PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE KALIPLARIN ENERJİ TÜKETİMİNİN BELİRLENMESİ

Hilmi Kemal YILDIRIM

T. C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE KALIPLARIN ENERJİ TÜKETİMİNİN BELİRLENMESİ

Hilmi Kemal YILDIRIM

0009-0002-3329-0350

Prof. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA–2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE KALIPLARIN ENERJİ TÜKETİMİNİN BELİRLENMESİ

Hilmi Kemal YILDIRIM

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erhan PULAT

Günümüzde plastik mamuller her alanda kullanılmaktadır, plastik enjeksiyon yöntemi plastik mamul üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizde ve dünyada plastik enjeksiyon yöntemi ile parça imalatı ve makine parkuru günden güne büyümektedir. Sürdürülebilirlik, sıfır karbon emisyonu ve kaliteden ödün vermeksizin maliyet iyileştirme hedefleri doğrultusunda plastik enjeksiyon prosesinde yapılacak enerji tasarrufu ciddi önem arz etmektedir.

Araştırma yapılan işletme, otomotiv sektöründe faaliyet göstermektedir. İşletmenin bütün enjeksiyon makinelerinde elektrik sayacı bulunmakta ve sayaçtan okunan veriler otomasyon ile işlenmektedir. Elde edilen ölçüm verileri analiz edilmiş, kalıp ve makine bazlı ortalama saatlik elektrik tüketimleri hesaplanarak makine ve kalıpların enerji profilleri ortaya çıkarılmıştır. Aynı kalıp ile farklı makinelerde üretim yapılması, aynı parçanın farklı kalıplar ile üretilmesi gibi senaryolardaki elektrik tüketimleri karşılaştırılarak plastik enjeksiyon makinesinin ve üretim yapılan kalıbın elektrik tüketimine etkisi hesaplanmıştır. Üretilen parçalar sınıflandırılarak kendi içlerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada herhangi bir parametre ve üretim prosesinde değişiklik yapılmadığı için kalitesel veya ölçümsel bozulma olmadan elektrik tüketimini azaltacak sonuçlar elde edilmiş ve kg hammadde başına elektrik tüketimi ile saatlik elektrik tüketim bilgilerine dayanarak kalıp elektrik tüketimleri karşılaştırılmıştır.

Araştırma sonucunda, elektrikli tip plastik enjeksiyon makinesinin saatlik elektrik tüketiminin, hidrolik tipe göre daha düşük olduğu, makinelerin bakım ihtiyacı nedeniyle elektrik tüketiminin arttığı, kalıbın düşük enerji ihtiyacı olan makinelerde daha düşük elektrik tükettiği görülmüştür. Makine bakımları yapılarak ve kalıba uyumlu daha düşük kapasiteli plastik enjeksiyon makinesi seçimi ile elektrik tasarrufu sağlanabileceği ve elektrik tüketiminin aylık dalgalanmalarının takibi ile kestirimci bakım yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik enjeksiyon, saatlik elektrik tüketimi, enerji profili, enerji verimlilik sınıfı.

2024, xv + 49 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FACTORS AFFECTING ENERGY CONSUMPTION IN PLASTIC INJECTION PROCESS AND DETERMINATION TO MOLD ENERGY CONSUMPTION

Hilmi Kemal YILDIRIM

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erhan PULAT

Nowadays, plastic products are used in a wide range, plastic injection molding method is an important in plastic part production. Plastic injection molding method has important usage in the plastic industry and plastic injection molding machine park and production are growing day by day in Türkiye and world. Energy saving in the plastic injection molding process has great importance in line with sustainability, zero carbon emissions and cost improvement targets without compromising quality.

The company this research has done, operates in the automotive industry. All of injection molding machines have electrical energy meter and the data read from meter have processed with automation. Obtained electrical measurement data analyzed, later calculated average hourly electricity consumption for mold and injection molding machine and found out energy profiles for machine and mold. By making comparison the electricity consumption in scenarios such as production on different machines with the same mold or production of the same part with different molds, the effect of the plastic injection machine and mold on the electricity consumption was calculated. Plastic parts classified and made comparison based on this classification. Due to there was no change on the mold parameters or production process, results that would reduce electricity consumption were obtained without any quality or measurement deterioration. Mold electricity consumptions was compared based on electricity consumption per kg of material and mold hourly electricity consumption.

As a result of the research, electrical injection molding machines electricity consumption lower than hydraulic machine electricity consumption, low energy load machines electricity consumption lower than high energy load machines. It has been concluded that electricity savings can be achieved by making machine maintenance and choosing a lower capacity plastic injection machine compatible with the mold and that predictive maintenance can be made by monitoring monthly fluctuations of electricity consumption.

Key Words: Plastic injection molding, hourly electricity consumption, energy profile, energy efficiency class.

2024, x + 49 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimi sürecinde her türlü akademik destek ve rehberliği için danışman hocam Prof. Dr. Erhan PULAT'a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde her türlü teknik bilgi, veri ve maddi destek sağlayan Kaplam Otomotiv yönetim kurulu, yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında desteğini hissettiğim annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Yüksek lisans başlamamda ön ayak olup süreçte sürekli desteğini esirgemeyen değerli eşim Şeyma Özön Yıldırım'a ve dünyaya bakışımı değiştirip hayatımı güzelleştiren canım kızım Çiçek Irmak'a teşekkür ederim.

