonel kaplamalar olarak daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak polimerin erime sıcaklığının üstünde metalin ön ısıtılmasıyla yapılan akışkan yataklı uygulama tekniği ile uygulanırlar. Termoplastik tozlar, yüksek performans için daha kalın film gerektiren öğelerin kaplanması için daha uygundur. Genellikle sıvı boyalarla aynı pazarlarda rekabet etmezler [32]. Şekil 1.2 yaygın olarak kullanılmakta olan termoplastik tozların kimyasal yapılarını göstermektedir.

1.2.1.1. Polietilen

Polietilen tozlar, endüstriye sunulan ilk termoplastik kaplama tozlarıdır. Bu tozlar mükemmel kimyasal dayanıklılığa, tokluğa ve elektrik yalıtım özelliklerine sahiptirler. Bu tür kaplamaların film yüzeyi pürüzsüz, dokunuşu kolay ve orta parlaklıktadır. Polietilen kaplamalar, viskoz ve yapışkan malzemelerin yüzeylerinden temizlenmesini sağlayan iyi salma özelliklerine sahiptir. Yüksek yoğunluklu polietilen kaplamalar, düşük yoğunluklu kaplamalardan daha sert ve daha kimyasal olarak dirençlidir. Laboratuvar ekipmanları, mobilya ve tel eşyalarını kaplamak için kullanılırlar. Açık havada dayanıklı değildirler [33].

1.2.1.2. Polipropilen

Yüzey kaplaması olarak kullanıldığında, polipropilen bir plastik malzeme olarak sunduğu aynı kullanışlı özelliklerin çoğunu sunar. Kararlı yapısı nedeniyle, polipropilen metal veya diğer yüzeylere yapışmaya çok az eğilimlidir. Bu, bir kaplama tozu olarak kullanıldığında doğal polipropilenin kimyasal olarak modifiye edilmesini gerekli kılar, böylece kaplamanın yüzeye yapışması sağlanabilir. Isıtılmış akış döngüsünden sonra çatlamayı önlemek için su verme yaygındır.

1.2.1.3. Naylon

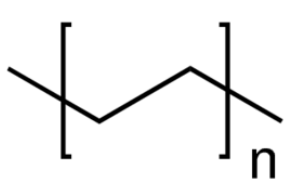
Yaygın olarak kullanılan naylon tozları naylon 11 reçinesini içermektedir. Genel olarak, mükemmel aşınma ve darbe dayanımı olan sert bir kaplama ve uygun bir astar üzerine uygulandığında düşük sürtünme katsayısı sunarlar. Fiziksel özellikleri ve görünümü geliştirmek için naylon ile kaplama yaparken su söndürme kullanmak yaygındır. Naylonun bir kaplama tozu olarak ilginç bir kullanımı, mekanik tasarım alanındadır. Düşük sürtünme katsayısı ve iyi yağlama özelliğinin benzersiz kombinasyonu naylonu, otomotiv spline şaftları, röle pistonları, vites çatalları ve diğer yatak yüzeyleri, tarım ekipmanları ve tekstil makineleri gibi kayar ve döner yatak uygulamaları için ideal hale getirir.

1.2.1.4. Polivinil klorür

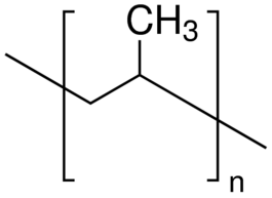
Polivinil klorür (PVC) kaplama tozları iyi dış dayanıklılığa sahiptir ve orta yumuşaklık hissi ve parlak yüzeyli kaplamalar sağlar. Uygun bir astar boya üzerine uygulandığında çoğu metal yüzeylere iyi bağlanırlar. PVC kaplamalar iyi ekonomi sunabilir ve bükme, kabartma ve çizim gibi metal imalat işlemlerinde meydana gelen strese dayanabilir. Mobilya, raflar, tanklar ve çerçeveler PVC kaplamaların uygulama alanları arasındadır.

1.2.1.5. Termoplastik poliester

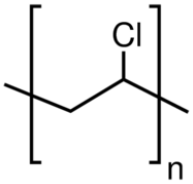
Termoplastik poliester tozlar, astar boya gerektirmeksizin çoğu metal yüzeye iyi yapışır. Aynı zamanda iyi dış dayanıklılık sergilerler. Termoplastik poliester tozlar dış mekan metal mobilya ve ekipman gibi ürünlerin kaplanmasında kullanılmaktadır.



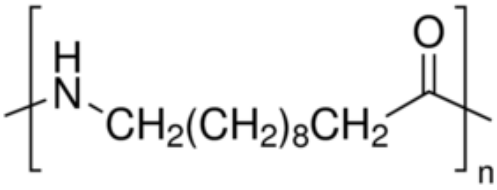
Polietilen



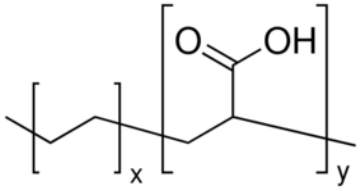
Polipropilen



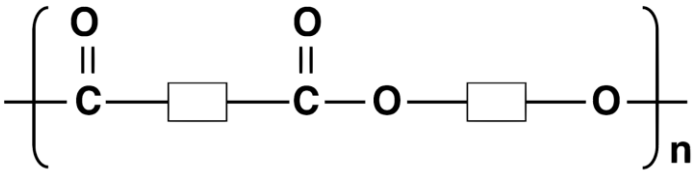
Polivinil klorür



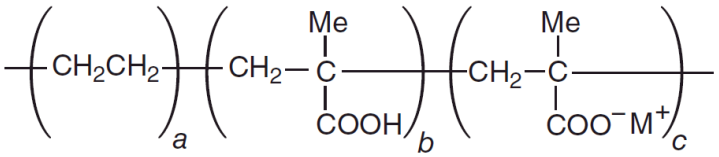
Naylon 11



Etilen Akrilik Asit Kopolimer



Poliester



Surlyn®

Şekil 1.2. Toz kaplamada yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerlerin kimyasal yapıları

1.2.1.6. Etilen akrilik asit kopolimer

Bir etilen akrilik asit (EAA) kopolimeri ana bileşeninden oluşan kaplama tozları, iyi yapışma ve korozyon direncine sahiptir ve mükemmel dış dayanıklılığa sahip sert, hasara dayanıklı bir film ile sonuçlanır. Farklı son kullanım alanları arasında tel, spor malzemeleri, deniz bağlantı parçaları, valfler ve daha fazlası bulunur.

1.2.1.7. Surlyn®

Surlyn® reçinelerine dayanan kaplama tozları, yüksek düzeyde film sertliğinin yanında kimyasallara ve aşınmaya karşı direnç sağlar. Bu reçinenin dayanıklılığının bir örneği, golf toplarını kaplamak için kullanılmasıdır. Surlyn için diğer yaygın kullanımlar kırılmaya dayanıklı cam kaplar, dış mekan mobilyaları ve deniz donanımlarıdır.

1.2.2. Termoset tozlar

Termoset kaplama tozları termoplastiklerden büyük ölçüde farklıdır. Başlangıçta düşük moleküler ağırlıklı katı reçinelere dayanırlar. Isıtıldığında, termoset-kaplama tozları daha yüksek molekül ağırlıklı ürünler oluşturmak için kimyasal tepkimelerin de gerçekleşmesiyle erir, akar ve çapraz bağlar oluşur. Kürlenmiş kaplamalar, ilk uygulanan reçinelerden farklı kimyasal yapılara sahiptir. Yeni oluşan sertleşmiş malzemeler ısıya dayanıklıdır ve aşırı sıcağa maruz kalsalar bile sıvıya dönüşmezler. Daha kırılgan reçine sistemlerine dayanan tozlar, 10-40 µm aralığında ince tanecikler halinde öğütülebilir. Bu reçine sistemleri kullanılarak, reolojisi nedeniyle, sıvı temelli teknolojilerinden üretilen kaplamalara eşdeğer veya daha üstün özelliklere sahip 25-75 µm aralığında ince boya kaplamalar üretilebilir.

Termoset kaplama tozlarının teknolojik olarak genişlemesi uzun yıllar devam etmiştir. Sıklıkla, birden fazla jenerik kaplama tozu türü, spesifik son kullanımları karşılamak için özel olarak formüle edilebilir. Son olarak, kaplama tozunun seçimi, ekonomi ve performansa bağlıdır ve toz tedarikçileri ile kullanıcılar arasındaki işbirliğiyle sağlanmalıdır.

1.2.2.1. Epoksi reçine içeren sistemler

Epoksi tozu, geniş bir formülasyon esnekliğine sahip önde gelen bir termoset kaplama tipidir. Hem kalın film fonksiyonel son kullanım hem de ince film dekoratif kullanım için uygundur. Çapraz bağlama sistemleri, epoksi yapıştırıcılarında veya iki parçalı epoksi boyalarında kullanılanlara benzerdir ve çoğu oda sıcaklığında kararlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

1.2.2.2. İşlevsel epoksiler

Kalın film fonksiyonel epoksilerin birincil kullanımları elektriksel yalıtım ve korozyon koruması içindir. Yalıtım kullanımında, epoksi tozları, bir elektrik bileşeninin kıvrımlarını tam olarak izleyen sert bir katman oluşturur. Boşluksuz ve düşük kütleli kalıcı bir integral yalıtım olmak için parça yüzeyine bağlanır. Tipik uygulamalar arasında otomobil alternatörleri, elektrik motorları ve anahtar dişlileri bulunur.

Korozyon koruması için, epoksi tozları düşük maliyetli ve az bakıma ihtiyaç duyar. Ayrıca, kimyasal olarak agresif ortamların çoğuna karşı uzun süreli koruma sağlar. Yeraltı gazı ve petrol sahası dağıtım boruları üzerinde koruyucu bir kaplama sağlarlar. Yüksek sıcaklıklara ve basınçlara dayanıklı epoksi tozları, sondaj yağı için yeraltı borularının iç kısımlarının kaplanması için kullanılır. Epoksi kaplı çelik çubuklar (otoyol ve köprü güverteleri) önemli korozyon koruması sağlar. Paketleme ve taşıma sırasında reaksiyon ilerlemesini önlemek için hızlı uygulama, hızlı kürleme ve soğuk depolama ve nakliye gerektirirler.

1.2.2.3. İnce film kaplamaları

Genel olarak 127 µm'den daha az olan ince film kaplamalar, epoksi reçine ailesinin doğal tokluğunu, korozyon direncini, esnekliğini ve yapışma özelliklerini korurken, çeşitli parlaklık seviyelerinde veya yüzey dokularında oldukça çekici kaplamalar üretmek üzere formüle edilir. Epoksilerin çapraz bağlanma kimyalarındaki birçok gelişme, çok çeşitli film ve görünüm özelliklerine sahip formülasyonları mümkün kılar. Kürleme koşullarının aralıkları, pişirme süreleri ve sıcaklıklar, özellikle genişletilmiştir.

10–30 dakikalık bir süre boyunca 104 °C gibi düşük bir sıcaklıkta veya geleneksel bir fırında çok daha yüksek sıcaklıklarda çok kısa bir süre için pişirilebilen epoksi tozları mevcuttur. Buna iyi bir örnek, epoksi tozunun elek teli üzerine uygulanmasıdır; burada hızlı kürlenme ve ince film oluşturma kabiliyetinin iyi bir kombinasyonunun gerekli olduğu durumlarda.

Mekanik, korozyon veya kimyasal direnç özelliklerinin mükemmel bir kombinasyonuna rağmen, epoksi tozu nispeten zayıf dış dayanıklılık nedeniyle zayıflık gösterir. Epoksi kaplamalar, orijinal formu ister toz ister sıvı olsun, birkaç ay dış ortama maruz kaldıktan sonra hızlı bir şekilde parlaklık kaybı ve tebeşirlenme gösterecektir. Her ne kadar yıpranmış bir epoksi kaplama çirkin görünse de, görünüm kaybının çok ötesinde mekanik, korozyon ve kimyasal direnç özelliklerini koruyabilir. Bu nedenle, dekoratif epoksiler iç kullanımlarla veya UV ışınlarına çok az maruz kalan alanlarla sınırlıdır, ancak bu epoksi tozları için hala çok sayıda olası uygulama alanı bırakır. Tokluk, korozyon ve kimyasal direnç özelliklerinin birleşimi nedeniyle, epoksi tozları büyük cihaz endüstrisinde kullanılmaktadır. Örneğin, bazı uygulamalarda beyaz epoksi tozu, buzdolabının iç kısmındaki ve tel raflardaki porselenin yerini alarak avantaj ve maliyet tasarrufu sağlar. Bir avantaj, kabaca kullanılan daha kırılgan porselen kaplamalarda bulunanlar gibi çatlama ve ufalanmanın ortadan kaldırılmasıdır.

Buzdolabı içlerinde, astar yapımında kullanılabilecek substrat tipinde maliyet tasarrufu vardır. Porselen, düşük karbonlu çelik gerektirir ve 14 aşamaya kadar iyice karıştırılmalıdır. Toz boya, demir veya çinko fosfatlanmış soğuk haddelenmiş çelik kullanabilir. Porselenin yaklaşık 816 °C sıcaklıkta ve termoset epoksi tozlarının ise normalde 191 °C sıcaklıkta pişirilmesi gerektiğinden, önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanır. Cihaz endüstrisinde kullanılan diğer epoksi tozu alanları arasında kurutma tamburlarının iç kaplaması ve mikrodalga fırın boşlukları bulunur. Benzer şekilde, epoksi kaplama tozlarının özellikleri onları yağ filtreleri, yaylar ve güneş ışığına maruz kalma dayanıklılığının önemli olmadığı diğer bileşenler gibi otomotiv parçaları için çok uygun kılar.

Tipik epoksi uygulamaları arasında yangın söndürücüler, raflar, oyuncaklar, transformatör kutuları, buzdolabı gömlekleri, astarlar, kurutma tamburları, banyo armatürleri, mikrodalga fırınlar, buzdolabı rafları, karıştırıcılar ve parçalayıcılar bulunur. Diğerleri süpürücüler, gübre serpme makineleri, dikiş makineleri, eleme, elektrikli el aletleri, yağ filtreleri, oda klimaları, otomobil yayları, ofis mobilyaları, hastane ekipmanları, alet kutuları, otobüs koltuk çerçeveleri, bahçe aletleri, iş makineleri, şişeler ve mutfak mobilyalarıdır. Epoksi tozlarının tipik özellikleri Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Epoksi tozunun tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	HB–7H
Darbe direnci (N/m)	10,508–28,020
Parlaklık (60° metre)	3–100+
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (51 µm film için metal sıcaklığındaki süre)	232 °C'de 3 dakika 121 °C'de 25 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

1.2.2.4. Epoksi-poliester hibrit reçineler

Epoksi reçineleri, belirli asit fonksiyonel poliester reçineleri ile kimyasal reaksiyon sonucunda çapraz bağlanır. Bu sisteme dayalı kaplamalarda, filmin yapısı ve bitmiş ürünün kullanımı, normal epoksi tozlarından farklıdır. “Hibrit” terimi, bu polimer kombinasyonunu açıklamak için çok uygundur.

Epoksi-poliester hibritlerinde, çoğu zaman reçinenin yarısından daha fazla olan yüksek oranda poliester kullanılır. Hibrit kaplamaların özellikleri, birkaç önemli istisna dışında,

poliesterlerden çok epoksilere benzer. Darbe ve bükülme direnci açısından benzer esneklik gösterirler ancak daha yumuşak filmler üretirler. Korozyon direnci, çoğu durumda epoksilerle karşılaştırılabilir, ancak çözücülere ve alkalilere karşı dirençleri, genellikle saf epoksilerden daha düşüktür.

Hibritlerin epoksiler üzerindeki avantajlarından biri, poliester bileşeninin olumlu etkisinden dolayı kür fırında fazla pişirmeden kaynaklı sararmaya karşı çok daha büyük bir direnç göstermesidir. Poliester ayrıca UV ışığına maruz kalmadan kaynaklanan sararmaya karşı gelişmiş bir direnç sağlar, ancak hibritler hala açık havada uzun süreli kullanım için uygun değildir. Açık havada, bu kaplamalar parlaklığını kaybeder ve neredeyse bir epoksi tozu kadar hızlı tebeşirlenmeye başlar. Epoksi-poliester kaplama tozlarının bir başka avantajı, iyi elektrostatik püskürtme karakteristikleridir. Mükemmel transfer verimi ile uygulanabilirler ve köşelere ve girintilere iyi nüfuz ederler.

Tablo 1.2. Epoksi-poliester hibrit tozunun tipik özellikleri

Özellik	**Aralık**
Sertlik (kurşun kalem)	HB–3H
Darbe direnci (N/m)	10,508–28,020
Parlaklık (60° metre)	10–100+
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (51 µm film için metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 10 dakika 149 °C'de 25 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

İnce film dekoratif kullanımı için kesinlikle bir epoksi-poliester hibritin epoksi ailesi ile birlikte kullanılması düşünülmelidir. Epoksi-poliester hibrit uygulamaları şunlardır: alet kutuları, yağ filtreleri, hava temizleyicileri, tarım ekipmanları, klima muhafazaları,

yangın söndürücüler, trafo kapakları, elektrik kontrol kutuları, oyuncaklar, ekran teli, sıcak su ısıtıcıları, radyatörler, elektrikli aletler, raflar yüzey astarları, ofis mobilyaları ve tahıl saklama kutuları. Epoksi-poliester hibrit tozların tipik özellikleri ve aralıkları Tablo 1.2'de listelenmiştir.

1.2.2.5. Poliester

Genellikle ticari olarak kullanılan poliester kaplama tozları çeşitli sertleştirme mekanizmalarına sahip iki temel tiptedir: hidroksil fonksiyonlu poliester (üretan) ve karboksil fonksiyonlu poliester. Her iki sistem de, yüzey bozulma başlamadan önce dış mekanda önemli ölçüde uzatılmış zamanlara dayanabilen süper dayanıklı çeşitler de dahil olmak üzere çok çeşitli özellikler ve ekonomi sunar.

1.2.2.6. Hidroksil poliester (üretan)

Kürlenmiş, hidroksil fonksiyonlu poliester tozu (üretan), uçaklarda, otobüslerde, kamyonlarda ve vagonlarda kullanılan dış kullanımlı üretan boyalara kimyasal olarak benzer. Bu tipteki toz kaplamalar, olağanüstü bir ince film görünümünü ve tokluğu mükemmel aşınma özellikleriyle birleştirir.

Hidroksil-poliester tozu için tipik kürleme, 191 °C'de 20 dakika veya 204 °C'de 10 dakikadır. Kürleme kimyasındaki modern gelişmeler, 20 dakika boyunca 160 °C kadar düşük sıcaklıklarda iyi film özellikleri elde etmeyi mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, düşük kürleme sıcaklıklı sistemler göz önüne alındığında sertlik ve dış dayanıklılık gibi özelliklerin son kullanım için uygun seviyelerde tutulduğundan emin olunmalıdır.