Hilmi Kemal YILDIRIM
18/07/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR....x
SİMGELER DİZİNİ....xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ....xiv
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....2
2.1. Kaynak Araştırması....2
2.2. Plastikler....4
2.2.1. Termoplastikler....5
2.2.1.1. Mühendislik Termoplastikleri....5
2.2.2. Termosetler....6
2.2.3. Elastomerler....6
2.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi....6
2.3.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi....6
2.3.1.1. Plastikleştirme ve Enjeksiyon Ünitesi....9
2.3.1.2. Kalıp Ünitesi....9
2.3.1.3. Mengene Ünitesi....9
2.3.1.4. Kontrol Ünitesi....10
2.3.2. Plastik Enjeksiyon Çevrimi....10
2.3.2.1. Hammadde Kurutma Aşaması....10
2.3.2.2. Plastikleştirme Aşaması....11
2.3.2.3. Kalıbın Kapanması....11
2.3.2.4.Kalıbın Doldurulması....11
2.3.2.5. Ütüleme....11
2.3.2.6. Tutma....11
2.3.2.7. Soğutma....11
2.3.2.8. Parçanın Kalıptan Çıkarılması....12
2.3.3. Enjeksiyon Parametreleri....12
2.3.3.2. Basınç....13
2.3.3.2.1. Enjeksiyon Basıncı....14
2.3.3.2.2. Tutma Basıncı....14
2.3.3.2.3. Geri Basınç....14
2.3.3.2.3. Kalıp Kapama Kuvveti....14
2.3.3.3. Zaman....15
2.3.3.4. Hız....15
2.3.3.4.1. Enjeksiyon Hızı....15
2.3.3.4.1. Vida Dönme Hızı....16
2.4. Plastiklerde Çekme....16
2.5. Plastik Enjeksiyon Kalite Hataları....17
2.6. Plastik Enjeksiyon Kalıpları....18
2.7. Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçimi....20
2.7.1. Enjeksiyon Makinesi Baskı Hacmi....21
2.7.2. Kolon Aralığı....21
2.7.3. Plastik Enjeksiyon Makinesi Maximum Kapama Kuvveti....21
3. MATERYAL ve YÖNTEM....22

3.1. Çalışma Yapılan İşletmenin Tanıtımı 22
3.2. Tesiste Üretilen Referansların Gruplandırılması 23
3.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi Elektrik Tüketimi Ölçümü 25
3.4. Elektrik Tüketim Değerlerinin Analizi 25
3.5. Plastik Enjeksiyon Makinesi Elektrik İhtiyaç Bilgileri 26
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 27
4.1. Enjeksiyon Makinelerinin Enerji Tüketim Profilleri 27
4.2. Aynı Kalıbın Farklı Makinelerde Çalıştırılması 31
4.2.1. Kalıbın Aynı Kapasite ve Aynı Elektrik İhtiyacına Sahip Makinelerde Çalıştırılması 31
4.2.2. Kalıbın Farklı Kapasitedeki Makinelerde Çalıştırılması 34
4.3. Simetrik veya Benzer Tasarıma Sahip Kalıpların Elektrik Tüketimlerinin Karşılaştırılması 36
4.4. Kalıp Enerji Tüketimleri 37
5. SONUÇLAR 45
KAYNAKLAR 46
ÖZGEÇMİŞ 49

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
S_L	Çekme oranı
L_K	Kalıptaki uzunluk
L_P	Parçadaki uzunluk
E_{kg}	Kg hammadde başına elektrik tüketimi
E_{sa}	Saatlik elektrik tüketimi
$Ç_s$	Çevrim süresi
m	Toplam hammadde ağırlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Parametrelerin enerji tüketimine etkileri	3
Şekil 2.2.	Türkiye'de plastik mamul üretimi - Son 5 Yıllık Kıyaslama…… (PAGEV 2023)	4
Şekil 2.3.	Türkiye plastik sektörü proses kapasitesi ve makine parkı gelişimi (PAGEV 2023)	4
Şekil 2.4.	2023 yılı alt sektörler bazında plastik mamul üretimi – (1000 Ton) (PAGEV 2023)	5
Şekil 2.5.	11000 kN Bi-enjeksiyon makinesi teknik veri sayfası	8
Şekil 2.6.	Plastik enjeksiyon makinesi bölümleri	9
Şekil 2.7.	Plastik enjeksiyon çevrimi	10
Şekil 2.8.	Plastik enjeksiyon çevrim zamanları	15
Şekil 2.9.	Amorf ve yarı kristalin malzemelerin çekme oranları	16
Şekil 2.10.	Hacim-basınç-sıcaklık diyagramı üzerinde enjeksiyon çevrimi ve çekme	17
Şekil 2.11.	Plastik enjeksiyon kalıp bileşenleri	19
Şekil 2.12.	Plastik enjeksiyon kalıp tipleri	20
Şekil 2.13.	1400 ton kapama kuvvetine sahip makine ölçüleri	21
Şekil 3.1.	Tesise ait görsel	22
Şekil 3.2.	Tesiste üretimi yapılan ürün grupları	23
Şekil 3.3.	Örnek far gövde referansları	23
Şekil 3.4.	Örnek küçük aydınlatma referansları	23
Şekil 3.5.	Örnek iç trim referansları	24
Şekil 3.6.	Örnek fan referansları	24
Şekil 3.7.	Örnek çift enjeksiyon referansları	24
Şekil 4.1.	Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerinin ortalama saatlik elektrik tüketimi	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Çeşitli hammadde gruplarının parametre değerleri.....	12
Çizelge 3.1.	11000 kN kapasiteli plastik enjeksiyon makinesi enerji ihtiyacı....	26
Çizelge 4.1.	Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerine teknik bilgiler.....	28
Çizelge 4.2.	Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerine ait aylık elektrik …….. tüketimleri	29
Çizelge 4.3.	1200 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri.....	32
Çizelge 4.4.	3500 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri.....	32
Çizelge 4.5.	5000 kN ve 6000 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri ..	33
Çizelge 4.6.	13000 kN ve 14000 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri ..	34
Çizelge 4.7.	Kalıbın farklı kapasiteli makinelerde çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri.....	35
Çizelge 4.8.	Simetrik ve eş kalıpların enerji tüketim karşılaştırması.....	37
Çizelge 4.9.	Kg hammadde elektrik tüketimi hesabı	38
Çizelge 4.10.	Far gövde kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları	38
Çizelge 4.11.	İç trim kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları	40
Çizelge 4.12.	Reflektör kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları	41
Çizelge 4.13.	Çerçeve kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları	42
Çizelge 4.14.	Fan kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları	43
Çizelge 4.15.	Çift enjeksiyon hvac kalıplarının elektrik tüketim ve parça ……. detayları.....	44

1. GİRİŞ

Plastik mamuller, hemen hemen tüm sektörlerde ihtiyaç duyulan çok geniş bir ürün yelpazesine sahiptir. Ülkemizde ve dünyada plastik parça imalatı ve makine parkı günden güne büyümektedir. Her geçen gün artan plastik parça imalatı ve genişleyen makine parkı ile birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır. Sıfır karbon emisyonu ve kaliteden ödün vermeksizin maliyet iyileştirme hedefleri doğrultusunda plastik enjeksiyon prosesinde yapılacak enerji tasarrufu ciddi önem arz etmektedir.