Hidroksil-poliester kimyası, ince film kalınlığı 25-76 µm arasında olan ince film kalınlığı ile iyi performans gösterir. Daha kalın filmler, darbe dayanımı ve esneklik gibi daha zayıf mekanik özellikler sergileme eğilimindedir. Hidroksil poliesterler, ince film görünümünde yüksek kaliteli sıvı boyalar için gerçek rakiplerdir.

Çoğu hidroksil-poliester tozu, kürleme sırasında, ağırlıkça %1-5 veya daha fazla bir emisyon yaymaktadır. Bu, e-kaprolaktam veya uzun süreli paket stabilitesi için mevcut

olan diğer kür reaksiyon-bloke edici ajanlardan kaynaklanmaktadır. Kirlenme veya görünüm kirlenmesini önlemek için emisyonlar pişirme fırınından boşaltılmalıdır.

Hidroksil-poliester tozlarının büyük bir kullanım alanı, minimum film kalınlığındaki mükemmel akışın yüksek yansıtıcılığa neden olduğu aydınlatma armatürlerinin kaplanmasıdır. Diğer kullanım alanları mobilyalar, tekerlekler, tekne römorkları, bahçe traktörleri ve dış dayanıklılık gerektiren diğer uygulamaları içerir. Cihaz endüstrisinde, hidroksil-poliester tozları, aralık yan panellerinde porselen yerine kullanılır. Bu malzeme, endüstrinin dış cilalama şartnamelerinin tüm gereksinimlerini karşılar.

Hidroksil-poliester tozu uygulamaları arasında otomotiv süs parçaları, bahçe traktörleri, menzil yan panelleri ve piliçler, flüoresan lambalar, dekoratif demir, çelik ve alüminyum jantlar, klima dolapları, restoran mobilyası destekleri, veranda mobilyaları, oyun alanı ekipmanları, çit tertibatları, trafo kasaları ve krom jantlar ve döşeme bulunmaktadır. Hidroksil-poliester tozunun tipik özellikleri, Tablo 1.3'te listelenmiştir.

Tablo 1.3. Hidroksil-poliester tozun tipik özellikleri

Özellik	**Aralık**
Sertlik (kurşun kalem)	HB–6H
Darbe direnci (N/m)	3,503–28,020
Parlaklık (60° metre)	5–95+
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (25–51 µm film için metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 10 dakika 160 °C'de 20 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

1.2.2.7. Karboksil poliester

Karboksil poliester, bir başka birincil poliester tozu türüdür. Fonksiyonel-karboksil poliester reçineleri yapısına sahiptir. Kullanımı Avrupa'da geliştirilen teknolojiden ortaya çıkmıştır. Dış cephe kaplamalarında daha fazla çok yönlülük ihtiyacını karşılamak için Kuzey Amerika'da kullanılmaya başlandı. Karboksil-poliester ürünleri, epoksi-poliester hibritlerin dış-dayanıklı türevleri olarak tanımlanabilir. Poliester ile birlikte reaksiyona girmek için geleneksel epoksi reçineleri kullanmak yerine, düşük molekül ağırlıklı triglisidil-izosiyanürat (TGIC) veya bir b-hidroksialkilamid (HAA) kürleyici madde kullanılır. Poliester, bağlayıcı maddenin çok yüksek bir yüzdesini oluşturur ve en azından üretan poliesterlerle karşılaştırılabilir bir şekilde havadan aşınmayı sağlar.

Karboksil poliester tozları tipik olarak 177–204 °C'de 3-15 dakika pişirilir, ancak daha yeni formülasyonlar, uzun sürelerle 138 °C'ye kadar düşük kürler verir. Bu, bazı uygulamalarda üretanla kürlenen poliesterlere göre bir avantaj sağlayabilir. Bu tip poliesterin birincil özellikleri, herhangi bir film kalınlığında mükemmel mekanik özellikler ve gelişmiş kenar kaplamalarıdır. 51–127 μm arasında kalınlığı olan filmler mükemmel akış, parlaklık ve tokluk sunar. Bu kaplamanın 50 μm altındaki kalınlıklardaki görünümü, benzer şekilde pigmente edilmiş bir poliester üretandan daha az pürüzsüz olabilir, ancak farkın mutlaka büyük olması gerekmez. Aşırı pişirmede renk kararlılığı da mükemmeldir. Karboksil poliesterler için, yapışma ve korozyon direnci özellikleri hidroksil poliesterlerle karşılaştırılabilir, ancak kimyasallara ve çözücülere direnç daha az olabilir.

Bu tip poliester tozunun bir uygulaması, yüksek film yapımı ve iyi dış dayanıklılık gerektiren kenar kaplaması kombinasyonunun gerekli olduğu dış mekan trafo dolaplarının kaplanmasıdır. Karboksil-poliester tozlarının tipik uygulamaları sulama borusu ve armatürleri, çit direkleri ve bağlantı parçaları, dış mekan mobilyaları, çim ve bahçe ekipmanları, klima üniteleri, alüminyum ekstrüzyon, çelik ve alüminyum jantlar, transformatörler, tel çit; veya bir son ürünün sert hava koşullarına dayanabilmesini

gerektiren herhangi bir post-biçimlendirme uygulaması. Karboksil-poliester tozlarının tipik özellikleri ve aralıkları Tablo 1.4'te listelenmiştir.

Tablo 1.4. Karboksil poliester tozun tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	HB–6H
Darbe direnci (N/m)	10,508–28,020
Parlaklık (60° metre)	5–95+
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (51–76 µm film için metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 3–10 dakika 149 °C'de 30 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

1.2.2.8. Akrilikler

Akrilikler, dış dayanıklılık gösteren başka bir genel termoset tozu grubunu oluşturur. Toz boya uygulamasında kullanilan ilk akrilikler, sorunsuz uygulama özellikleri ile birlikte dış dayanıklılık için iyi bir ün kazandı. Çoğu akrilik kaplama tozu hidroksil-polester (üretan) ile kürlenmiş ve glisidil veya epoksi fonksiyonlu tiplerdir.

Üretan akrilikler, minimum kürleme sıcaklıkları yaklaşık 171 °C olan hidroksil poliesterlere benzer fırınlama sıcaklıkları gerektirir. Ayrıca mükemmel bir ince film görüntüsü ile karakterize edilirler ve sıvı akrilik boyaların aksine, darbe dayanımı için mükemmel sertlikte bir esneklik seviyesi korurlar. Akrilik tozlar, cihazlarda kullanım için önemli bir özellik olan iyi alkali direncine sahiptir.

Akrilik tozlar, çok kontrol edilebilir ince film uygulamaları sağlayan son derece iyi elektrostatik püskürtme özellikleri göstermektedir. Bir sınıf olarak, akrilikler substrat kalitesine diğer termoset kaplama tozlarından daha hassastır ve birçoğu diğer toz kaplama kimyasallarıyla uyumlu değildir.

Akriliklerin tipik uygulamaları arasında yan paneller, alüminyum ekstrüzyon, buzdolabı dolapları ve kapıları, mikrodalga fırınlar, bahçe traktörleri, bulaşık makinesi dış kısımları, çamaşır makinesi parçaları ve otomotiv kaplamaları sayılabilir. Tablo 1.5, akriliklerin tipik özelliklerini listelemektedir.

Tablo 1.5. Akrilik tozların tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	2–3H
Darbe direnci (N/m)	7,005–17,513
Parlaklık (60° metre)	10–90
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (38 µm film için metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 10 dakika 177 °C'de 25 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

Glisidil metakrilatakrilik (GMA), yaklaşık 149 °C minimum bir kürleme sıcaklığı gerektirir. Bu kaplamalar mükemmel ince film görünümüne ve darbe dayanımı şeklinde esnekliğe sahiptir. GMA akrilikler en fazla su şeffaflığı görünümünde toz kaplamaları yapar ve bu yüksek netliğe dayanan çeşitli otomotiv ve donanım uygulamaları için kullanılır. GMA akriliklerin tipik uygulamaları arasında otomotiv kaplamaları, alüminyum jantlar, motosikletler ve otomotiv astar yüzeyleri için şeffaf kaplamalar bulunur. GMA akriliklerin tipik özellikleri Tablo 1.6'da listelenmiştir.

Tablo 1.6. GMA Akrilik tozların tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	H–2H
Darbe direnci (N/m)	10,508–28,020
Parlaklık (60° metre)	10–95+
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat*
Kürleme aralığı (metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 5 dakika 149 °C'de 25 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

1.2.2.9. Silikon ve modifiye silikonlu kaplama tozları

Silikon ve modifiye edilmiş silikon kaplamalar, 204 °C ile 1.000 538 °C arası çalışma sıcaklıklarına dayanabilir. Malzeme, yiyecekle temas eden pişirme kaplarından motor egzoz sistemlerine kadar alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Silikon tozlarının tipik özellikleri ve aralıkları Tablo 1.7'de listelenmiştir.

1.2.2.10. Diğer poliesterler

Birçok poliester kaplama tozu, uzmanlık, görünüm, uygulama, kürleme, film, fiziksel ve/veya ekonomik özellikler açısından ilave çok yönlülük sağlayan çapraz bağlanma kimyasına dayanmaktadır. Yeni sistemlerden bazıları tescilli veya kullanılabilirliği sınırlıdır ve doğrudan kullanıcılar ve tedarikçiler tarafından tartışılmalıdır. Poliester tozların tipik uygulamaları arasında klima üniteleri, tarım ekipmanları, tel çit, alüminyum ekstrüzyon, transformatörler ve aletler (ön kaplamalı metaller) bulunur. Poliester tozlarının tipik özellikleri ve aralıkları Tablo 1.8'de listelenmiştir.

Tablo 1.7. Silikon esaslı tozların tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	H–5H
Darbe direnci (N/m)	3,503
Parlaklık (60° metre)	10–85
Renk	Sisteme bağlı olarak siyah veya diğerleri
Kürleme programı	227 – 260 °C sıcaklıkta 15 dak.
Çalışma sıcaklığı	204 – 538+ °C (uygulanan yüzey kritik)

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

Tablo 1.8. Poliester tozların tipik özellikleri

Özellik	Aralık
Sertlik (kurşun kalem)	F–2H
Darbe direnci (N/m)	10,508–28,020
Parlaklık (60° metre)	20–90
Renk	Tüm renkler, açık ve dokular
Tuz spreyi altındaki dayanımı	1.000+ saat
Yoğun nem altındaki dayanımı	1.000+ saat
Kürleme aralığı (metal sıcaklığındaki süre)	204 °C'de 10 dakika 191 °C'de 30 dakika

*Çevresel direnç özellikleri, substrat ve ön işlem kalitesi dahil olmak üzere toplam kaplama işleminin bir fonksiyonudur.

1.2.3. Radyasyonla kürlenen tozlar

Radyasyonla kürlenmiş toz kaplamalar için aşırı kısa kürlenme süreleri nedeniyle, daha önce toz kaplama için uygun olmadığı düşünülen birçok madde artık dikkate değer. Sertleşme süresinin azaltılmasının büyüklüğü, kaplama hattının ayak izinin, büyük

fırınlar içeren erken geleneksel tasarımlardan çok daha küçük olmasını sağlar. Bununla birlikte, radyasyon kürlemenin doğası, yayıcıdan kürlenen yüzeye kadar net bir görüş hattı gerektirir. Bu gereklilik, radyasyon kürlemesinin kullanımını, gölge alanı olmayan basit parçalarla sınırlayabilir.

Yüksek yoğunluklu ultraviyole (UV) ışığı altında (yüksek sıcaklıklar yerine) reaksiyona giren çapraz bağlanma kimyasına dayalı poliester kaplama tozları mevcuttur. Bu UV-kürlenmiş tozların erime ve akış için kısa termal maruz kalmaya devam etmeleri gerekir, ancak nihai sertleşme, film yüksek yoğunluklu UV'ye maruz kaldıkça birkaç saniye içinde gerçekleştirilir. Bu kaplama tozlarının eritilmesi ve akması için gereken düşük sıcaklıklar ve kısa zaman periyodları, onları ahşap, plastik veya düzenekler gibi çok fazla ısıya duyarlı yüzeylerde kullanım için çok uygun kılar. Sonuç olarak, UV-kürlenmiş tozlar ilk olarak bu yüzeylerde mobilya, demirbaş, döşeme ve monte edilmiş elektrik motorları gibi son kullanımlar için kullanılır.

Tek bir kaynak olarak yakın kızılötesi (NIR®) enerjinin kullanılması neredeyse anlık bir erime, akış ve sertleşme süreci sağlar. NIR® işlemi, mevcut birçok temel toz kimyası için çalışır. Bu enerji bandının yapısı, toz tabakanın çok hızlı bir şekilde ısıtılmasını (örneğin birkaç saniye), substratın belirgin bir şekilde ısıtılmasını sağlar. NIRcure teknolojisinin erken bir uygulaması, monte edilmiş ve contalanmış gazlı yayları içermiştir.

1.2.4. Kaplama seçimi

Endüstriyel yüzey kaplamaları genellikle bireysel son kullanıcı gereksinimlerine göre özel olarak formüle edilir. Başarılı uygulama, kullanıcılar ve tedarikçiler arasındaki yakın çalışma ilişkilerine bağlıdır. Seçim kesinlikle gösterilen film performansına dayanmalıdır. Bunun nedeni, bir termoset kaplama tozunun film performansının, belirli bir tesiste uygulanan fırınlamaya ve belirli bir temizlik derecesinde ve metal ön muamelesinde belirli bir alt tabakaya tamamen bağlı olmasıdır. Pazardaki birçok ürün tarihsel kurallara uyma eğilimindedir. Toz boya endüstrisinde, belirli bir jenerik tipin

özelliklerini esneten ve belirli tesis koşullarında daha ekonomik bir alternatif haline getirebilecek yeni formülasyon uzmanlığı alanları her zaman gelişmektedir.

Tablo 1.9. Termoset toz boyaların temel özellikleri

Epoksi	- Sert ve esnek - Mükemmel kimyasal ve korozyon direnci ve mekanik özellikler - Dış ortamda zayıf kalıcı renk ve parlaklık
Epoksi-Poliester Hibritler	- Dekoratif film performansı - Çok iyi kimyasal ve korozyon direnci ve mekanik özellikler - Dış ortamda ortalama kalıcı renk ve parlaklık
Hidroksil Poliester	- İnce film tozu uygulamaları - İyi kimyasal ve korozyon direnci ve mekanik özellikler - Dış ortamda çok iyi kalıcı renk ve parlaklık
Karboksil Poliester	- Daha kalın film tozu uygulamaları - Çok iyi kimyasal ve korozyon direnci - Mükemmel mekanik özellikler - Dış ortamda çok iyi kalıcı renk ve parlaklık
Diğer Poliesterler	- Çok iyi kimyasal ve korozyon direnci - Mükemmel mekanik özellikler - Dış ortamda çok iyi kalıcı renk ve parlaklık
Akrilik Üretan	- İnce film toz kaplamalar - İyi kimyasal ve korozyon direnci - Kötü mekanik özellikler - Dış ortamda mükemmel kalıcı renk ve parlaklık
Akrilik Hibritler	- Dekoratif film performansı - Çok iyi kimyasal ve korozyon direnci - İyi mekanik özellikler - Dış ortamda ortalamanın biraz üzerinde kalıcı renk ve parlaklık
Glisidil Metakrilat Akrilik	- İnce film toz kaplamalar - İyi kimyasal ve korozyon direnci ve mekanik özellikler - Dış ortamda mükemmel kalıcı renk ve parlaklık

*Yaygın olarak kullanılan termoset kaplama tozlaının temel özellikleri özetlenmiştir. Bir termoset tozu tipi seçerken, gösterilen film performansı, uygulama özellikleri ve maliyet performansı dengesi gibi ana faktörler odakta tutulmalıdır.

1.3. Ekonomik Avantajlar

Enerji ve işçilik maliyetlerinde azalma, yüksek işletme verimliliği ve çevre güvenliği faktörleri, gittikçe daha fazla sayıda kullanıcı çeken toz boya sistemlerinin avantajlarıdır. Bu alanların her birinde büyük maliyet tasarrufu bulunabilir.

Sıvı kaplama sistemleri ile karşılaştırıldığında, toz kaplama sistemlerinin birkaç belirgin ve önemli ekonomik avantajı vardır. Kendileri tarafından önemli görünmeyen birçok avantaj da vardır, ancak topluca ele alındığında, büyük ölçüde maliyet tasarrufuna katkıda bulunur. Her ne kadar bu bölüm toz kaplamanın tüm maliyet avantajlarını karşılamaya çalışsa da, her bir uygulama kendi özel ihtiyaçları ışığında analiz edilmeli ve uygun maliyet avantajları duruma göre uyarlanmalıdır.

1.4. Elektrostatik Toz Kaplama Prensipleri

Finisaj endüstrisi tarafından kullanılan kaplamalar, esas olarak, özellikle aşırı sıcak ve/veya nemli ortamlarda metallerin aşınmasını önlemek için formüle edilmiştir [13]. Elektrostatik kaplamanın sağladığı çevre ve düzenleyici operasyonun yanı sıra verimlilik artışı ve işlem sürelerinde azalma nedeniyle maliyet tasarrufu paha biçilmezdir. Son 40–50 yıl boyunca, geliştirme çalışmaları, elektronikler için yarı iletken ve korozyona dayanıklı kaplamalar üretme kabiliyeti [34], sıcaklık direncini arttırma [30], verimlilikleri daha da arttırma [35] ve kaplama katmanının estetik amaçlı görünümünü arttırma [36] gibi diğer kaplama zorluklarını ele almaya devam etti. Teknik, ahşap, plastik ve hatta kağıt gibi diğer yüzeylerin işlenmesi için daha da geliştirilmiştir [24, 37, 38]. Bu teknolojinin geniş uygulaması nedeniyle, elektrostatik toz boya kullanımını çevreleyen önemli miktarda bilgi vardır. Bu bölümde, elektrostatik toz boya kaplama prensiplerini, özellikle elektrostatik yüklenme, film oluşumu ve filmin substrata yapışmasının mekanizmalarını özetlenmektedir.

1.4.1. Elektrostatik prensipleri

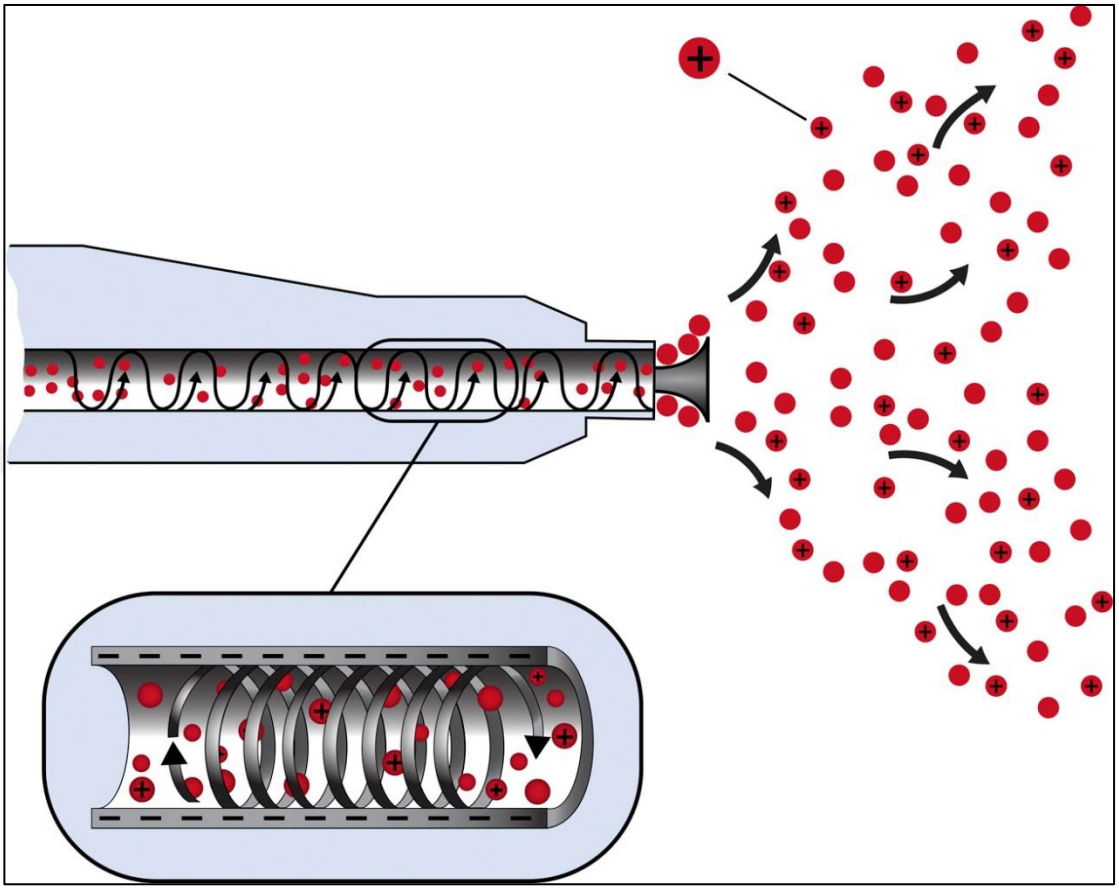
Toz püskürtme tabancaları, püskürtme tabancasından geçen toz parçacıklarına kaplanacak parçalara geçerken elektrostatik yük verir. Tabanca kontrolleri, tozun parçaya birikmesini yönlendirmek için değişen tabanca konumu, hız, desen şekli ve yükleme seviyelerine izin verir.

Toz parçacıklar iki mekanizma ile yüklenebilir: triboelektrik veya korona şarjı. Triboelektrik yükleme, sürtünmeden dolayı yük birikimini tanımlar. “Tribo” Yunanca “sürtmek” anlamına gelen kelimeden türetilmiştir. Bu yükleme mekanizmasında, iki

farklı yüzeyin birbirine temas ettirilmesiyle veya sürtülmesiyle elektronlar bir yüzeyden diğerine aktarılır ve ardından iki yüzey birbirinden ayrılır. Sonuçta yüzeyler ters işaretli yükle yüklenirler veya yük ayrışması oluşur. Triboelektrifikasyon, farmasötik işleme süreçlerinde yoğun olarak çalışılan bir olgu olan toz işleme sırasında elektrostatik yük oluşumunun ana mekanizmasıdır [39-41]. Triboelektrik tabancalar, tabanca duvarı ile partikül arasındaki etkileşimleri veya temasları maksimum yapacak şekilde tasarlanır. Böylece Şekil 1.3'te gösterildiği gibi akışkanlaştırılmış parçacıkların yük birikimi arttırılır. Tabanca duvarı genellikle negatif olarak yüklenme eğiliminde olan PTFE'den oluşur, pozitif yüklü parçacıklara yol açar; ancak, negatif yüklü parçacıklar isteniyorsa bu değiştirilebilir [42, 43].

Genel olarak, triko tabancaları için biriktirme oranları daha düşüktür, bu nedenle hat başına daha fazla tabanca gerekir. Doldurma işlemi parçacıkları duvarlarla temas ettiren atalet kuvvetlerine bağlı olduğundan ve yük transferi tozun ve duvar malzemesinin göreceli kimyasal uyumluluğu ile ilgili olduğu için, işlem hem parçacık büyüklüğü dağılımına hem de püskürtülen tozun kimyasına duyarlıdır. Bazı tozlar spreylenemez. Ayrıca tribo uygulaması için tasarlanmadıkça birçok renk uygulanamayabilir. Bunun nedeni, tribo'nun partikülleri sürtünme yoluyla yüklemesi gerektiği ve partiküllerin yüklenmemesidir.

Çoğu tribo tabancası PTFE'den (politetrafloretilen veya Teflon®) yapılır. Neredeyse PTFE üzerine sürülen her şey pozitif yükle yüklenir. Bu malzeme düşük akış sürtünmesine sahiptir, dayanıklıdır ve toz malzeme tarafından kaplanmaya güçlü bir şekilde direnç gösterir.

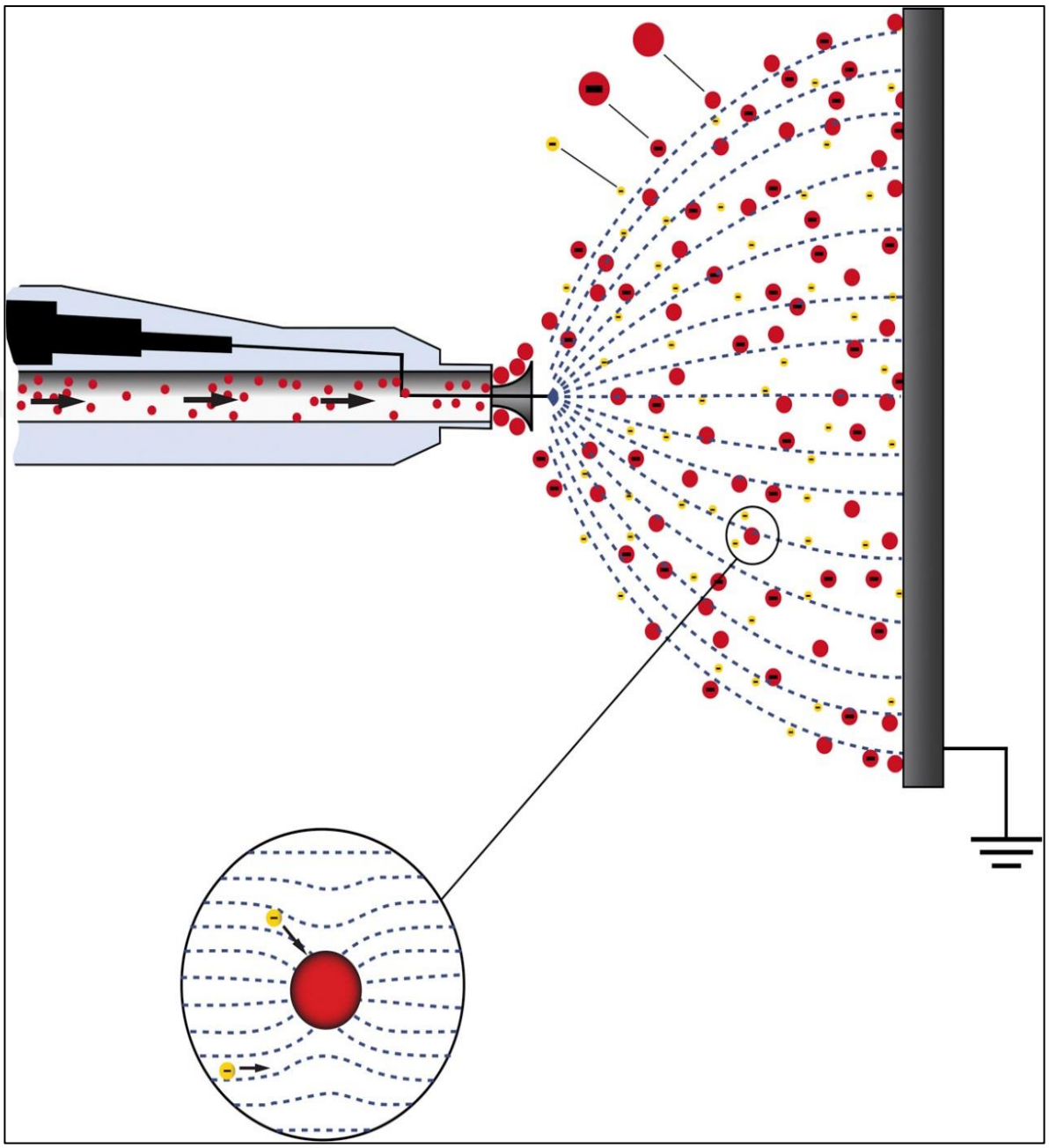


Şekil 1.3. Tabanca duvarı ile partikül çarpışmalarını maksimize etmek için tasarlanmış triboelektrik tabanca şeması [44]

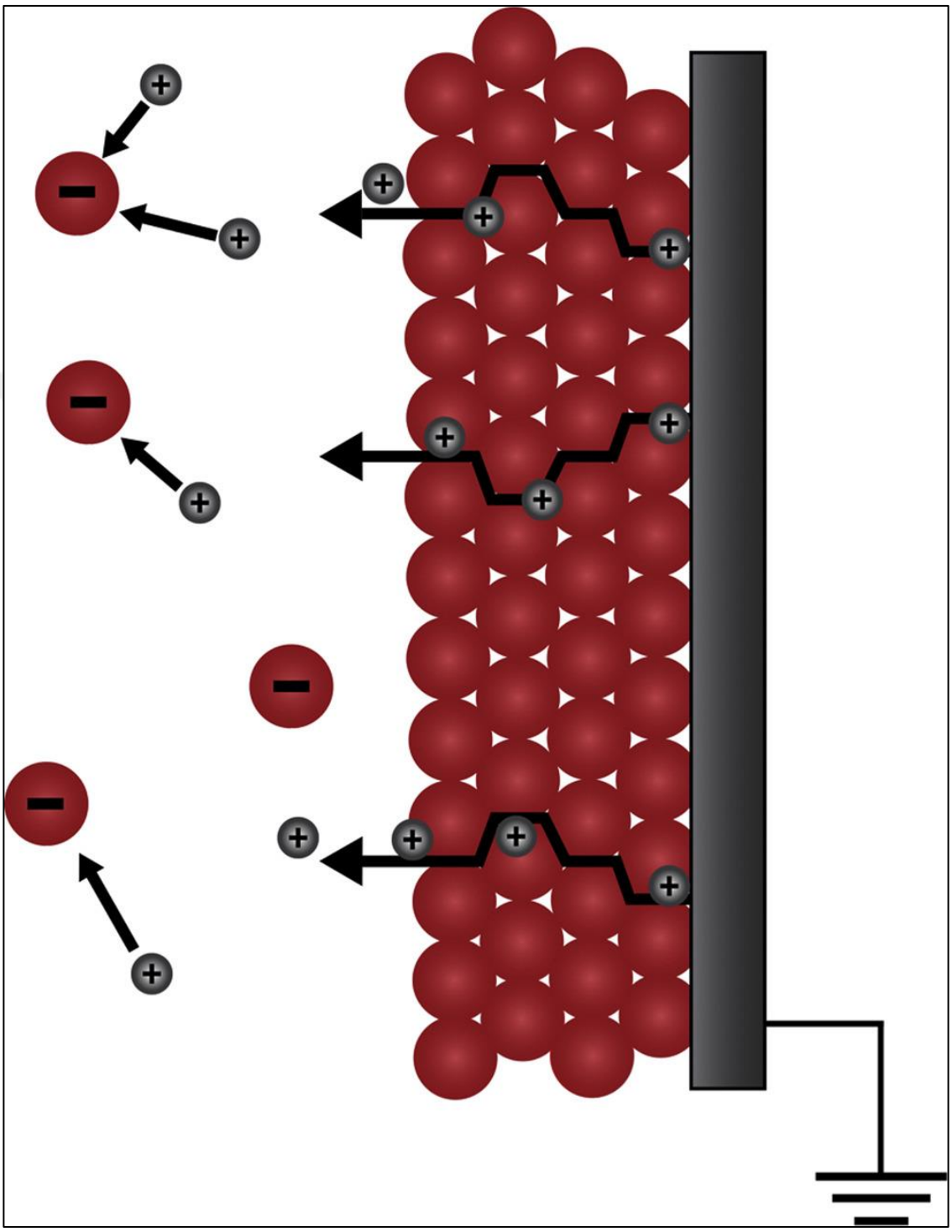
Korona deşarjı olarak da adlandırılan korona yükleme, serbest iyonların varlığında, bir elektrik alanından geçirilerek parçacıkların yüklenmesini tarif eder. Bir korona deşarjı, akımın, genellikle bir gazın içinden, yüksek bir potansiyel noktasından nötr veya topraklanmış bir substrata aktığı, işlemdeki yüksek potansiyel bölgesinin yakınında serbest iyon üreten bir işlemdir. Serbest iyonları üretmek için çevreleyen gaz moleküllerinden elektronları çıkarmak için şekil 2.4'te gösterilen korona tabancası gibi bir korona kaynağı, bir elektrottan, genellikle yüksek kıvrımlı bir çubuktan veya en büyük potansiyel gradyanı oluşturmak için küçük çaplı bir telden ve uygulanan yüksek voltajdan (genellikle 60-100 kV) oluşur. Yüksek potansiyel yayan elektrot ile topraklanmış substrat, genellikle bir plaka veya silindir olan alan, deşarj fenomenini kolaylaştırmak için güçlü bir elektrik alanı üretir [42]. Serbest iyonların varlığında parçacıklar iki mekanizma ile yüklenebilir: (1) alan yüklemesi ve (2) difüzyon

yüklemesi. Elektrik alanına bir parçacığın sokulması, alanı değiştirir, serbest iyonların, Şekil 1.4'ün içinde gösterildiği gibi parçacık tarafından yönlendirildiği ve adsorbe edildiği; buna alan yüklemesi denir. Difüzyon yüklemesi, iyonların gazdaki rasgele hareketinden dolayı iyonlar ve parçacıklar arasındaki çarpışmalar tarafından meydana gelir. Difüzyon yüklemesi, elektrik alanı olmadığında ve genellikle çok küçük parçacık boyutlarında (0,2 μm'den az) ortaya çıkma eğilimindedir. Korona deşarjı tarafından üretilen güçlü elektrik alanı ve korona tabancalarıyla kullanım için önerilen partikül büyüklüğü aralığı 1-100 μm olması nedeniyle, alan yüklemesi, korona yüklemeyi kullanan elektrostatik kaplama işlemleri için baskın yükleme mekanizmasıdır.

Korona yükleme hem yalıtkan hem de iletken malzemelerle kullanılabilir ve bu da onu daha esnek bir yükleme işlemi haline getirir. Ek olarak, elektrostatik ve aerodinamik kuvvetlerin bir kombinasyonu da dahil olmak üzere korona yüklemeden kaynaklanan parçacık yörüngeleri, elektrik alanın varlığı nedeniyle daha iyi modellenebilir. Korona yükleme, tribo yüklemeden daha güçlü bir yükleme işlemi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, fazla serbest iyonların varlığı, yüklü parçacıkların taşıdığı iyonların sadece % 10'uyla [38, 42] daha yüksek bir geri iyonlaşma oranına yol açabilmektedir. Aynı zamanda, geri korona olarak da adlandırılan geri iyonizasyon, halihazırda biriktirilmiş parçacıklardan yüksek itici bir yük nedeniyle veya daha sonra Şekil 1.5'te gösterildiği gibi gelen parçacıkları nötrleştiren zıt kutupsal iyonların oluşması nedeniyle gelen yüklü parçacıkların birikmesinin önlendiği bir durumdur. Zıt yüklü iyonlar ayrıca, zemine yapışmış parçacıkları birikmiş toz yüzeyinden partiküllerin çıkmasına neden olan, yüzey kusurlarına yol açabilecek nötrleştirebilir veya zıt olarak yükleyebilir [45]. McLean, geri iyonlaşma oluşumu için üç gereksinimi şu şekilde özetlemektedir: (1) gözenekli bir tabaka, böylece gaz yüzünden bozulma meydana gelebilir, (2) tabaka boyunca yüksek bir elektrik alanı ve (3) gelen iyonların bir kaynağı [46]. Tüm bu gereksinimler korona yükleme sırasında saptanır ve bu işlem geri iyonlaşmaya karşı duyarlıdır.



Şekil 1.4. Korona yükleme ve elektrik alanı üretmek için bir elektroda yüksek voltaj uygulayan korona tabancasının şeması; parçacıklar, çarpık elektrik alan ve serbest iyon adsorpsiyonu nedeniyle alan şarjına (iç kısımda gösterilmiştir) maruz kalır [44]



Şekil 1.5. Zıt yüklü iyonların oluşmasından kaynaklanan geri iyonlaşma

Kaplama tozunun hem kendinden hem de yükleme sırasında elektriksel özellikleri, elektrostatik kaplama işleminin karakterizasyonu ve optimizasyonuna izin verir. Bir

tozun direnci genellikle kütle veya hacim direnci (Ω m) olarak rapor edilir ve bir direnç ölçer kullanılarak ölçülebilir. ASTM D-257 uyarınca, yalıtkan malzemelerinin hacim dirençliliği bir numuneye bir süre (genellikle 60 sn) bir voltaj (genellikle 100–500 V) uygulanarak ölçülür ve elde edilen akım ölçülür. Hacim direnci, Denklem (1.1)'de gösterildiği gibi Ohm Yasası uygulanarak kolayca hesaplanabilir. Yalıtkan malzemeler düşük akım değerleri (nA ila μA) göstereceği için, bu ölçümler için kullanılan elektrometreler nispeten yüksek bir voltaj uygulamak ve düşük amperi okumak için donatılmalıdır.