Günden güne artan plastik mamul üretimi ve genişleyen makine parkuru ile birlikte enerji sarfiyatı da artmaktadır. Ölçemediğiniz şeyi yönetemezsiniz (Peter F. Drucker), bu nedenle tasarruf sağlayabilmek için öncelikle enerji tüketiminin ölçülmesi ve tüketimi etkileyen faktörlerin bulunması elzemdir.

Ülkemizdeki plastik mamul üretiminin ciddi bir kısmını sağlayan otomotiv sektörü için yüksek kalite, sürdürülebilirlik, çevreci bir politika ve rekabetçi fiyatlar sektörün olmazsa olmaz gerekliliklerdir.

Araştırma, enerji tüketimini etkileyen faktörlerin bulunması, ölçülmesi ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlayarak çevresel, maliyet iyileştirmesi, ölçülebilirlik, öngörülebilirlik alanlarında katkı sağlayacaktır. Ayrıca makine enerji profillerinin ortaya çıkartılması ve aylık tüketim takibi ile kestirimci bakım için bir işaret olacak ve bu sayede plansız duruşların ve olası yüksek maliyetli bakım ihtiyaçlarının önüne geçilebilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Yapılan kaynak araştırmasında, Taguchi analizi, zaman serileri, makine öğrenmesi, tek yönlü varyans analizi (ANOVA), yapay sinir ağları (ANN), genetik algoritmalar, Pareto analizi, kalıp akış analizi analizi gibi yöntemler kullanılarak aşağıdaki konularda çalışma yapıldığı görülmüştür.

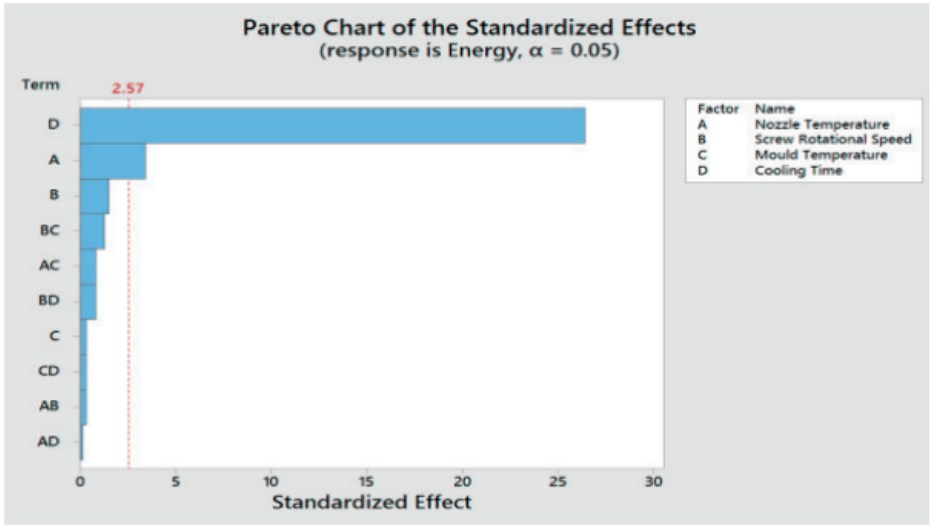
- Kalıp parametrelerinin enerji tüketimine etkisi
- Kalıp göz sayısının enerji tüketimine etkisi
- Makine seçiminin enerji tüketimine etkisi
- Kullanılan hammaddenin enerji tüketimine etkisi
- Enerji tüketimi ampirik olarak modellenmesi
- Enjeksiyon parametrelerinin optimizasyon algoritmasının oluşturulması
- Hidrolik tip ve elektrikli tip enjeksiyon makinelerin enerji tüketiminin karşılaştırılması
- Anlık enerji dalgalanmasının izlenmesiyle prosesteki kalite hatalarının yakalanması
- Kalıp tasarımı esnasında yapılacak iyileştirmelerin enerji tüketimine etkisi
- Kalıpta verimli soğutma tasarımı ile soğutma çevrim süresinin iyileştirilmesi

Elduque ve ark. (2018), çalışmalarında plastik enjeksiyon prosesinin spesifik enerji tüketimini (SEC) tahmin edecek bir ampirik model üzerinde çalışma yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda ölçülen elektrik tüketimleri ile hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve ortalama sapmanın %22,5 olduğu, Ecoinvent gibi veri tabanlarının sapma oranının ortalama %86,8 olduğu görülmüş.

Lu ve ark. (2012), çalışmalarında Taguchi metodu ile deneysel bir tasarım, varyans analizi (ANOVA) ile süreç analizi, yapay sinir ağı (ANN) ile süreç modelleme algoritmasını ve genetik algoritma (GA) tabanlı parametre optimizasyonunu birleştirerek plastik enjeksiyon prosesinde parametre optimizasyon modeli önermişlerdir. Yapılan deneyler

sonucunda ürün kalitesinde ve enerji tüketiminde %10'luk iyileşme olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Meekers ve ark. (2018), çalışmalarında vida sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, soğutma süresi ve vida dönme hızı parametrelerin etkilerini karşılaştırmışlardır. Elde edilen veriler varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile analiz edilmiş ve soğutma süresinin elektrik tüketimine çok ciddi etkisinin olduğu, vida sıcaklığının önemli bir etken olduğu vida sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının daha sınırlı etkilerinin olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.1. Parametrelerin enerji tüketimine etkileri