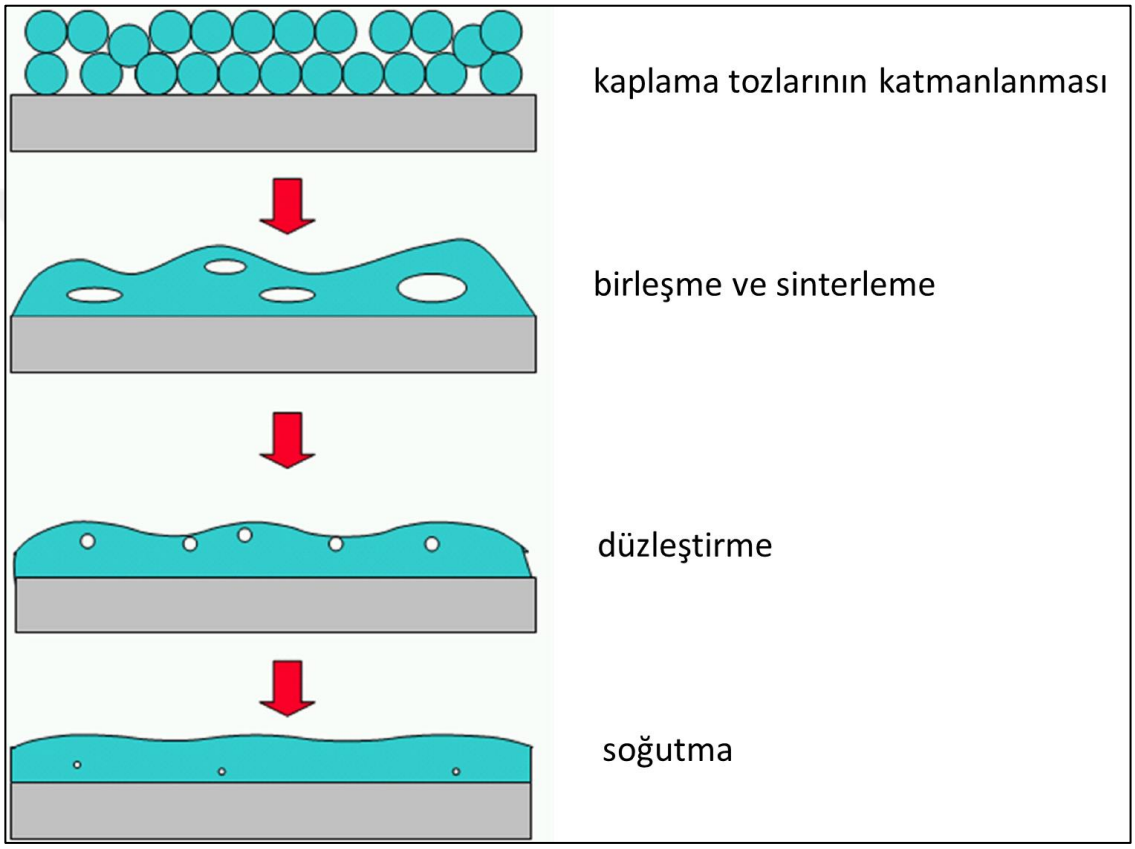
$$\rho_V = \frac{AV}{tI} \tag{1.1}$$

Yukarıdaki denklemde, A korumalı elektrotun etkili alanı, V uygulanan voltaj, t numune kalınlığı veya elektrot aralığı ve I ölçülen akımdır.

1.4.2. Film oluşumu

Geleneksel çözücü bazlı kaplama işlemlerinde, çözücü ve çözücünün buharlaştırılması, sırasıyla geçici bir plastikleştirici görevi görür ve film oluşumuna yardımcı olmak için kapiler kuvvetler sağlar. Çözücü yokluğunda, film oluşumu temel olarak, ayrı ayrı toz parçacıklarının birleşmesi ve Şekil 1.6'da gösterildiği gibi düzgün ve eşit film tabakası üretmek için birleştirilen parçacıkların dengelenmesi ile gerçekleştirilir. Biriken kuru toz, parçacık deformasyonunu ve çevresindeki parçacıklarla kaynaşmayı sağlamak için ısıya tabi tutulur. Giderek daha fazla parçacık birleştikçe, film tabakasında serbest hacimde genel bir azalmaya yol açan boşluklarda bir azalma meydana gelir; buna tesviye işlemi denir. Tesviye veya yayma işlemi, filmin son kalınlığının yanı sıra, film tabakasının yüzeyinin düzgünlüğünü de belirleyecektir. Isı uzaklaştırıldığında, birleştirilen ve tesviye edilmiş film tabakası nihai, kuru filmi üretmek için sertleşir. Isı uygulaması ve yukarıda açıklandığı gibi partiküllerin birleşmesi ile kürlenen polimerler, termoplastik polimerler olarak sınıflandırılır [11, 20]. Isıya ek olarak veya bunun yerine farklı modlarla kürlenen birçok polimer türü vardır. Örneğin, termoset polimerleri ağırlıklı olarak finisaj endüstrisinde kullanılır. Bu polimer partikülleri birleşir, ancak ilave olarak son filmi oluşturmak için kimyasal çapraz bağlanır. Bu termoset

polimerlerin birçoğu, daha kısa işlem sürelerine izin vererek, otomotiv ve elektronik ürünleri de dahil olmak üzere yüksek iş hacmine sahip endüstriler için arzu edilmelerini sağlar. Ek olarak, serbest radikal veya UV polimerizasyonu yoluyla film oluşturabilen polimerler vardır.



Şekil 1.6. Kuru toz kaplama parçacıklarının film oluşum mekanizması [20]

Termoplastik polimerler için, partikül deformasyonu, malzemenin katıdan sıvıya geçtiği polimerin erime noktasındaki veya üzerindeki bir sıcaklığın veya katının moleküler hareketliliğinin arttığı polimerin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde meydana gelir. Kaplama işlemleri için kullanılan polimerlerin çoğu, sentetik ya da yarı sentetiktir ve doğada yarı kristalli ya da amorf olması muhtemel olan nispeten büyük moleküler yapılardır [11]. Dolayısıyla, camsı geçiş sıcaklığı T_g, kürleme işlemi için koşullar belirlenirken sıklıkla göz önünde bulundurulur. T_g'nin üzerindeki sıcaklıklarda, polimerin viskozitesi, parçacık deformasyonuna izin verecek şekilde azalır. Yüksek moleküler ağırlıklı polimerler yüksek oranda viskoz olma eğilimindedir ve partikül deformasyonu ve

birleşmeyi kolaylaştırmak için T_g'den belirgin şekilde daha yüksek sıcaklıklar gerektirebilir. Alternatif olarak, düşük kürleme sıcaklıkları sağlamak ve T_g'yi azaltmak için bir plastikleştirici dahil edilebilir. Parçacık deformasyonu için yeterli viskoziteye ek olarak, parçacık birleşmesini ve seviyelemeyi kolaylaştırmak için yüzey enerjisinin arttırılması gerekir [47, 48]. Eriyik akışını arttırmak için plastikleştiricilerin kullanılması gibi, gerektiğinde yüzey gerilimini azaltmak için kaplama malzemesine katkı maddeleri eklenebilir.

1.4.3. Yapışma prensipleri

Finisaj endüstrisinin çoğu, metal yüzeylerin işlenmesi için elektrostatik toz boya kaplamayı içerir; bununla birlikte, bu, ahşap ve plastik gibi substratların yüzey işlemlerini içerecek şekilde genişlemiştir. Bu tartışmanın kapsamını ve uzunluğunu sınırlandırmak için, bu bölüm metal yüzeylere polimer yapışma mekanizmalarına odaklanacaktır. Yapışma, iki farklı yüzeyin bir arada tutulma eğilimini veya derecesini tanımlar. Bu tez için yapışma, kaplama tabakasının alt tabakaya kalıcı veya yarı kalıcı olarak yapışması, örneğin kürleme sonrası ile ilgilidir. Polimerden metale yapışma mekanizmaları arasında mekanik kilitleme, kimyasal bağ, sınır tabaka kuvvetleri ve elektrostatik etkileşimler bulunur [49]. Mekanik kilitleme, kaplamanın metal yüzey üzerindeki makroskopik gözeneklere girmesi nedeniyle meydana gelir. Sertleştikten sonra metal yüzeyi boyunca birbirine kenetlenen bu kaplama, kaplama tabakasının yapışma gücünü arttırır. Mekanik kenetlenmeyi kolaylaştırmak için çoğu metal, bu tür bir yapışma için gereken pürüzlü yüzeyi oluşturmak için aşındırıcı patlamaya maruz kalmalıdır.

Metallerin kimyasal ön işlemi, metal yüzeyine fonksiyonel grupları hafifçe işlemek ve çökeltmek için yapılır. Bu fonksiyonel gruplar daha sonra, yapışmayı güçlendirmek için kaplama malzemesi ile kimyasal bağlar oluşturmak için kullanılabilir. Bu kimyasal işlemler, çinko fosfat, krom, silan veya diğer kimyasal maddeler kullanılarak yapılabilir [50, 51]. Metal kaplamanın ilk yıllarından beri kimyasal ön işlemler kullanılmış olsa da, geliştirme çalışmaları çevre açısından uyumlu ve operatörler için daha az tehlikeli olan ön muameleleri belirlemeye devam etmektedir [51, 52]. Son iki yapışma mekanizması,

sınır tabakası ve elektrostatik etkileşimler, nispeten zayıftır ve genellikle mevcut olmasına rağmen, uzun süreli veya kalıcı yapışma için birincil mekanizmalar değildir.

Yapıştırıcı mukavemetinin ölçülmesi çok zor olabilir ve endüstride kullanılan çeşitli ölçüm yöntemleri vardır. Yapışkan mukavemetini değerlendirmek için önceki doğrudan ölçüm teknikleri, soyma testlerini ve şerit soyma testlerini içermekteydi. Soyma testi, kaplamanın yüzeyden soyulması için kuvveti kantitatif veya kalitatif olarak basitçe ölçmektedir. Bu test değişen açılardan ve hızlarda yapılabilir; bununla birlikte, film sağlam bir ölçüm yapmak için uygulanan kuvvetle sağlam kalacak kadar güçlü olmalıdır. Bu test yöntemi son zamanlarda bir gerilme test cihazı ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilmiştir [53]. Bazen "selobant" testi olarak da adlandırılan şerit soyma testi, kaplama katmanına uygulanan yapışkan bir bant kullanan soyma testinin bir çeşididir. Bu uygulanan bant daha sonra soyulur ve test yüzeyinin gözlemleri yapılır. Bu test, yapışkan bandın özellikleri ve kaplama katmanına tekrar üretilebilir şekilde yapışma kabiliyeti de dahil olmak üzere sonuçları etkileyebilecek çok sayıda faktöre sahiptir ve bu testi doğada daha kalitatif hale getirmektedir [54]. Yapışkan kuvvetini kantitatif olarak ölçmek için bir çekme testi geliştirildi, böylece kaplama katmanına bir test saplaması takıldı. Test saplaması daha sonra bir gerilme test cihazı kullanılarak çok kontrollü koşullar altında çıkarılır ve arızaya karşı kuvvet ölçülür.

Yapışkan mukavemetini ölçmek için, özellikle ince film kaplamalarda, birçok yüzey karakterizasyon tekniği geliştirilmiştir. Awaja ve ark. bu yöntemlerin birçoğunu polimer yapışması üzerine nispeten yakın tarihli bir derlemede özetlemiştir. Özetlenen yöntemler arasında uçuş süresi ikincil iyon kütle spektrometresi (ToF-SIMS), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), zayıflatılmış toplam yansıma kızılötesi spektroskopisi (ATR-IR) ve diğer mikroskopi teknikleri bulunur.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Elektrostatik toz kaplama tüm metal yüzeyleri boyama potansiyeli olduğundan dolayı kullanım alanı oldukça geniştir. Bu nedenle, elektrostatik toz boyama işleminde sistemin manuel yerine otomasyonla kontrol edilmesi enerji verimliliği açısından çok avantajlı olacağı öngörülmüştür. Otomasyon uygulamasından sonra ürünün kalitesine ek olarak, üretim hızı ve enerji tasarrufu da incelenmiştir. Elektrostatik toz boyama tesisindeki temel bileşenler ve revizyon sistemi ile elde edilen sonuçlar tez kapsamında irdelenmiştir.

2.1. Konveyör Sistemin Tanıtımı

2.1.1. Yüzey temizleme hattı (ön işleme)

Genel olarak, ön işlem sistemleri metal bir yüzeyi temizlemek ve işlemek için tasarlanmaktadır (Şekil 2.1). Yıkama işlemi yüzeyi temizler ve parçanın metaline bir profil çizer. Boya, profile yapışır. Ön işlem birkaç aşamadan meydana gelir ve her aşamada bir işlev gerçekleştirilir. Yazılı prosedürler ve teknik özellikler toz boya ve kimyasal madde temizleyicileri tarafından belirlenir. Bu, kullanıcılara çeşitli aşamalarda uygun parça ön işleme hakkında önemli bilgiler verir.

En yüksek kalitede toz kaplama, yalnızca ön işlem (temizleme, fosfatlama ve dönüşüm kaplaması) doğru şekilde yapıldığında ve genel ön işlem sisteminin potansiyeline uygun tutulması durumunda mükemmel sonuçlar verecektir. Toz boyada, temizlik, yıkama, fosfatlama ve durulama işleminin ön işlem esasları, sıvı kaplama sistemlerindeki önemlerinden biraz daha kritiktir.

Tozdan elde edilen faydayı en üst düzeye çıkarmak için, ön işlem sisteminin toz kabinine kuru halde temiz bir dönüşüm kaplı ürün sağlaması gerekir. Kuruluk, sıvı kaplamalardan çok toz için daha kritik olan bir özelliktir. Çözücü ve su bazlı kaplamalar, toz kaplamalara göre daha yüksek derecede yüzey nemini tolere edebilir. Toz

kaplamalar ıslak alanları kaplar, ancak pişirme işleminde yüzey açıkta kalacak şekilde yer değiştirir. Aynı durum ya da daha kötüsü, yağlarla kirlenmiş yüzeyler için de geçerlidir.

Yüzey hazırlığı, toz kaplamayı gerçekleştirmek için bir yüzeyi şartlandırmak veya iyileştirmekten daha fazlasını içerir. Dikkate alınacak diğer koşullar şunlardır:

- yüzey üzerindeki kirler;
- banyo ve durulama için su kalitesi;
- tutarlı veya değişken alt tabakalar;
- metal karışımı (demir, demir dışı, sarı metaller);
- metal tipi (dökme, çekilmiş levha, rulo, levha veya kombinasyonlar);
- işleme, kaynak, kesme, vb. yukarı akış işlemleri;
- ürünün ebat, ağırlık ve konfigürasyonları;
- sistem kontrolü, bakım ve kayıt tutma; ve
- bertaraf seçenekleriyle birlikte, üretilen atık türü ve miktarı.

Yüksek kaliteli, toz boya kaplı ürünlerin üretilmesinde rol oynayan tüm kilit unsurlar göz önüne alındığında, temizleme, toz boya kaplama sonuçlarını en üst düzeye çıkarmak için en önemli olanıdır. Temizleme derecesi veya yüzey modifikasyonu, geniş yorumlara açıktır ve birçok farklı kaliteye yol açar. Bazı uygulamalar için, özellikle nihai ürün, orta ila kısa süreli aralıklara sahip yapışma özellikleri gerektiriyorsa, tek başına aşındırıcı temizleme uygundur.

Önde gelen toz boya ve ön işlem üreticileri, yüksek kalitede, beş aşamalı bir temizleme, fosfatlama ve son durulama sisteminin, en geniş yüzey ve kaplama kimyasalları yelpazesi için en uygun ve tercih edilen ön işlem yöntemi olduğu konusunda hemfikirdirler. Üreticilerin ön işleme ve toz boya satıcıları ile yakın çalışmaları önemlidir.



Şekil 2.1. Püskürtme tipi yüzey temizleme hattı

Elektrostatik toz kaplama ile boyanacak metal yüzeylerin yağsız, passız ve temiz olması gerekmektedir. Boya öncesi yüzey temizleme hattında hem metal üzerindeki yağ, kir vs. temizlenmekte, hem de yüzey ince bir fosfat filmi ile kaplanarak yüzeyin korozyon direnci artırılmaktadır. Yağ alma ve fosfatlama işleminin aynı banyoda yapıldığı bu proseste, banyoların birbirine karışarak kimyasal yapılarının bozulması gibi sakıncalar olmadığı gibi (ilk 2 banyo aynı içerikte) kullanımı kolay ve iyi sonuç veren bir prosestir. Aynı kimyasal içerikte 2 banyo olması; ikinci banyonun daha temiz kalması, böylece banyo ömürlerinin daha uzun, su ve kimyasal madde tüketiminin daha az olmasını sağlamaktadır.

2.1.1.1. Yağ alma ve fosfatlama

Bu aşamada metal üzerindeki yağ ve kir gibi istenmeyen kısımlar temizlenmekte, aynı zamanda yüzeye ortalama 2-4 μm kalınlığında fosfat filmi kaplanmaktadır. Yüzeye kaplanan fosfat filmi hem yüzeyin korozyon direncini artırmakta, hem de boya ile metal arasındaki farklı yüzey gerilimlerinden dolayı oluşacak yırtılmaları önlemektedir. Ayrıca boyanın çizilmesi durumunda pasın boya filminin altında ilerlemesini durdurmaktadır. Banyo sıcaklığının 50-55 ^{o}C, kimyasal konsantrasyonun % 2-3 olması yeterli olmakla birlikte metal üzerindeki yağın cinsi, miktarı, sac kalitesi ve kullanılan kimyasal maddenin özelliğine göre farklılıklar gösterir.

2.1.1.2. Durulama

Yağ alma ve fosfatlama işlemi sırasında metal üzerinde çözünmüş yağlar, köpük vs. tortular kalmaktadır. Bu kalıntıların giderilmesi için durulama işlemi yapılmaktadır. Aynı zamanda durulama işlemi; öncesindeki ve sonrasındaki banyo kimyasallarının birbirine karışmasını önlemektedir.

2.1.2. Kurutma fırını

Bir toz boyama hattında çeşitli amaçlar için ısıtma işlemleri gereklidir. Genellikle belirli bir işlemin ihtiyacına göre seçilen çeşitli formlardaki fırınlarla gerçekleştirilir. Fırınlar aşağıdaki amaçlar doğrultusunda gözenekli dökümler gibi parçaları ısıtırlar:

- hapsolan gazdan arındırmak;
- bir temizleme işleminde biriken malzemeyi parça desteklerinden yakma adımı;
- akışkan yatak işleminde olduğu gibi tozları almaya hazırlamak için önceden temizlenmiş parçaların sıcaklığını yükseltmek ve
- uygulanan malzemenin daha fazla akışını sağlamak için kaplanmış ve soğutulmuş parçaları yeniden ısıtmak.

Isıtma işlemi, toz boya istasyonuna taşınırsa sorun yaratabilecek önceki işlemlerden kalan suyu ortadan kaldırır. En önemlisi, ısıtma işlemi oda sıcaklığında elektrostatik püskürtme işlemleriyle uygulanan toz halindeki malzemelerin eritilmesi, akışkan hale gelmesi ve kürlenmesi için kullanılır.