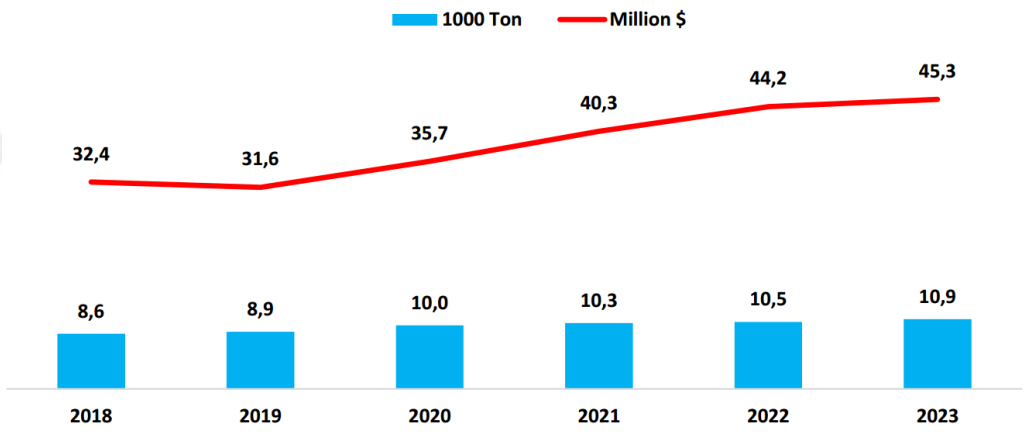
Mohamed ve ark. (2023), çalışmalarında farklı enjeksiyon parametre kombinasyonları ile deney yapmışlar. Elde edilen verilerden kalite gereksinimini sağlayan senaryodaki veriler ile bir veri tabanı oluşturmuşlar. Elde edilen veriler ile süreç girdileri ve çıktıları arasında bir korelasyon elde etmek için yapay sinir ağları ve Taguchi yöntemi analizi sonuçları ile bir araya getirilmiş. Kalite gereksinimlerini sağlayan ve enerji tüketimini optimize eden etkili bir kontrol sistemi oluşturmuşlardır.

Mianehrow ve ark. (2017), çalışmalarında altı farklı plastik enjeksiyon makinesinin enerji tüketimleri enjeksiyon aşamalarına göre ölçülmüş ve her bir makinenin enerji profili oluşturulmuş. Altı farklı makinada yapılan üretimlerde spesifik elektrik tüketim (SEC) değerleri hesaplanmış. Elde ettikleri veriler ile yapmış oldukları değerlendirmede, parametrelerin dışında süreç ayarlarının da enerji tüketimini etkilediği ve her makinanın farklı enerji profili olduğu sonucuna varmışlar.

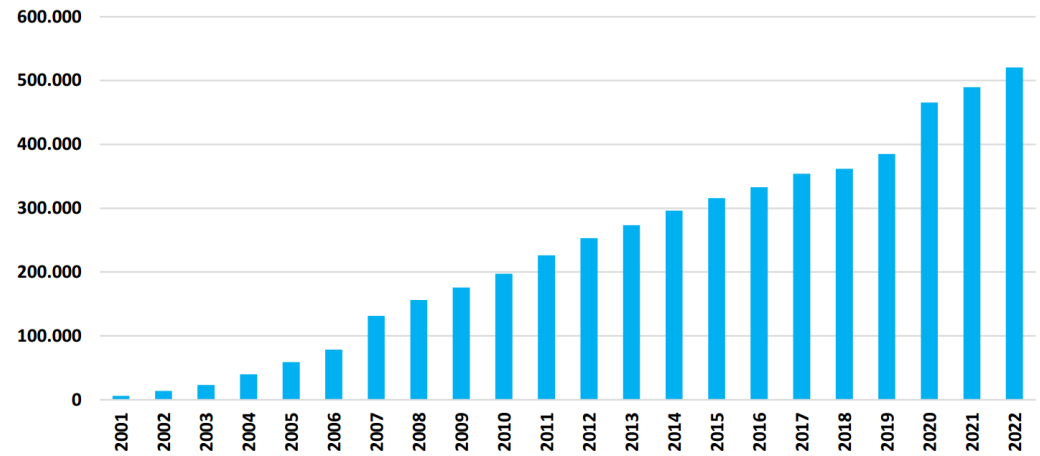
2.2. Plastikler

Isı ve basınç etkisiyle şekil verilebilen, monomer isimli basit yapılardan oluşan uzun ve zincirli yapıya plastik denir.

Plastik mamuller, hayatın her alanında kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji, yapılan makine ve proses yatırımları ile Türkiye'de plastik malzeme kullanımı yıldan yıla artmaya devam etmektedir.

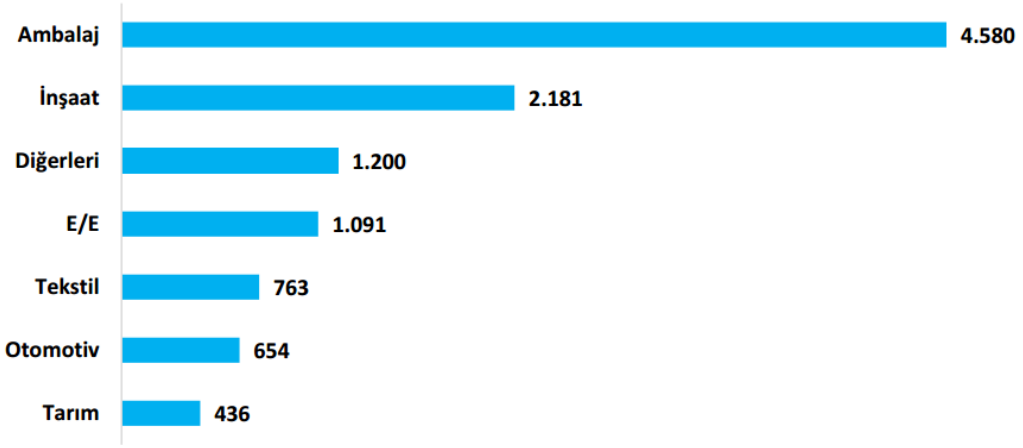


Şekil 2.2. Türkiye'de plastik mamul üretimi - Son 5 Yıllık Kıyaslama (PAGEV 2023)



Şekil 2.3. Türkiye plastik sektörü proses kapasitesi ve makine parkı gelişimi (PAGEV 2023)

Türkiye'de plastik malzemelerin en çok ambalaj sektöründe kullanılmaktadır. Otomotiv sektörü plastik mamul üretiminde önemli bir bölümü kapsamaktadır.