Toz kaplama işlemleri genellikle bir üretim ortamında yüksek hızlarda gerçekleştirildiğinden, ısıtma işlevleri en verimli ve uygun maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Belirli bir uygulamanın gereklilikleri, mevcut fırınların yetenekleri ve tasarım ilkeleri ile ayrıntılı bir şekilde çalışılmalı ve eşleştirilmelidir. Bir toz bitirme hattının ısıtma bileşenlerinin tüm yönlerini iyice araştırmak, yüksek kaliteli bir ürün üretecek verimli, etkili ve tatmin edici bir işlem elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Otomasyona geçilmeden önceki uygulamalarda temizlenmiş malzemelerin ıslak yüzeylerini kurutmak için açık havada bekletilmekteydi. Bu nedenle kurutma işlemi daha uzun bir zaman almaktaydı. Mevcut durumda ise yani elektrostatik toz boyama uygulamasından önceki temizlenme işleminde ürünlerin ıslak yüzeyini kurutmak için kurutma işlemi, kurutma fırında 80-150 ° C'de 3 dakika geçirilerek tamamlamaktadır (Şekil 2.2). Tablo 2.1 kurutma fırının sıcaklık değerlerini göstermektedir. Sıcaklık değerleri manuel sisteme göre daha kontrollü ve homojen olacak şekilde ayarlanabilmektedir. Böylece boyama kalitesi belirgin şekilde iyileştirilebilmektedir.



Şekil 2.2. Kurutma fırını (temizlenmiş malzemelerin kurutma işlemi)

Tablo 2.1. Kurutma Fırını Sıcaklık Ayar Tablosu

Ayarlar	
Kurutma Fırını Set Sıcaklığı	120,0 ^{o}C
Kurutma Fırını Emniyet Sıcaklığı	140,0 ^{o}C
Kurutma Fırını Baca Gazı Emniyet Sıcaklığı	300,0 ^{o}C
Kurutma Fırını Histerisis Değeri	2,0 ^{o}C
Kurutma Fırını Egzoz Fanı Çalışma Süresi	45 s
Kurutma Fırını Egzoz Fanı Durma Süresi	90 s
Kurutma Fırını Soğutma Süresi	15 dak.
Kurutma Fırını Sıcaklık Düşüyor Alarm Değeri	15,0 ^{o}C

*Kurutma fırını çalışma değerleri görülmektedir.

2.1.3. Elektrostatik toz boyama uygulaması

Elektrostatik toz boyama işlemi sırasında parçanın yapısına göre boyanın yaklaşık %70'i parça üzerine yapışır. Parça üzerine yapışmayan boyanın yeniden kullanılabilmesi ve çevreye saçılmaması için "Tozboya Uygulama Kabini" gerekmektedir. Tozboya uygulama kabininin boyutları, emiş fanının kapasitesi ve basıncı, siklon çapı ve boyutları, filtre sayısı ve uygun filtrenin kullanılması, patlaç valflerin vs. seçimi son derece önemlidir. Şekil 2.3 otomasyonlu sistemde kullanılan elektrostatik toz kaplama kabinini göstermektedir.

Boyama işlemi sırasında kabinin içinde uygun hava hızı oluşması; siklon ve filtrelerin direncinin yenilmesi için uygun özellikte fan seçilmeli, kullanılacak tozboya tabancalarının sayısına göre yeterli sayıda filtre kullanılmalı, taze boya ile kullanılmış boyanın karışabilmesi için yeterli büyüklükte geri kazanma deposu kullanılmalıdır.

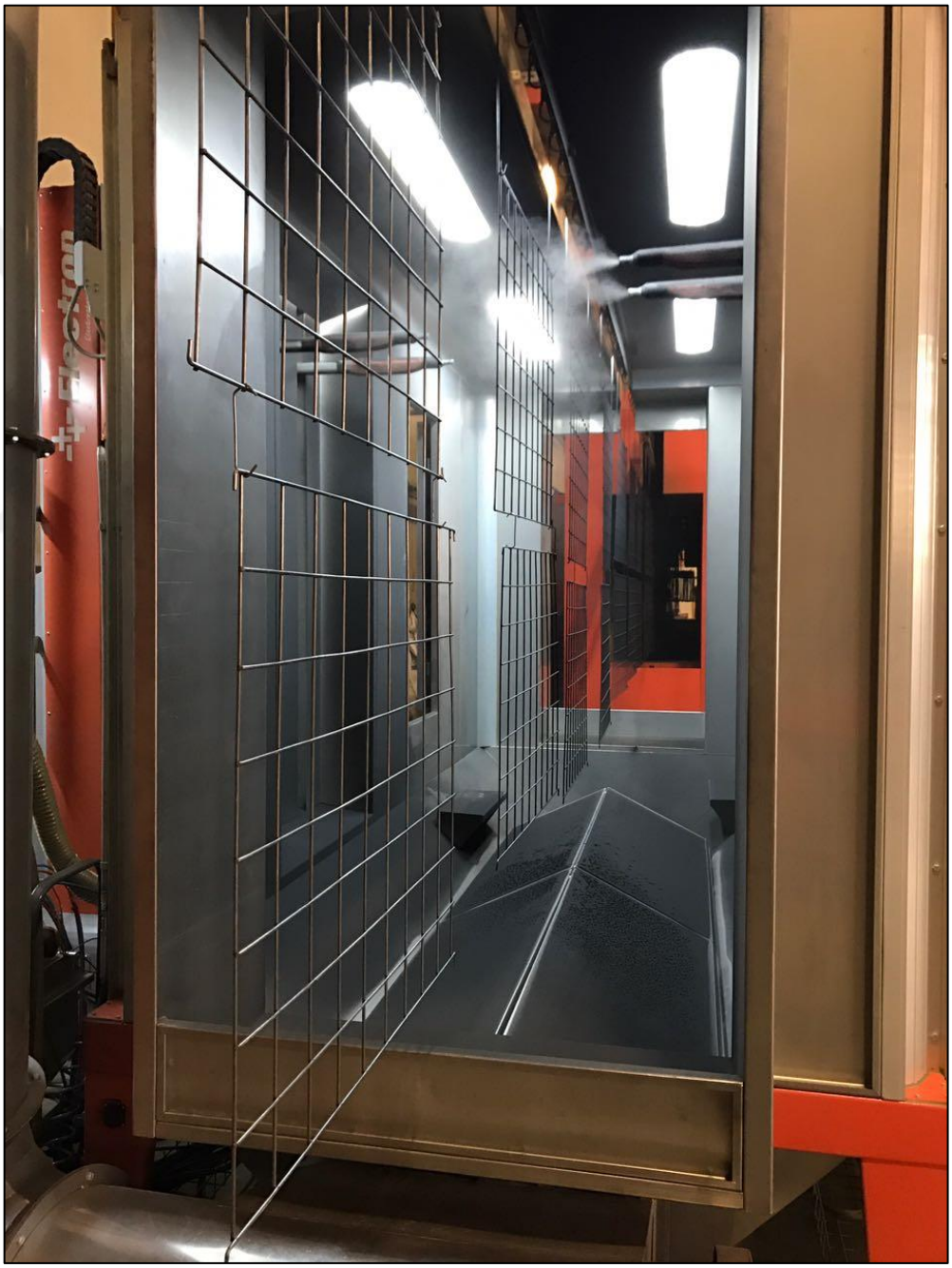
Siklonlu tip toz boya uygulama kabinlerinde parçaya yapışmayan yaklaşık %30 oranındaki tozboyanın yaklaşık yarısı titreşimli siklon altı depoda, yarısı da kabin zemininde birikmektedir. Kabin zemininde biriken boya otomatik olarak pnömatik sistemle süpürülerek siklona yönlendirilmektedir. Süpürülmüş Boya Deposu ve Siklon altı Depoda biriken toz boyalar otomatik Boya Merkezi ile sisteme geri aktarılmaktadır. Böylece filtre grubuna %3-4 oranında ve çok küçük boya parçacıkları gitmekte, filtre yükü azalmakta ve ömrü uzamaktadır. Renk değişimleri sırasında filtreler değiştirilmemekte, filtre maliyetleri düşmektedir. Renk değişimlerinde sadece kabin gövdesi, siklon grubu ve geri kazanma sisteminin temizlenmesi yeterlidir. Boyama cihazlarının temizliği için ise boya merkezinde bulunan pnömatik temizleme sistemi cihazların hortumlarını ve cihazların temizliğini yapmaktadır. Bu özellik ile boya değişim süresi ciddi boyutta azalmış olmaktadır.

Ayrıca boya merkezi boya besleme ve boya geri dönüşümü için de etkili bir cihazdır. Buna bağlı olarak çalışan multicolor cihazı ile sisteme yeni boya girişi de sağlanmaktadır.

Tozboya kabininde filtrelerin temiz ve gözeneklerinin açık olması boyama verimini etkilemektedir. Filtrelerin temizlenmesi kumanda panosunda bulunan elektronik kart ile otomatik olarak yapılmaktadır. Elektronik kart üzerinde patlaç valflerin açılma sıklığı ve süresi ile siklon altı deponun çalışma ve durma süreleri ayarlanabilmektedir. Ayarlanan sıklıkta patlaç valfler sırayla açılarak filtrelerin içine basınçlı hava basarak filtreler üzerine sıvanmış olan tozboyayı atık deposuna dökmektedir. Filtrelerin temizlenmesinden sonra vibrasyon motorları otomatik olarak çalışmakta, siklon altı depoda biriken boyayı eleyerek geri kazanma deposuna aktarmaktadır. Bu işlem ayarlandığı şekilde otomatik olarak devam etmektedir.

Elektronik kartın fabrika ayarları kabinin teknik özelliklerine ve tozboya tabancası sayısına göre öngörülerek ayarlanmış olmakla birlikte, kullanıcı değişen kullanım koşullarına göre uygun ayarları kendisi yapabilmektedir.

Boyama işlemi sırasında parça üzerine yapışmayan tozboya emiş fanının etkisiyle filtreler üzerine sıvanarak dış ortama atılması engellenir. Filtrelerin ters yıkama havası (patlaç valfler) ile temizlenmesi sırasında boya filtre grubunun altındaki depoya dökülür. Filtreleri temizlemek için filtrelerin içine basınçlı hava sevk edilir.



Şekil 2.3. Elektrostatik toz boyama uygulama kabini

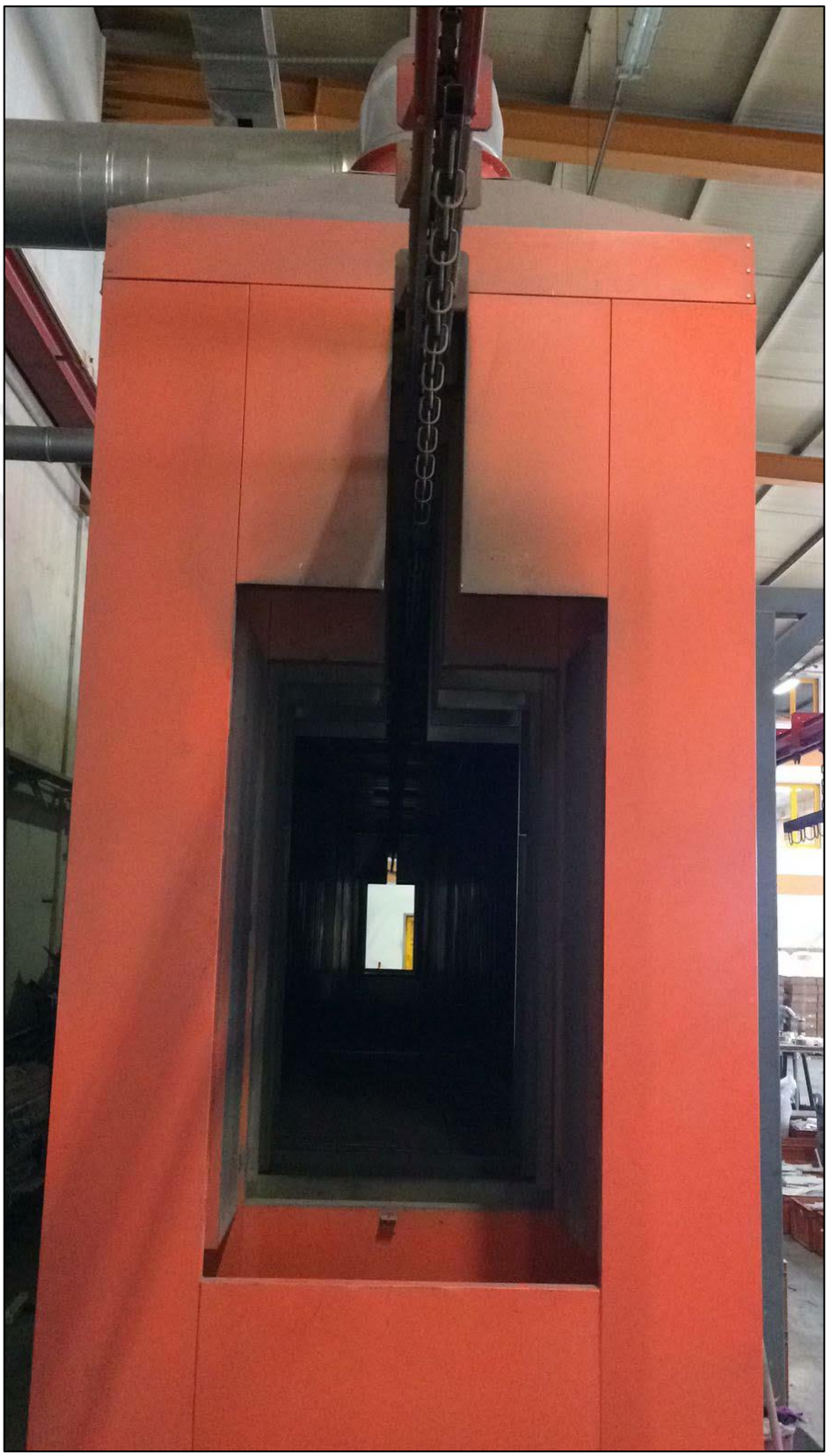
2.1.4. Kürleme süreci

Elektrostatik toz boya ile kaplanmış malzemenin toz boyanın kürlenme özelliklerine uygun sıcaklık ve süre ile fırınlanması gerekmektedir. Toz boya üreticisi firmalar özel uygulamalar için farklı kürlenme özelliklerine sahip boyalar üretmekle birlikte, genellikle piyasada 180 ^{o}C veya 200 ^{o}C'de kürlenen toz boyalar kullanılmaktadır. Tozboyanın kürlenme süresi de metal sıcaklığı 180 veya 200 ^{o}C'ye ulaştıktan sonra 10 dakikadır. Şekil 2.4 kürleme için kullanılan fırını göstermektedir.

Kalınlığı 1 mm ve altında DKP sac ve alüminyum profil gibi malzemelerde parçanın kürlenme sıcaklığına ulaşması ve kürlenmesi (toplam fırınlama süresi) 18 dakika civarındadır. Metal kalınlığına ve cinsine göre gerekli olan artı süreler toplam fırınlama süresine eklenir.

Tozboya kürleme fırınında homojen ısı dağılımı ve hava dolaşımı son derece önemlidir. Fırının girişinden itibaren sıcaklık istikrarlı bir şekilde yükselmeli, fırınlama sıcaklığına ulaştıktan sonra da düzgün bir seyir izlemeli, sıcaklık sapmaları minimum düzeyde olmalıdır. Tablo 2.2 kürleme fırının sıcaklık değerlerini göstermektedir. Sıcaklık değerleri manuel sisteme göre daha kontrollü ve homojen olacak şekilde ayarlanabilmektedir. Böylece boyama kalitesi belirgin şekilde iyileştirilebilmektedir.

Tozboya pişirme fırını, her cinsteki elektrostatik tozboyanın uygun şekilde fırınlanabileceği şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Isıtma ünitesi ve sirkülasyon fanları, fırın ilk devreye alındığında en fazla 60 dakikada 200 ^{o}C 'ye ulaştıracak kapasitede üretilmiştir. Isıtma ünitesinin eşenjörü, sirkülasyon fanları, hava perdesi fanları vs. donanımlar her bir fırın için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş, sıcaklık sapmalarını en aza indirmek için çift kademeli brülör kullanılmış, fırının yüksek verimle ve ekonomik çalışması amaçlanmıştır.



Şekil 2.4. Kürleme (Pişirme) Fırını

Tablo 2.2. Kürleme (pişirme) fırını sıcaklık ayar tablosu

Ayarlar	
Pişirme Fırını Set Sıcaklığı	210,0 ^{o}C
Pişirme Fırını Emniyet Sıcaklığı	230,0 ^{o}C
Pişirme Fırını Baca Gazı Emniyet Sıcaklığı	360,0 ^{o}C
Pişirme Fırını Histerisis Değeri	2,0 ^{o}C
Pişirme Fırını Brülör Çift Set Değeri	5,0 ^{o}C
Pişirme Fırını Egzoz Fanı 1 Çalışma Süresi	20 s
Pişirme Fırını Egzoz Fanı 2 Durma Süresi	60 s
Pişirme Fırını Egzoz Fanı 2 Çalışma Süresi	20 s
Pişirme Fırını Egzoz Fanı 2 Durma Süresi	60 s
Pişirme Fırını Soğutma Süresi	15 dak.
Pişirme Fırını Sıcaklık Düşüyor Alarm Değeri	15,0 ^{o}C

*Kürleme (pişirme) fırını çalışma değerleri görülmektedir.

2.2. Üretim Hızı ve Enerji Tüketimi

Yukarıdaki bölümde otomasyonlu sistemdeki bileşenler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Eski manuel sistemde kullanılan bileşenler her ne kadar yeni sistemle aynı olsa da prosesler arasındaki geçişler insan gücü kullanılarak yapıldığı için zaman kaybına, düşük verime ve daha kalitesiz üretime neden olmaktaydı. Otomasyonlu sistemle tüm bu olumsuzluklar giderilmiş oldu.

Manuel sistemde boyanacak parçalar insan gücüyle fırınlara ve işlem kabinlerine konulmaktadır. Parçaların her bir prosesteki bulunma süresi farklılık göstermektedir. Bu nedenle tesisin tam kapasiteyle çalıştığı varsayılarak ancak karşılaştırılmalar yapılabilir.

Bu sistemle dakikada boyanacak İş Parçası Hızı (İPH) Denklem (2.1) kullanılarak hesaplanır:

$$\text{İPH}=\frac{\text{LA}\times 2}{\text{t}} \tag{2.1}$$

Burada, İPH = İş Parçası Hızı (m^2/dak), LA = parçanın alanı (m^2, iki tarafı kaplanacağı için 2 ile çarpılır), t = süre (dak).