Şekil 2.4. 2023 yılı alt sektörler bazında plastik mamul üretimi – (1000 Ton) (PAGEV 2023)

Plastikler üç ana başlıkta sınıflandırılır.

2.2.1. Termoplastikler

Termoplastikler ısıtıldığında homojen sıvı fazında olup soğutulduğunda sertleşir. Bu plastik türü tekrar ısıtılarak şekillendirilebilir. Bu tip hammaddeler büyük ölçüde fosil hammaddelerden elde edilmektedir.

2.2.1.1. Mühendislik Termoplastikleri

Mühendislik termoplastikleri genellikle sıcaklık dayanımı, kimyasal dayanım, darbe dayanımı, mekanik dayanım ve alev geciktirme vb. konularda yüksek performans sağlayan termoplastik gurubudur. Bu grup plastikler imalatı yapılacak paçanın amacına uygun olan özelliklerin mühendislik tasarımı yapılarak elde edilir.
Bu tip plastiklerin bazı örnekleri aşağıda belirtilmiştir,

- Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS)
- Sıvı Kristal Polimerler (LCP)
- Polibütilen Tereftalat (PBT)
- Polimetil metakrilat (PMMA)
- Poliamid (PA)
- Poliarilsülfon (PSU/P/PPSU)

- Polikarbonat (PC)
- Poliimid (PI)
- Polioksimetilen (POM)
- Poliftalamid (PPA)
- Polifenilen sülfür (PPS)
- Poliviniliden florür (PVDF)
- Termoplastik polyester elastomer (TPE-E)
- Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE)

2.2.2. Termosetler

Termosetler işlendiğinde kimyasal reaksiyon geçirerek üç boyutlu bağ oluşturur bu nedenle ısıtılan ve şekil verilen termosetler tekrar işlenemez.

2.2.3. Elastomerler

Elastomerler kolay deforme olmayan bükülebilir özellikleri taşıyan bir polimer türüdür, kauçuk malzemeler bu sınıfta değerlendirilir.

2.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi

Plastik enjeksiyon, plastik enjeksiyon kalıbına eritilmiş plastiğin enjekte edilmesi prensibi ile çalışır.

2.3.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Plastik enjeksiyon makinesi, eritilmiş plastiğin yüksek basınç altında sıkıştırılan kalıbın boşluğuna doldurulmasını sağlayarak plastik parça imalatı sağlayan makinelerdir. Enerji kullanımına göre 3 tip enjeksiyon makinesi vardır,

- Elektrikli enjeksiyon makinesi
- Hidrolik enjeksiyon makinesi
- Hibrit enjeksiyon makinesi

Plastik enjeksiyon makinesinin kapasite ve makine özelliklerine göre değişen çeşitli spesifikasyonları bulunmaktadır. Enjeksiyon makinesi seçimi ve kalıp bağlanabilirliği için aşağıda belirtilen plastik enjeksiyon makinesi spesifikasyonları dikkate alınır.

- Kalıp kapama kuvveti (kN)
    - Kalıp kapama kuvveti (kN)
    - Haraketli plaka stroku (mm)
    - Kolonlar arası mesafe (mm)
    - Bağlantı plakası boyutları (mm)
    - Minimum-maksimum kalıp yükseklikleri (mm)
- Vida çapı (mm)
- Vida uzunluğunun vida dış çapına oranı
- Maksimum enjeksiyon basıncı
- Nominal baskı hacmi (cm^3)
- Gerçek baskı hacmi (cm^3)
- Gerçek baskı ağırlığı (gr)
- Enjeksiyon hızı (cm^3/sn)
- Plastikleştirme kapasitesi (kg/saat)
- Maksimum vida devir hızı (devir/dk)
- Plastikleştirme ocağı ısı kapasitesi (kW)
- Vida motoru gücü
- Maksimum vida torku (Nm)
- Vida memesi ile kalıp arasındaki kontakt kuvveti
- Ocak ısıtma bölge sayısı
- Kalıp açma-kapama hızı

TECHNISCHE DATEN ***TECHNICAL DATA***

Fab.-Nr.:	***Serial No.:***
Kunde	***Customer***
Maschinenbezeichnung	***Machine designation***
Auftragsnummer	***Order number***

Schließeinheit	***Clamping unit***		
Schließkraft	*Clamping force*	kN	11000
Öffnungskraft (mit Druckkissen)	*Opening force (with pressure pad)*	kN	760
Öffnungskraft	*Opening force*	kN	393
Öffnungsweg	*Opening stroke*	mm	1800
Werkzeugeinbauhöhe min.	*Mold height min.*	mm	600
Werkzeugeinbauhöhe max.	*Mold height max.*	mm	1200
Aufspannplattengröße hor. x vert.	*Platen size hor. x vert.*	mm	1850 x 1810
lichter Holmabstand hor. x vert.	*distance between tiebars hor. x vert.*	mm	1400 x 1150
Holmdurchmesser	*Tie bar diameter*	mm	215
Werkzeuggewicht max. 8)	*Mold weight max. 8)*	kg	21000
Auswerferweg	*Ejector stroke*	mm	300
Auswerferkraft	*Ejector force*	kN	215
Trockenlauf (Euromap 6) Zeit	*Dry operation (Euromap 6) time*	sec	3,9
Trockenlauf (Euromap 6) Hub	*Dry operation (Euromap 6) stroke*	mm	1000

Spritzeinheit 1	***Injection unit 1***		
Schneckendurchmesser	*Screw diameter*	mm	105
Dosierweg	*Screw stroke*	mm	480
Max. Hubvolumen	*Injection capacity*	cm³	4160
Schneckendrehzahl max	*Screw speed max*	r/min	155
Schneckendrehzahl hydr. Paralleldosieren 9)	*Schneckendrehzahl hydr. Paralleldosiere*	r/min	124
L/D Schneckenlänge (3-Zonen)	*L/D ratio (3-zone screw)*	L/D	20
Plastifizierleistung (3-Zonen) 3)	*Recovery rate (3-zone screw) 3)*	g/sec	110
L/D Schneckenlänge (Barriere)	*L/D screw length (Barrier)*	L/D	22
Plastifizierleistung (Barriere) 5)	*Plasticizing capacity (Barrier) 5)*	g/sec	176
Einspritzstrom	*Injection rate*	cm³/s	945
Einspritzstrom bei erhöhtem Spritzdruck	*Injection rate with increased injection pre*	cm³/s	745
Spez. Spritzdruck	*Injection pressure (regenerative)*	bar	1650
Spez. Spritzdruck erhoeht	*Specific injection pressure increased*	bar	2090
Düsenweg	*Nozzle stroke*	mm	700
Düsenanpresskraft	*Nozzle contact pressure*	kN	150
Heizleistung Standard 7)	*Heating capacity standard 7)*	kW	68
Anzahl der Heizzonen inkl. Düse 7)	*Number of the heating zones incl. nozzle*		6
Pumpenantriebsleistung	*Rated drive power*	kW	130
Ölfüllung	*Oil reservoir capacity*	l	1800