Otomasyonlu sistemde İş Parçası Hızı (İPH) Denklem (2.2) kullanılarak hesaplanır:

$$\text{İPH}=\frac{\text{TS}\times\text{N}\times\text{LA}\times 2}{\text{t}} \tag{2.2}$$

Burada, İPH = İş Parçası Hızı (m^2/dak), TS = Tur Sayısı, N = 1 Turdaki Parça Sayısı, LA = parçanın alanı (m^2, iki tarafı kaplanacağı için 2 ile çarpılır), t = süre (dak).

Her iki sistem için dakikadaki İPH değerleri yukarıdaki denklemlere göre belirlendikten sonra günlük ve daha uzun süreli toplam üretimler hesaplanabilmektedir. Tüketilen enerji miktarlarının tutarlı şekilde belirlenebilmesi için tesisteki enerji denetimi 12 hafta boyunca ve haftada 5 gün olacak şekilde kayıt altına alınmıştır. Bu şekilde günlük ortalama doğal gaz ve elektrik tüketimi belirlenmiştir. Her iki sistem içinde birim alan başına tüketilen doğal gaz, elektrik ve toplam enerji miktarları aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

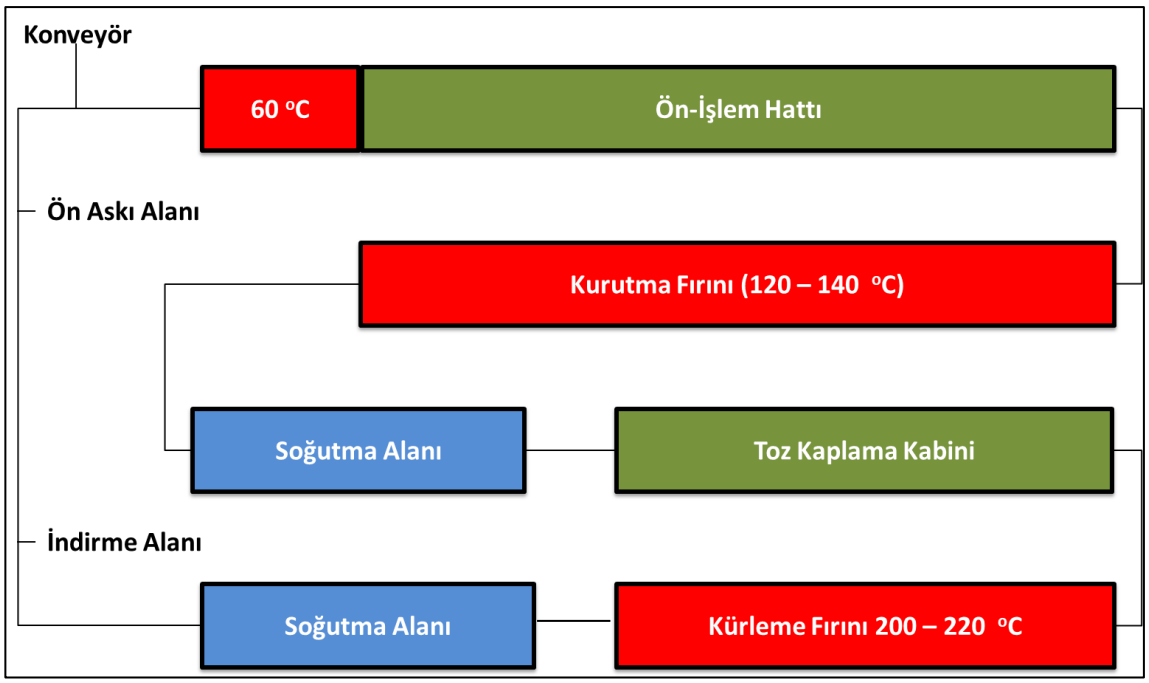
$$\text{ET}=\frac{\text{GET}}{450\times\text{İPH}} \tag{2.3}$$

Burada, ET = Enerji Tüketimi (kWh/m^2) GET = Günlük Enerji Tüketimi (kWh), İPH = İş Parçası Hızı (m^2/dak), 1 günlük çalışma süresi 450 dakika alınır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında incelenen toz kaplama tesisi şu kısımları içermektedir: ön-işlem (temizleme), kurutma fırını, toz boyama kabini ve kürleme fırını. Şekil 3.1'de tez çalışmasının gerçekleştirildiği toz kaplama tesisinin ana bileşenleri gösterilmektedir. Şekilde kırmızı bölgeler ısıtma gerektiren alanları, mavi bölgeler soğutma gerektiren alanları temsil eder ve yeşil alanlar sıcaklık açısından nötr olan alanlardır. Toz boya endüstrisinin oldukça homojen olduğu ve proseslerin farklı şirketler için benzer olduğu görülür.

Ön-işlem ünitesinde toz kaplanacak parçalar yağ alma basamağında yaklaşık 60 °C suyla yıkanır. Ön arıtma ayrıca bir dizi durulama basamağı içerir. Bundan sonra, parçalar yaklaşık 120–140 °C sıcaklığa sahip bir kurutma fırınından geçer.



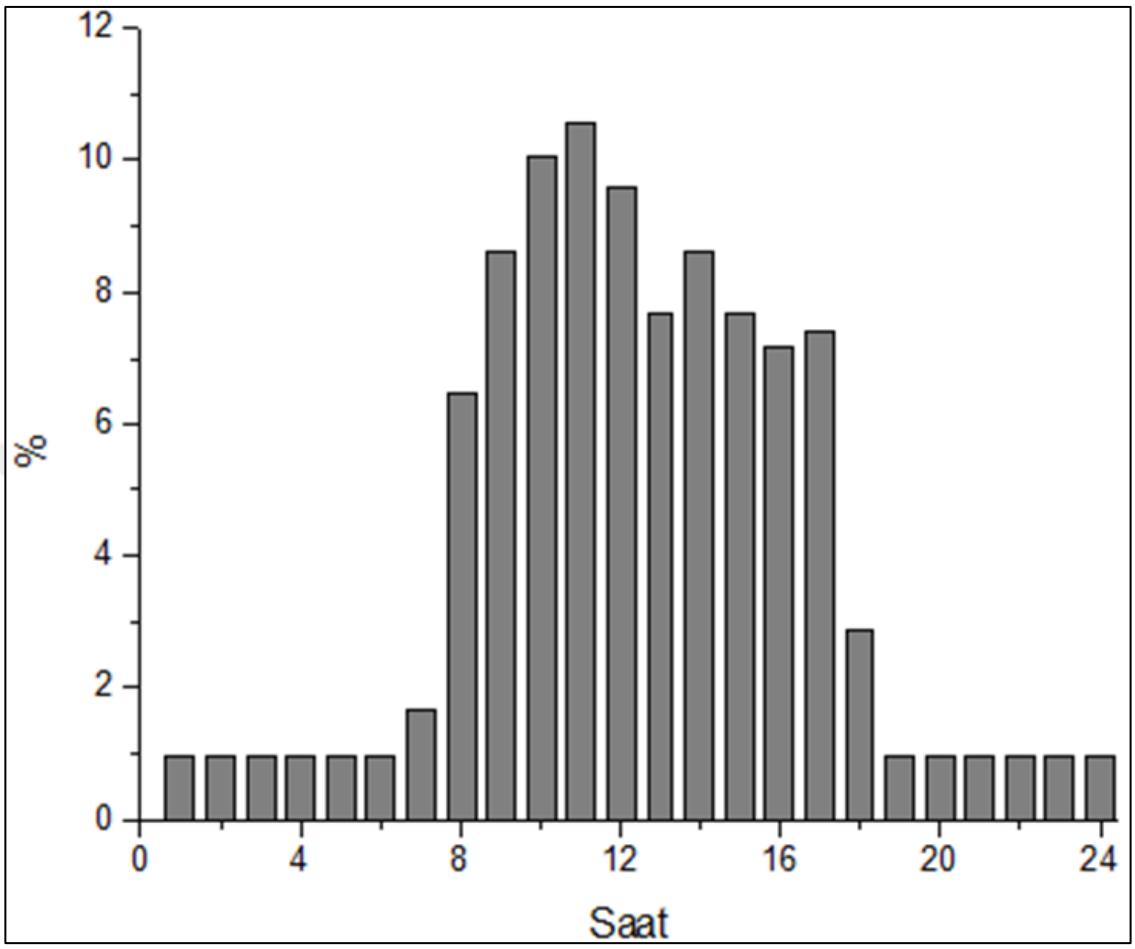
Şekil 3.1 Toz boya tesisine genel bakış

Kurutma fırını sonrasında parçalar toz kaplama kabinine iletilir. Bu kısımsa kullanılan yüzeyin özelliklerine ve kaplanacak tabakanın kalınlığına göre elektrostatik toz boyama işlemi uygulanır. Daha son sonrasında parçalar, yaklaşık 200 °C sıcaklığa sahip bir kürleme fırınından geçer. Kürleme fırınından sonra daha hızlı soğumalar için parçaların üzerine soğuk hava üflendiği bir soğutma bölgesine kullanılmaktadır.

Bu bölümde, enerji denetimi sonuçları ve otomasyonlu sistemin enerji verimliliğine katkısı analiz edilecektir. Toz kaplama işlemindeki süreçler, üretim süreçleri ve destek süreçleri olmak üzere ikiye ayrılır. Tesiste üretim ile ilgili tüm işlemler üretim sürecidir. Bu işlemler ön işlem, kurutma fırını, soğutma bölgesi, toz kaplama kabini ve kürleme fırınlarıdır. Üretim süreçleri toplam enerji tüketiminin % 88'ine karşılık gelmektedir. Destek işlemleri, aydınlatma, bilgisayar, forklift şarjı, nem alma ve kompresör gibi üretim işlemlerine dahil olmayan her şeyi içerir. Destek süreçleri, toplam enerji miktarının % 12'sine karşılık gelmektedir.

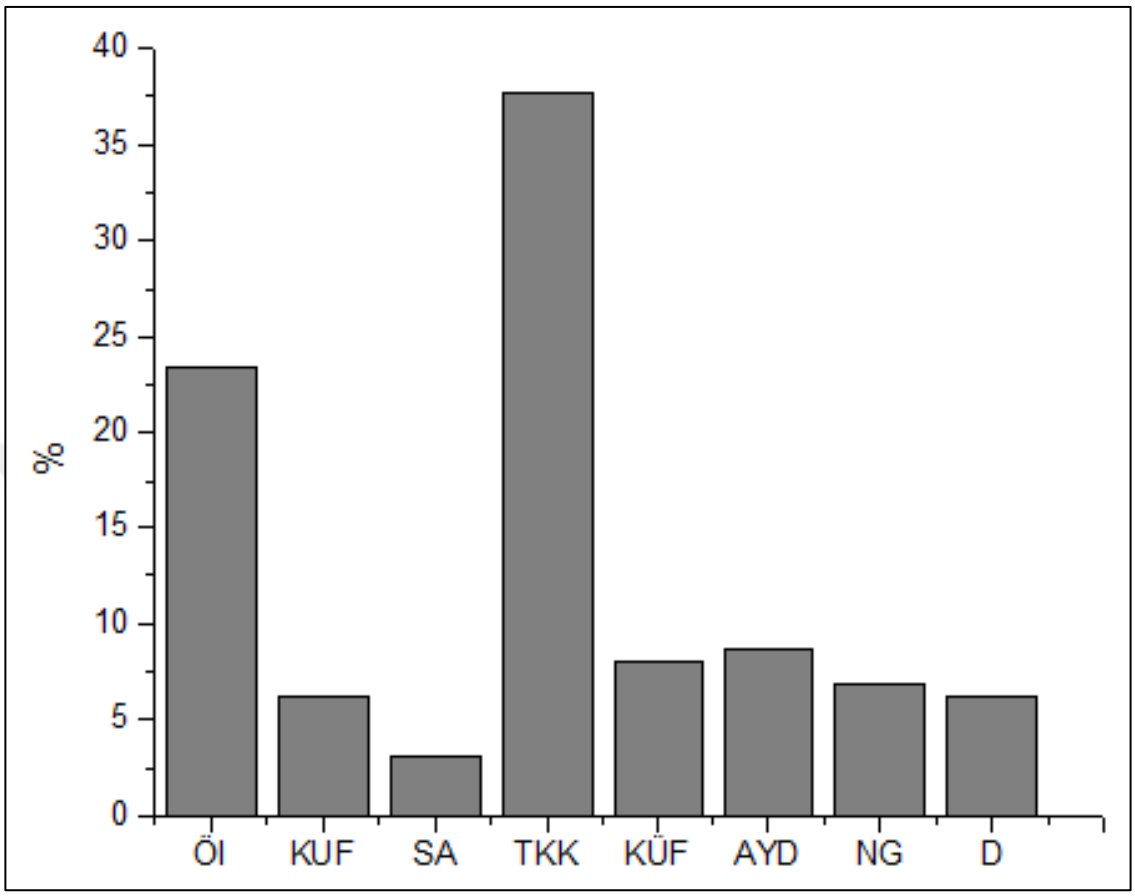
Enerji denetimi, sürecin farklı birimleri için anlık ölçümlere 12 hafta ve haftada 5 gün boyunca gerçekleştirilen kayıtlara dayanmaktadır. Kayıtlardan elde edilen değerler, işlemin farklı kısımlarının her gün kaç saat kullanıldığını değerlendirmek ve elektrik kullanımı için ortalama bir değer elde etmek için kullanılmıştır. Hesaplanan elektrik enerjisi kullanımı, elektrik faturalarıyla karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma, kaydedilmiş ve anlık ölçümlerin bir yıl kullanımının tahmin edilmesini mümkün kılmıştır. Bölgesel ısıtma ve doğal gaz kullanımı, faturalarda belirtilen tüketim için aylık değerlere dayanmaktadır. Üç enerji kaynağının tamamı için bir yıllık faturalar karşılaştırılmıştır.

Ortalama bir üretim günü 24 saat boyunca tüm tesiste ne kadar elektrik kullanıldığını yüzdesel olarak Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Üretim sabah sekiz civarında başlar ve genellikle öğleden sonra beş civarında sonlandırılır. Fazla mesai olmaması durumunda elektrik kullanımı günden güne aynıdır. Elektrik tüketimi saat 10-12 arasında en yüksek seviyeye ulaşır. Bunun nedeni sistemin tüm bileşenlerinin bu saat diliminde tam kapasite çalışıyor olmasındandır.



Şekil 3.2. Bir üretim günü boyunca saat başına ortalama elektrik kullanımı

Şekil 3.3, elektriksel güç yükünün tesis içindeki farklı işlemler arasında yüzdesel olarak nasıl dağıldığını göstermektedir. Bu grafik, tesis içindeki tüm işlemlerin çalıştığı andaki güç yükünü gösterir ve bu nedenle Şekil 4.2'deki saat 10-12 arasındaki süreç dikkate alınarak hazırlanmıştır. Toz kaplama kabininin, yüksek havalandırma ihtiyacı nedeniyle büyük bir elektrik tüketicisi olduğu görülebilir. Diğer bir büyük elektrik tüketicisi ön işleme sürecidir.



Şekil 3.3. Elektriksel güç yükünün tesis içindeki farklı işlemler arasında yüzdesel dağılımı (ÖİI= Ön İşlem, KUF=Kurutma Fırını, SA=Soğutma Alanı, TKK=Toz Kaplama Kabini, KÜF=Kürleme Fırını, AYD=Aydınlatma, NG=Nem Giderici, D=Diğer)

3.1. Konveyör Sistemin Avantajları

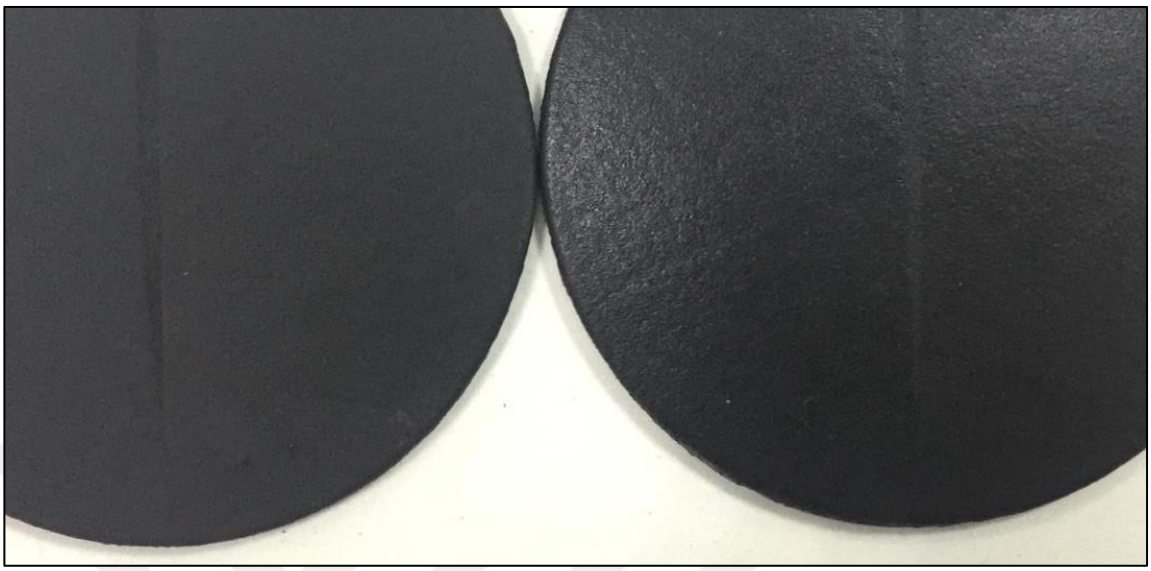
Geleneksel uygulamada elektrostatik toz boya, manuel tabanca ile birlikte püskürtme tekniği ile uygulanır. Bu uygulamada, malzeme yüzeyinin yaklaşık % 60-70'i toz boya ile yapıştırılır ve malzeme yüzeyine yapışmayan toz boya dökülür ve atık boyaya dönüşür. Kurulan sistemle birlikte elektrostatik toz boya, püskürtme tekniği kullanılarak otomatik tabancalarla çok yönlü bir şekilde uygulanır. Malzemenin yüzeyine yapışmayan toz boya dökülür, ancak siklonlu toz boya uygulama kabini kullanılarak toz boyalar geri dönüştürülür ve kullanılır. Böylece, filtre grubunda çok küçük boya parçacıkları % 3-4 oranında gönderilmektedir. Bu yöntem uygulandıktan sonra siklon kullanılarak verim % 95, diğer yöntemde ise toz parçacıklarının yere düşmesi nedeniyle

verim % 60-70 civarındadır. Otomasyon uygulamasıyla daha yüksek toz boya verimliliği nedeniyle siklon tipi toz boya uygulama kabini tercih edilmektedir.

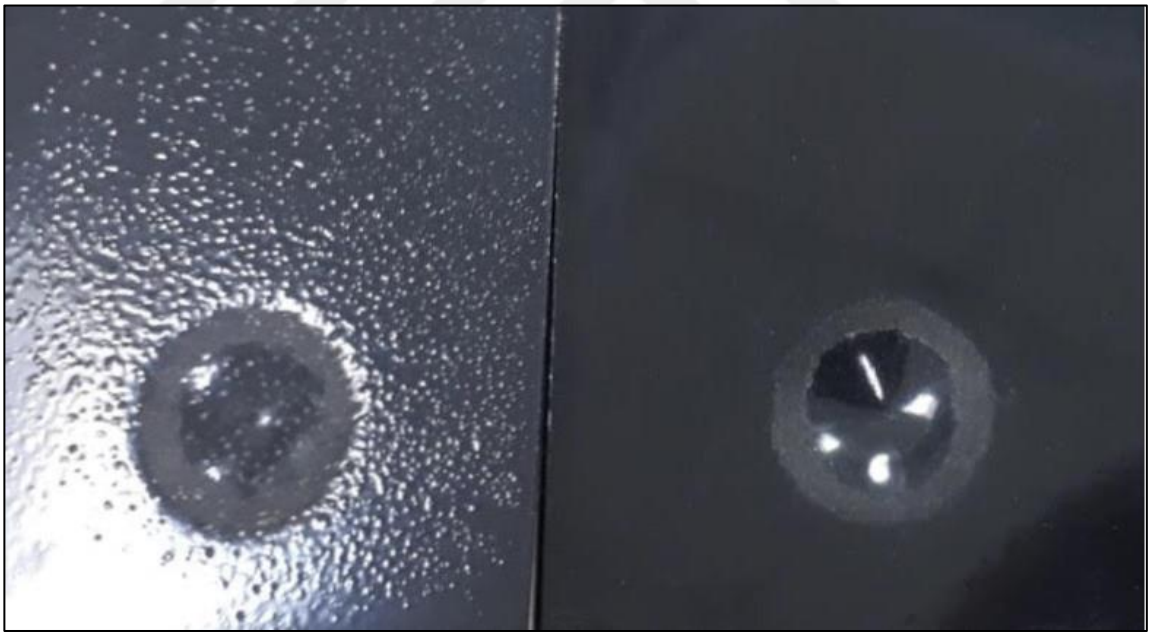
Manuel uygulama ile boyanmış olan malzemeler, kürleme fırınına el ile asarak fırında 160-210 °C'de 10 dakika pişirilir. Fakat asma esnasında ve pişen malzemeler fırından alınırken, fırının kapakları belirli bir süre açık kaldığından fırın sıcaklığında azalma meydana gelmektedir. Fırının istenilen sıcaklığa ulaşabilmesi için 10 dakika olan pişirme süresi ısı kaybından dolayı 15 dakikaya çıkmaktadır. Otomasyon uygulaması ise toz boyalı ürünler konveyör sistemiyle ilerleyerek kürlenir. Bu aşamada, ürünler, boya uygulama özelliklerinde verilen 10 dakika boyunca 160-210 °C'lik bir sıcaklığa maruz bırakılırlar. Elektrostatik toz boya, pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için erir ve ardından sertleşir. Bu sürenin sonunda, ürünler fırından çıkarılır ve boyama işlemi tamamlanır.

Manuel sistem ile otomasyonlu sistemde kaplanan malzemeler arasında kalite bakımın büyük farklar vardır. Örneğin manuel uygulamada malzemeler yeterince kürlenemediği parlaklık sorunları yaşanmaktadır (Şekil 3.4). Dolayısıyla istenilen özellikle malzemelerin elde edilmesi otomasyonlu sistemle mümkün olmakta ve bu durum enerji verimliliği sağlayacaktır.

Otomasyonlu sistemin parlaklıkla ilgili getirdiği avantajlarının yanı sıra başka avantajları da bulunmaktadır. Örneğin manuel sistemde daha kalın boya uygulanırken otomasyonlu sistemde daha ince filmler kaplanabilmektedir. Homojen kürleme manuel sistemle mümkün olmadığı için boyaların yüzeyden kalkması kolaylaşmaktadır. Ayrıca manuel sistem dış ortamla daha çok etkileşim içinde olduğu için yüzeyler üzerinde belirgin şekilde yağ, wax ve silikon kalıntıları birikmektedir (Şekil 3.5). Bu durum dolaylı olarak enerji verimliliğini düşürmektedir.



Şekil 3.4. Manuel (soldaki) ve otomasyonlu (sağdaki) sistemde kaplanan malzemelerin parlaklık durumları



Şekil 3.5. Manuel (soldaki) ve otomasyonlu (sağdaki) sistemde kaplanan malzemelerin yüzeylerinde biriken yabancı maddeler

3.2. Enerji Verimliliklerinin Karşılaştırılması

Daha yüksek işletme verimlerinden kaynaklanan ekonomik avantajlar, belirli bir işleme bağlı olarak çok ve çeşitlidir. En önemli avantaj malzeme kullanım etkinliğidir. Akışkan yatak işlemleri doğal olarak % 100 verimlidir, ancak bazı kayıplar sürtünme ve aşırı film gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Elektrostatik püskürtme işlemlerinin, tozun ilk kullanımında genellikle % 50-80 oranında etkili olduğu kabul edilir. Diğer bir deyişle, tozun % 20-50'si fazla miktarda püskürtülür ve toplanması halinde tatminkar şekilde tekrar kullanılabilir. Püskürtülen toz bir uygulama işlemi sırasında geri kazanılabildiğinden ve daha sonra tekrar kullanılabildiğinden, % 95-98 aralığında genel malzeme kullanımı elde edilebilir. Karşılaştırma yapıldığında, sıvı sprey kaplama sistemleri yalnızca % 20-90 oranında malzeme kullanım verimi elde eder. Elektrostatik kaplama ile % 98-99 verimlilik seviyesi mümkündür.

Toz, damlamayı, akmasını veya sarkmasını büyük ölçüde azalttığından, önemli ölçüde daha düşük bir reddetme oranı elde edilebilir. Kürlenmeden önce kötü şekilde püskürtülen parçalar tespit edilirse, basitçe bir hava tabancasıyla temizlenebilir ve daha sonra tekrar kaplanabilir. Toz kaplamalar kullanıldığında parlama zamanı gerektirmediğinden, bir son işlemci kaydedilen tesis alanını daha verimli ve ekonomik bir şekilde kullanabilir. Ayrıca normalde parlama döneminde meydana gelebilecek partikül ve toz kirlenme olasılığı daha düşüktür. Daha az kirlenme, daha az reddedilen toz boya kaplı ürünler ile sonuçlanır.

Toz kaplama, çoğu zaman sadece bir kat ile sıvı kaplamaya kıyasla eşit veya üstün film özellikleri elde edebilir, böylece üst kaplamanın uygulanmasından önce bir parçanın prime edilmesi gereğini ortadan kaldırır. Ek olarak, toz kaplama pişirme döngüsü sırasında tam bir kürlenme geliştirir ve fırını sıvı kaplamalardan daha iyi bırakması üzerine genellikle bozulmalara karşı direnç gösterir. Bu, taşıma, montaj ve paketleme işlemleri sırasında daha az hasara neden olur. Ayrıca rötuş ihtiyacını azaltır. Reddetme oranı da düşük. Her ikisi de tasarruflara katkıda bulunur.

Toz kaplama sistemlerinin kullanılmasının bir başka olumlu yönü, tozu depolamak için gereken boşluk miktarının, çoğu durumda, eşdeğer bir sıvı kaplama sistemi için gereken boşluktan önemli ölçüde daha az olmasıdır. Bu, mevcut tesis alanının daha verimli ve verimli kullanılmasına izin verir.

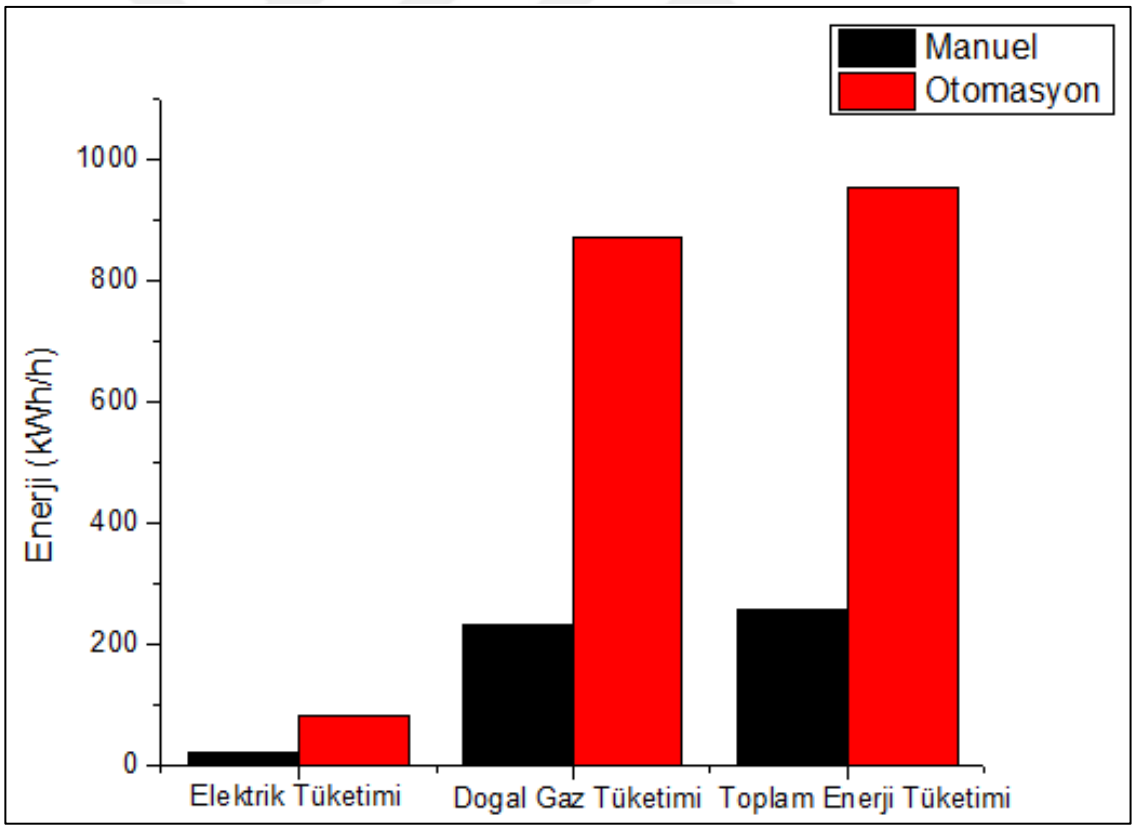
Tablo 3.1, tesiste daha önce uygulanan manuel sistemle yeni devreye sokulan otomasyonlu sistemin enerji tüketimi ve üretim potansiyeli gibi özelliklerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.

Tablo 3.1. Manuel ve otomasyonlu sistemlerin karşılaştırılması

	Manuel Sistem	**Otomasyonlu Sistem**
İş Parçası Hızı	0,167 m^2/dak	1,66 m^2/dak
Toplam Günlük İş Değeri	75 m^2/gün	750 m^2/gün
Elektrik Tüketimi	22,5 kWh/h	81 kWh/h
Doğal Gaz Tüketimi	232 kWh/h	872 kWh/h
Toplam Enerji Tüketimi	254,5 kWh/h	953 kWh/h
m^2 Başına Elektrik Tüketimi	0,3 kWh/m^2	0,108 kWh/m^2
m^2 Başına Doğal Gaz Tüketimi	3,093 kWh/m^2	1,162 kWh/m^2
m^2 Başına Toplam Enerji Tüketimi	3,393 kWh	1,27 kWh
Yıllık Enerji Tasarrufu	-	11.920.896 kWh
m^2 Başına Boya Tüketimi	0,178 kg/m^2	0,125 kg/m^2

*Manuel ve otomasyonlu sistemin karşılaştırılması görülmektedir.

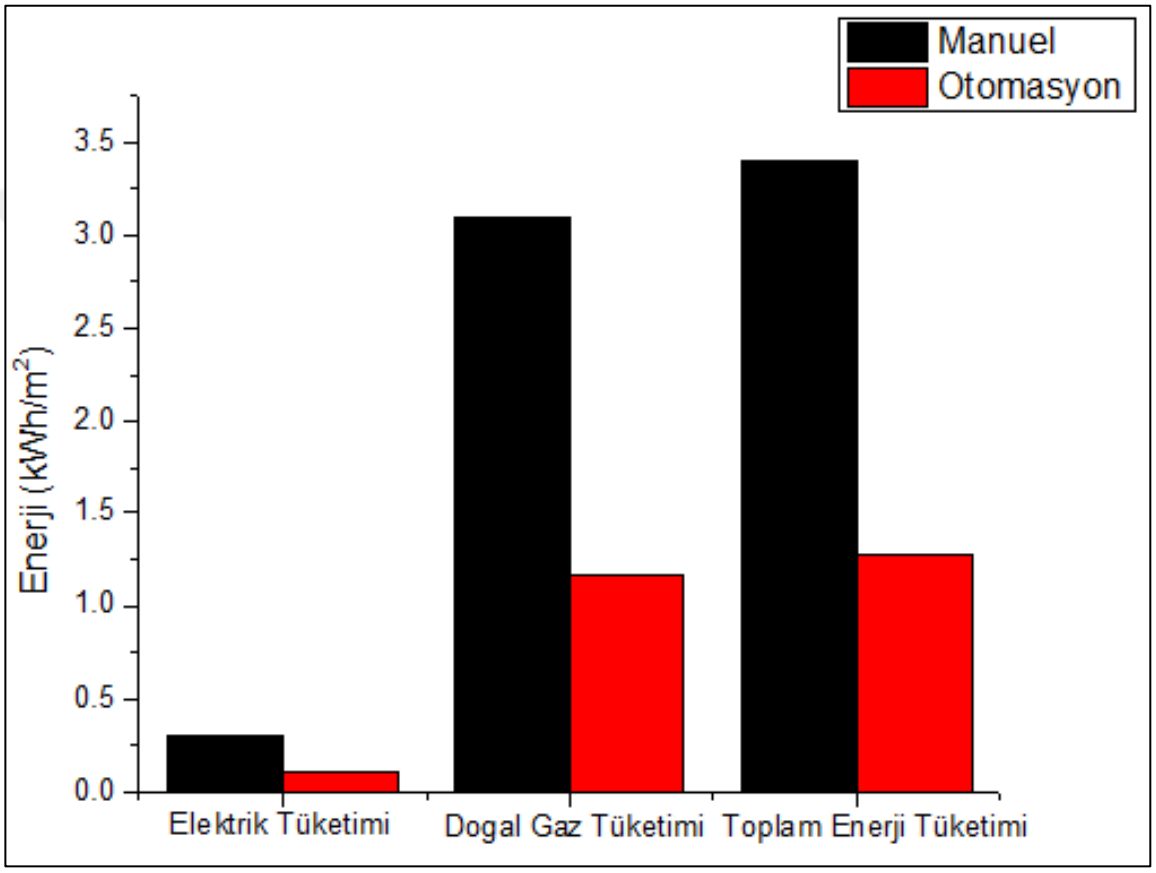
Şekil 3.6'da gösterildiği gibi manuel sistemden otomasyonlu sisteme geçilmesiyle enerji tüketiminde ciddi şekilde artış görülmüştür. Elektrik tüketimi 3,6 katına, doğal gaz tüketimi 3,8 katına ve toplam nihai enerji tüketimi ise yaklaşık 3,7 katına çıkmıştır. Ancak manuel sistemde parça işleme hızı 0,167 m^2/dak seviyesindeyken otomasyonlu sistemle bu yaklaşık 10 katına çıkarak 1,66 m^2/dak seviyesine ulaşmıştır. Bunun nedeni manuel sistemde bir prosesten diğer prosese geçişlerde boyanacak parçalar insan gücü kullanılarak daha uzun sürede taşınması ve buna bağlı olarak prosesler arasında bekleme sürelerinin oldukça fazla olmasıdır. Otomasyonlu sistemde ise prosesler arasında insan gücüne ihtiyaç duyulmadan geçişler sağlanmaktadır. Sonuç olarak günlük toplam parça işleme manuel sistemde 75 m^2 iken otomasyonlu sistemde 750 m^2 seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 3.6. Manuel ve otomasyonlu sistemlerde tüketilen enerjilerin karşılaştırılması

İki sistemi daha sağlıklı karşılaştırmak için birim alan başına tüketilen enerji değerlerine bakmak gerekmektedir. Şekil 3.7 ve Tablo 3.1'de gösterildiği gibi birim alan başına elektrik tüketimi % 64 azalarak 0,3 kWh/m^2 seviyesinden 0,108 kWh/m^2 seviyesine

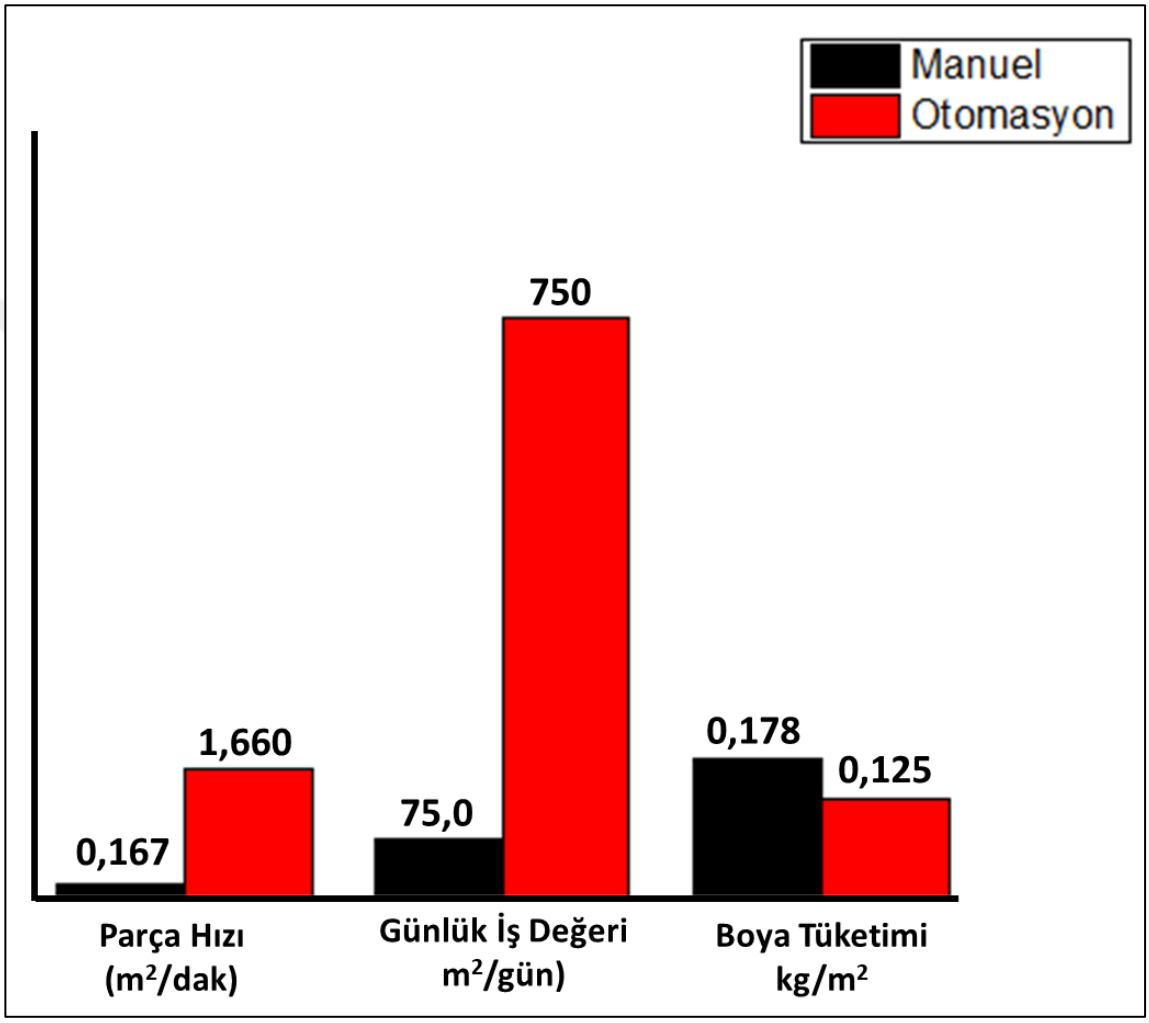
inmiştir. Birim alan başına doğal gaz tüketimi ise % 62 azalarak 3,093 kWh/m^2 seviyesinden 1,162 kWh/m^2 seviyesine inmiştir. Sonuç olarak otomasyonlu sistemde toplam enerji tüketimi artmasına rağmen, birim alan baçına enerji tüketimi yaklaşık % 63 azalmıştır.