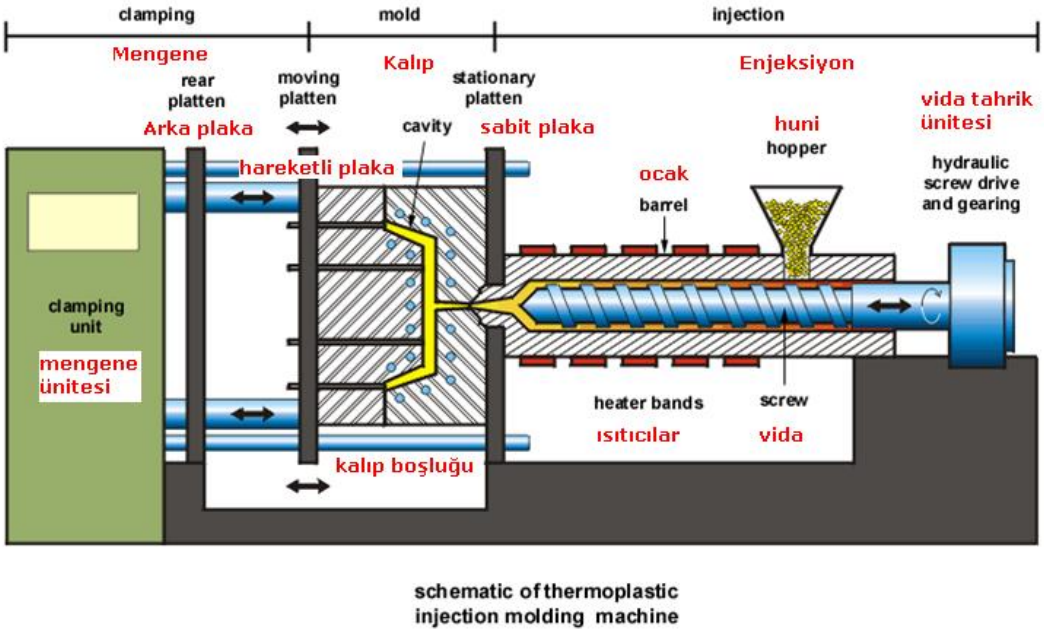
Gewicht	***Weight***		
Netto Schließ-/Spritzeinheit	*Net clamping/injection unit*	to	39 / 17

Şekil 2.5. 11000 kN Bi-enjeksiyon makinesi teknik veri sayfası

Plastik enjeksiyon makinesi 4 ana bölümden oluşmaktadır,

- Plastikleştirme ve enjeksiyon ünitesi
- Makine gövdesi
- Mengene ünitesi
- Kontrol ünitesi

Ayrıca prosesin ihtiyaçları doğrultusunda, şartlandırıcı, kurutucu, dozaylayıcı, yolluk üniteleri, robot-robot eli gibi ekipmanlar ile de çalışabilmektedir.



Şekil 2.6. Plastik enjeksiyon makinesi bölümleri

2.3.1.1. Plastikleştirme ve Enjeksiyon Ünitesi

Granül haldeki plastik malzeme besleme hunisine aktarılır. Malzeme, ısıtıcı rezistansların bulunduğu sonsuz vida ile hammaddenin teknik veri sayfasında belirtilen uygun sıcaklığa getirilerek kalıp boşluğun iletilir. Kalıpta enjeksiyon ve soğuma işlemi bitene kadar tutma basıncı korunarak erimiş malzemenin geriye kaçması önlenir.

2.3.1.2. Kalıp Ünitesi

Plastik parça kalıbının yerleştiği boşluktur. Kalıbın sabit plakası enjeksiyon tarafına haraketli tarafı ise karşı tarafa bağlanır. Kalıp tasarımı yapılırken makinenin kalıp boşluğuna uygun ölçülerde tasarım yapılır.

2.3.1.3. Mengene Ünitesi

Makineye bağlanan kalıbın açılıp kapanmasını ve istenilen basınç ile sıkıştırılması sağlanır. Çapak oluşumunu önlemek için uygulanan basınç son derece önem arz etmektedir. 3 tip mengene sistemi bulunmaktadır.

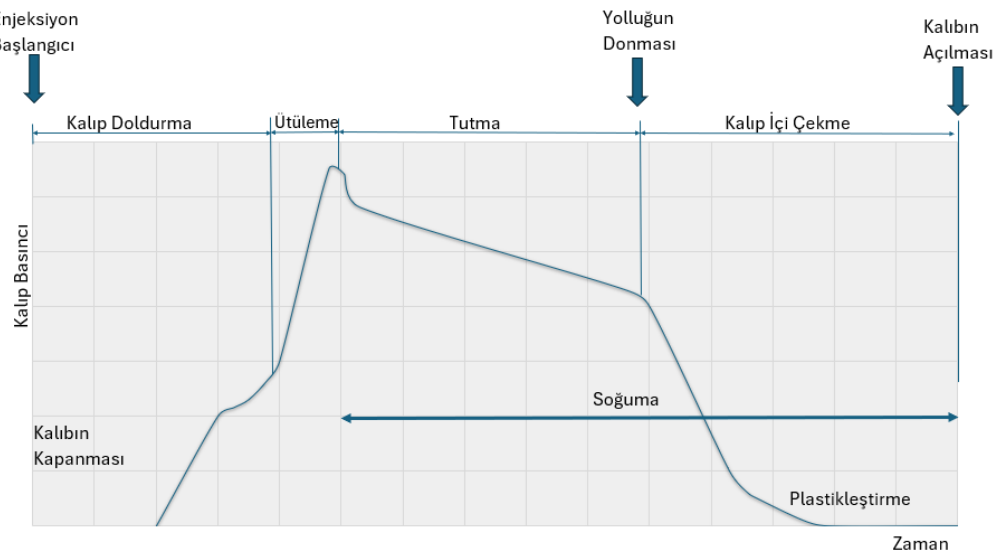
- Mekanik sistem
- Hidrolik sistem
- Hidro-mekanik sistem

2.3.1.4. Kontrol Ünitesi

Plastik enjeksiyon prosesinde istenilen parametrelerin ayarlandığı PLC kontrol sistemini içeren otomasyon sistemidir.