Şekil 3.7. Manuel ve otomasyonlu sistemlerde birim alan başına tüketilen enerjilerin karşılaştırılması

Yukarıda belirtildiği gibi otomasyonlu sistemde birim alan başına enerji tüketimi oldukça iyileştirilmiştir. Bununla birlikte otomasyonlu sistemin enerji verimliliğine dolaylı katkıları da bulunmaktadır. 1 kg boya ile manuel sistemde 5,6 m^2 alan boyanabilirken otomasyonlu sistemde aynı miktar boya ile 8 m^2 alan boyanabilmektedir. Böylece boya tüketimi manuel sistemde birim alan başına 0,178 kg/m^2 seviyesindeyken otomasyonlu sistemde %30 daha azalarak 0,125 kg/m^2 seviyesine inmiştir (Şekil 3.8). Bunun temel nedeni manuel sistemde toz boya kaybı oldukça fazla olmasına rağmen, otomasyonlu sistemde kullanılmayan toz boyaların geri kazanımı daha kolaydır. Enerji

verimliliğine diğer dolaylı katkı insan gücü başına kaplanan alan yaklaşık 10 katına çıkmıştır.



Şekil 3.8. Manuel sistemle otomasyonlu sistemin hız ve malzeme tüketimi bakımından karşılaştırılması

Yıllık bazda enerji tasarrufu hesabı bir yılda aynı miktarda iş parçası üretimi referans alarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda 2016 yılındaki elektrik ve doğal gaz fiyatları dikkate alınmıştır (elektrik: 0,3099 TL/kWh, doğal gaz 0,0899 TL/kWh). Buna göre yılda 10.842.624 kWh doğal gaz tasarrufu sağlanmıştır. Aynı yaklaşımla elektrik tüketimi için 1.078.272 kWh tasarruf sağlanmıştır. Doğal gaz ve elektrik fiyatları dikkate alındığında, aynı miktarda iş parçası üretmek için doğalgazda 975.836 TL ve elektrikte ise 334.264 TL tasarruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, yılda 11.920.896 kWh

enerji tasarrufu sağlanmış ve tasarrufun finansal değeri 1.310.100 TL olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca otomasyonlu sistemde boya tüketimi manuel sisteme oranla %30 azaltılmıştır. Aynı iş parçasını boyamak için harcanan toplam miktardaki azalma yılda yaklaşık 12.500 kg'dır. Toz boyadan elde edilen tasarruf yılda 148.500,00 TL'dir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Teknolojik gelişmeler ve artan enerji talebi nedeniyle, son yıllarda enerjinin verimli kullanımı önem kazanmıştır. Yapılan çalışmada elektrostatik toz boya sisteminin bir endüstriyel firmadaki otomasyona dönüşümü hakkında analizleri yapıldı. Enerji denetimi çalışmaları, kürleme fırını, kurutma fırını ve ön işlemin en büyük enerji tüketicisi olduğunu ve toz boyama kabininin en büyük elektrik tüketicisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca enerji kullanımını ve enerji maliyetlerini azaltmanın en iyi yolunun doğal gaz ve elektrik kullanımını azaltmak olduğu da gösterilmiştir. Tez kapsamında incelenen tesiste yıllık enerji tüketiminin % 88'i üretim işlemlerine ve % 12'si ise destek işlemlerine harcanmıştır.

Otomasyonlu sistemde tüketilen enerji miktarı manuel sisteme göre oldukça fazladır. Toplam enerji tüketimi yaklaşık 3,7 katına çıkmıştır. Ancak otomasyonlu sistemde parça işleme hızı yaklaşık 10 katına ulaşmıştır. Böylece günlük toplam parça işleme manuel sistemde 75 m^2 iken otomasyonlu sistemde 750 m^2 seviyesine ulaşmıştır. Otomasyonlu sistemde toplam enerji tüketimi artmasına rağmen, birim alan başına enerji tüketimi yaklaşık % 63 azalmıştır. Doğal gaz ve elektrik fiyatları dikkate alındığında, aynı miktarda iş parçası üretmek için doğalgazda 975.836 TL ve elektrikte ise 334.264 TL tasarruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, yılda 11.920.896 kWh enerji tasarrufu sağlanmış ve tasarrufun finansal değeri 1.310.100 TL olarak gerçekleşmiştir.

Otomasyonlu sistemde boya tüketimi manuel sisteme oranla % 30 azaltılmıştır. Bunun temel nedeni manuel sistemde toz boya kaybı oldukça fazla olmasına rağmen, otomasyonlu sistemde kullanılmayan toz boyaların geri kazanımı daha kolaydır. Aynı iş parçasını boyamak için harcanan toplam miktardaki azalma yılda yaklaşık 12.500 kg'dır. Toz boyadan elde edilen tasarruf yılda 148.500 TL'dir. Tesisin toplam yatırım maliyeti düşünüldüğünde, tüm sistemin 1 yıldan az bir geri ödeme süresi vardır.

Bu çalışma kapsamında otomasyonlu sisteme geçilmesiyle enerji verimliliği ve uygulama noktasındaki iyileştirilmeler ele alınmıştır. Sonraki çalışmalarda farklı tesislerde benzer çalışmalar yapılarak otomasyonlu sistemlerin farklı ölçeklerdeki enerji verimlilikleri karşılaştırılabilir. Ayrıca toz kaplama sürecindeki her bir işlem için enerji analizleri yaparak çalışma süreçlerinin optimize edilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

[1] Erhardt D., Tumosa C. S., Mecklenburg M. F., Long-Term Chemical and Physical Processes in Oil Paint Films, *Studies in Conservation*, 2005, **50**(2), 143-150.

[2] Dickie R. A., Chemical Origins of Paint Performance, *Journal of Coatings Technology,* 1994, **66**(834), 29-37.

[3] Lambourne R., Strivens T. A. S., *Paint and Surface Coating*, 2nd ed., Woodhead, England, 1999.

[4] Young M. A., Energy Transitions and Trade Law: Lessons from the Reform of Fisheries Subsidies, *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 2017, **17**(3), 371-390.

[5] Davis S. J., Lewis N. S., Shaner M., Aggarwal S., Arent D., et al., Net-zero Emissions Energy Systems, *Science,* 2018, **360**, 6396-6401.

[6] Yousefi-Sahzabi A., Unlu-Yucesoy E., Sasaki K., Yuosefi H., Widiatmojo, A. and et al., Turkish Challenges for Low-Carbon Society: Current Status, Government Policies and Social Acceptance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **68**, 596-608.

[7] Garwood T. L., Hughes B. R., Oates M. R., O'Connor D., Hughes, R. A, Review of Energy Simulation Tools for the Manufacturing Sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **81**, 895-911.

[8] Aşici A. A., On the Sustainability of the Economic Growth Path of Turkey: 1995-2009, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **52**, 1731-1741.

[9] Takahashi S., Toda K., Ichihara K., Uchiyama, K., Recent Approaches for Saving Energy in Automotive Painting, *SAE International*, 1999, **1**, 3188-3184.

[10] Duzgun B., Komurgoz G., Turkey's Energy Efficiency Assessment: White Certificates Systems and Their Applicability in Turkey, *Energy Policy*, 2014, **65**, 465-474.

[11] Wicks Z. W., Jones F. N., Pappas S. P., Wicks D. A., Organic Coatings—Science and Technology, Editor: Reitz W. A., *Materials and Manufacturing Processes,* 3rd ed., Wiley-Interscience, Hoboken, 544-544, 2008.

[12] Misev T. A. van der Linde R., Powder Coatings Technology: New Developments at the Turn of the Century, *Progress in Organic Coatings*, 1998, **34**(1), 160-168.

[13] Wicks J. Z. W., Jones F. N., Peppas S. P., Organic Coatings: Science And Technology Volume 1: Film Formation, Components And Appearance, *Drying Technology*, 1993, **11**(6), 1477-1477.

[14] Ratanatriwong P., Barringer S., Particle Size, Cohesiveness and Charging Effects on Electrostatic and Nonelectrostatic Powder Coating, *Journal of Electrostatics*, 2007, **65**(10), 704-708.

[15] Yousuf S., Barringer S. A., Modeling Nonelectrostatic and Electrostatic Powder Coating, *Journal of Food Engineering*, 2007, **83**(4), 550-561.

[16] Sampuran S., O'Neill B. C., Bright A. W., A Parametric Study of Electrostatic Powder Coating, *Journal of Electrostatics*, 1978, **4**(4), 325-334.

[17] Sims R. A., Mazumder M. K., Xiaohong L., Chok W., Mountain J. R. and et al., Electrostatic Effects on First Pass Transfer Efficiency in the Application of Powder Coatings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, **37**(6), 1610-1617.

[18] Castle G. S. P., A Century of Development in Applied Electrostatics; Nothing Static Here, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, **18**(5), 1361-1365.

[19] Barringer S. A., Sumonsiri N., Electrostatic Coating Technologies for Food Processing, *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015, **6**(1), 157-169.

[20] Sauer D., Cerea M., Dinunzio J., McGinity J., Dry Powder Coating of Pharmaceuticals: A review, *International Journal of Pharmaceutics*, 2013, **457**(2), 488-502.

[21] Watanabe H., Ghadiri M., Matsuyama T., Ding Y. L., Pitt K. G. and et al., Triboelectrification of Pharmaceutical Powders by Particle Impact, *International Journal of Pharmaceutics*, 2007, **334**(1), 149-155.

[22] Qiao M., Zhang L., Ma Y., Zhu J., Chow K., A Novel Electrostatic Dry Powder Coating Process for Pharmaceutical Dosage Forms: Immediate Release Coatings For Tablets, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2010, **76**(2), 304-310.

[23] Shah U., Zhang C., Zhu, J., Comparison of Electrostatic Fine Powder Coating and Coarse Powder Coating by Numerical Simulations, *Journal of Electrostatics*, 2006, **64**(6), 345-354.

[24] Cazaux J., Critical Thicknesses of Electrostatic Powder Coatings from Inside, *Journal of Electrostatics*, 2007, **65**(12), 764-774.

[25] Dahmash E. Z., Mohammed A. R., Functionalised Particles Using Dry Powder Coating in Pharmaceutical Drug Delivery: Promises and Challenges, *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2015, **12**(12), 1867-1879.

[26] Prasad L. K., McGinity J. W., Williams, R. O., Electrostatic Powder Coating: Principles and Pharmaceutical Applications, *International Journal of Pharmaceutics*, 2016, **505**(1-2), 289-302.

[27] Yang Q., Ma Y., Zhu J., Chow K., Shi K., An Update on Electrostatic Powder Coating for Pharmaceuticals, *Particuology*, 2017, **31**, 1-7.

[28] Palmer J., Powder Coating Materials Deliver a World of Colors, Textures and Effects, *Products Finishing (Cincinnati)*, 2006, **70**(8), 26-35.

[29] Bocchi G., Powder Coating Materials Offer a World of Colors Textures and Effects, *Products Finishing (Cincinnati)*, 2003, **67**(11), 14-19.

[30] Kiefer S. L., Powder Coating Material Developments Promise New Opportunities for Finishers, *Metal Finishing*, 2004, **102**(1), 35-37.

[31] Kiefer S. L., Powder Coating Material Development Opportunities to Fuel Growth, *Paint and Coatings Industry*, 2003, **19**(8), 56-59.

[32] Barletta M., Gisario A., Trovalusci F., Vesco, S., Visual Appearance and Scratch Resistance of High Performance Thermoset and Thermoplastic Powder Coatings, *Progress in Organic Coatings*, 2013, **76**(1), 244-256.

[33] Sukhareva L. A., Gubanova M. I., Sergienko T. E., Legon'kova O. A., The Use of Polyethylene in Powder Coatings for Food Applications, *Lakokrasochnye Materialy i Ikh Primenenie*, 2002, **9**, 22-26.

[34] Radhakrishnan S., Sonawane N., Siju C. R., Epoxy Powder Coatings Containing Polyaniline for Enhanced Corrosion Protection, *Progress in Organic Coatings*, 2009, **64**(4), 383-386.

[35] Weiss K. D., Paint and Coatings: A Mature Industry in Transition, *Progress in Polymer Science*, 1997, **22**(2), 203-245.

[36] Meng X., Zhu J., Zhang H., Influences of Different Powders on the Characteristics of Particle Charging and Deposition in Powder Coating Processes, *Journal of Electrostatics*, 2009, **67**(4), 663-671.

[37] Barletta M., Gisario A., Electrostatic Spray Painting of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Composites, *Progress in Organic Coatings*, 2009, **64**(4), 339-349.

[38] Mazumder M. K., Sims R. A., Biris A. S., Srirama P. K., Saini D. and et al., Twenty-First Century Research Needs in Electrostatic Processes Applied to Industry and Medicine, *Chemical Engineering Science*, 2006, **61**(7), 2192-2211.

[39] Lachiver E. D., Abatzoglou N., Cartilier L., Simard, J. S., Insights into the Role of Electrostatic Forces on the Behavior of Dry Pharmaceutical Particulate Systems, *Pharmaceutical Research*, 2006, **23**(5), 997-1007.

[40] Pu Y., Mazumder M., Cooney C., Effects of Electrostatic Charging on Pharmaceutical Powder Blending Homogeneity, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2009, **98**(7), 2412-2421.

[41] Rowley G., Quantifying Electrostatic Interactions in Pharmaceutical Solid Systems, *International Journal of Pharmaceutics*, 2001, **227**(1), 47-55.

[42] Bailey A. G., The Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating, *Journal of Electrostatics*, 1998, **45**(2), 85-120.

[43] Peart J., Powder Electrostatics: Theory, Techniques and Applications, *KONA Powder and Particle Journal*, 2001, **19**, 34-45.

[44] Prasad L. K., McGinity J. W., Williams R. O., Electrostatic Powder Coating: Principles and Pharmaceutical Applications, *International Journal of Pharmaceutics*, 2016, **505**(1), 289-302.

[45] Hoburg J. F., Charge Density, Electric Field, and Particle Charging in Electrostatic Precipitation with Back Ionization, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1982, **IA-18**(6), 666-672.

[46] McLean K. J., Electrostatic Precipitators, *IEE - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, 1988, **135**(6), 347-361.

[47] Andrei D. C., Hay J. N., Keddie J. L., Sear R. P., Yeates S. G., Surface Levelling of Thermosetting Powder Coatings: Theory and Experiment, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, **33**(16), 1975.

[48] Mazur S., Beckerbauer R., Buckholz J., Particle Size Limits for Sintering Polymer Colloids without Viscous Flow, *Langmuir*, 1997, **13**(16), 4287-4294.

[49] Amend P., Pfindel S., Schmidt M., Thermal Joining of Thermoplastic Metal Hybrids by Means Of Mono- and Polychromatic Radiation, *Physics Procedia*, 2013, **41**, 98-105.

[50] Gray J. E., Luan B., Protective Coatings on Magnesium and Its Alloys - A Critical Review, *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, **336**(1), 88-113.

[51] Puig M., Cabedo L., Gracenea J. J., Jiménez-Morales A., Gámez-Pérez J. and et al., Adhesion Enhancement of Powder Coatings on Galvanised Steel by Addition of Organo-Modified Silica Particles, *Progress in Organic Coatings*, 2014, **77**(8), 1309-1315.

[52] Subramanian V., van Ooij W. J., Silane Based Metal Pretreatments as Alternatives to Chromating: Shortlisted, *Surface Engineering*, 1999, **15**(2), 168-172.

[53] Kim J. K., Kim W. H., Lee, D. H., Adhesion Properties of UV Crosslinked Polystyrene-Block-Polybutadiene-Block-Polystyrene Copolymer and Tackifier Mixture, *Polymer*, 2002, **43**(18), 5005-5010.

[54] Awaja F., Gilbert M., Kelly G., Fox B., Pigram, P. J., Adhesion of Polymers, *Progress in Polymer Science*, 2009, **34**(9), 948-968.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Taskan D.**, Hergul A. S., Coban V., Kaya D., Electrostatic Powder Coating Plant Conveyor System and Energy Efficiency, *3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17)*, Karabük, 3-5 April 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Kocaeli'de doğdu. İlk, orta, lise ve ön lisans öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 2012 yılında girdiği Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında Kimya Mühendisi olarak mezun oldu. 2015-2016 yılları arasında. Kocaeli'de bulunan Özel bir şirkette kalite kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2016- yılları arasında, Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir. 2016-2018 yılları arasında Kocaeli'de bulunan Demir-Çelik sektöründe üretim yapan özel bir firmada Elektrostatik Toz Boya Bölümünde Ekip lideri olarak çalıştı.