2.3.2. Plastik Enjeksiyon Çevrimi

Plastik enjeksiyon işlemi, prosesin ihtiyacına göre değişen çeşitli aşamalardan oluşmaktadır.



Şekil 2.7. Plastik enjeksiyon çevrimi

2.3.2.1. Hammadde Kurutma Aşaması

Bu aşamada hammaddenin özelliklerine ve prosesin ihtiyacına göre nem alma işlemi yapılmaktadır.

2.3.2.2. Plastikleştirme Aşaması

Plastik hammadde sonsuz vida sürtünmesi ve ısıtıcılar yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilerek eritilen plastik vida boşluğuna ulaştırılır. Kalıp soğuma sürecinde basınç uygulanmaya devam edilerek malzemenin geri gitmesi önlenir.

2.3.2.3. Kalıbın Kapanması

Kalıp mengene ünitesi ile kapatılır yüksek basınç uygulanarak kalıbın açılması engellenir.

2.3.2.4.Kalıbın Doldurulması

Basınç altındaki kalıba eriyik plastik malzeme enjekte edilerek kalıp gözleri doldurulur.

2.3.2.5. Ütüleme

Malzemenin kalıp boşluğuna tamamen dolması ve çeşitli kalite hatalarının önlenmesi için yüksek basınç uygulanır, plastik kalıp içinde kapatılana kadar basınç uygulanmaya devam eder.

2.3.2.6. Tutma

Çekmeyi azaltmak için parça kalıp içinde tutma basıncı altında bekletilerek parça çektikçe içeriye yeni eriyik dolması sağlanır. Tutma aşaması yolluk girişinin donmasına kadar devam eder.

2.3.2.7. Soğutma

Kalıp içindeki eriyik plastiğin kalıptaki su soğutma kanalları vasıtasıyla, parçanın vicat yumuşama sıcaklığına ulaşıncaya kadar soğutulur ve katı parça elde edilir. Bu süreçte yüksek basınç uygulanmaya devam edilir.

2.3.2.8. Parçanın Kalıptan Çıkarılması

Kalıbın haraketli tarafı mengene tarafından açılır ve kalıpta bulunan iticiler yardımıyla parça çıkartılır. Parça, robot eli, dökme veya operatörün alması yöntemiyle kalıptan çıkarılabilir.

2.3.3. Enjeksiyon Parametreleri

Plastik enjeksiyon prosesinde uygun kalite koşullarında parça üretimi yapabilmek için plastik enjeksiyon makinesinde yapılan parametre ayarları dört ana başlıkta incelenmektedir,

- Sıcaklık
- Basınç
- Zaman
- Hız

Çizelge 2.1. Çeşitli hammadde gruplarının parametre değerleri

	Erime Sicaklik	Enjeksiyon Sicakligi	Kalip Sicakligi	Kalip Göz içi Basinç	Kalipta Çekme Orani
AMORF PLASTIKLER	(°C)	(°C)	(°C)	(Bar)	(%)
ABS	170 - 200	250	75	300 - 550	0,4 - 0,7
PS	130 - 160	225	45	150 - 350	0,3 - 0,6
SB	130 - 160	225	45	200 - 400	0,3 - 0,6
SAN	140 - 170	255	80	250 - 450	0,4 - 0,6
CA	130 - 170			250 - 450	0,3 - 0,7
CAB	130 - 170	215	55	250 - 450	0,3 - 0,7
CP	130 - 170			200 - 350	0,3 - 0,7
PC	220 - 260	300	90	350 - 650	0,5 - 08
PMMA	150 - 180	245	70	350 - 550	0,4 - 0,8
PPO	240 - 270	300	80	350 - 600	0,5 - 0,8

Bu parametreler kendi içlerinde alt dallara ayrılır ve bir parametrenin değiştirilmesi bütün parametreleri etkiler. Parametre ayarlarının doğru yapılmaması, kalite hataları, fazla enerji sarfiyatı, verimsiz çalışma, fazla veya eksik hammadde kullanımı gibi olumsuz

sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu nedenle doğru enjeksiyon parametreler ile çalışmak son derece önemlidir.

Enjeksiyon parametrelerinin değişimi birbirini etkilemektedir. Enjeksiyon parametreleri belirlenirken öncelikle malzeme ve parça özelliklerine göre vida sıcaklığı seçilir akabinde enjeksiyon hız parametresi ayarlanır ve buna bağlı olarak enjeksiyon basıncı belirlenmiş olur, son olarak zamanlar belirlenir. Yapılan denemeler sonucunda kalite ve proses kontrol edilerek nihai enjeksiyon parametreleri belirlenir.

2.3.3.1. Sıcaklık

Enjeksiyon prosesinde kullanılan hammadde sıcaklığı, hammadde kurutma, kalıp sıcaklığı, vida sıcaklığı, Kalıp soğutma sıcaklıkları gibi birçok farklı alt parametreler bulunmaktadır. Sıcaklı parametresi parça kalitesi ve maliyeti etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle bu parametrelerin ölçülmesi ve doğru ayarlanması büyük önem taşımaktadır.
Sıcaklık parametreleri ayarlanırken hammadde üreticisin hazırlamış olduğu teknik veri dokümanına uygun değerler seçilmesi gerekmektedir. Parça kalitesi ve çevrim sürelerinin optimizasyonu için sıcaklıklar sensörler ile kontrol edilmelidir.

2.3.3.2. Basınç

Plastik hammadde, kalıp boşluğuna malzeme ve parça isterlerine uygun bir basınçta enjekte edilir. Plastik malzemenin kolay şekil değiştirme özellikleri nedeniyle kalıpta verilen şekli koruması için basınç uygulanır.

Enjeksiyon prosesinde basınç kontrolü yapılması gereken 2 bölüm bulunmaktadır, bu bölümler ve kontrol edilmesi gereken basınç parametreleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır,

- Enjeksiyon Ünitesi
    - Enjeksiyon Basıncı
    - Tutma Basıncı
    - Geri Basınç
- Kalıp Kapama Ünitesi
    - Kalıp Kapama Kuvveti

2.3.3.2.1. Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon gözünü doldurmak ve kalıbın son noktasına kadar eksiksiz malzeme ile doldurmak için malzemeye enjeksiyon basıncı uygulanır.

2.3.3.2.2. Tutma Basıncı

Plastik malzemedeki çekmeleri karşılamak ve tam olarak kalıbın şeklini alması için uygulanır.

2.3.3.2.3. Geri Basınç

Kalıpta malzeme dolumu tamamlandıktan sonra kalıp içindeki malzemenin uyguladığı basıncı karşılamak için uygulanır.

2.3.3.2.3. Kalıp Kapama Kuvveti

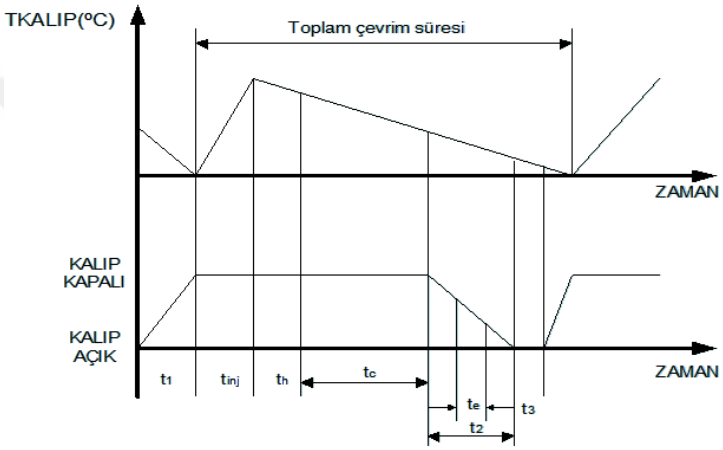
Enjeksiyon makinesi kapama kuvveti, kalıba malzeme doldurmak için uygulanan enjeksiyon basıncını karşılayarak kalıbın açılmasını engeller. Kalıbı kilitleyebilmek ve çapaklanmayı engellemek için enjeksiyon basıncından %15-20 daha yukarıda olduğu kontrol edilmelidir.

Kalıp kapama kuvveti, plastik enjeksiyon makinesi kapasitelerini de belirlemektedir. Bu nedenle kalıp için seçilmesi gereken enjeksiyon makinesi için önemli bir parametredir.

2.3.3.3. Zaman

Enjeksiyon çevrim zamanları aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

- Kalıp açma-kapama zamanı
- Doldurma süresi
- Tutma süresi
- Soğutma süresi
- Kalıptan çıkarma süresi



Simge	Açıklama
t_1	Kalıp Kapanma Süresi
t_{inj}	Enjeksiyon Süresi
t_h	Enjeksiyon Tutma Süresi
t_c	Soğutma Süresi
t_2	Kalıp Açılma Süresi
t_e	Parça Çıkarma Süresi
t_3	Kalıp Açık Kalma Süresi

Şekil 2.8. Plastik enjeksiyon çevrim zamanları

2.3.3.4. Hız

Hız parametresi enjeksiyon hızı ve vida dönme hızı olarak ikiye ayrılır.

2.3.3.4.1. Enjeksiyon Hızı

Kalıbı doldurmak için vidadan gelen hammaddenin hızıdır. Plastiğin katılaşmadan kalıbı doldurması ve iyi bir yüzey kalitesi için enjeksiyon hızının doğru seçilmesi son derece önemlidir. Parça et kalınlığı, hammadde özellikleri gibi değişkenler göz önünde bulunarak enjeksiyon hızı ayarlanır.

2.3.3.4.1. Vida Dönme Hızı

Plastiğin ergitilmesi için gereken sıcaklığın bir kısmı vida dönmesi ile oluşan sürtünme enerjisidir. Makine ve vida ömrünün uzatmak için baskı süresine uygun en düşük sıcaklıklar seçilir.

2.4. Plastiklerde Çekme

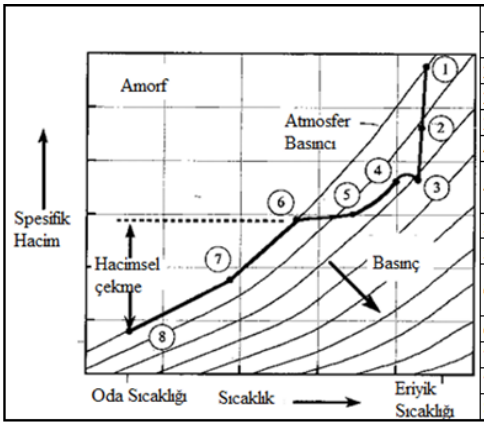
Eriyik plastik doğası gereği soğuma ile büzülmektedir. Malzeme veri sayfasında belirtilen çekme oranı aralığı kadar parça boyutları değişebilmektedir.

AMORF		YARI KRİSTALİN	
ISO Sembolü	Kalıpta Çekme Oranı %	ISO Sembolü	Kalıpta Çekme Oranı %
ABS	0,4 - 0,7	PE	1-3
PS	0,3 - 0,6	PE	1,5 - 4
SB	0,3 - 0,6	PP	1 - 2,5
SAN	0,4 - 0,6	PA66	1,2 - 2,5
CA	0,3 - 0,7	PA6	0,8 - 2
CAB	0,3 - 0,7	PA610	0,8 - 2
CP	0,3 - 0,7	POM	1,5, - 3,5
PC	0,5 - 0,8	PBTP	1,2 - 2,8
PMMA	0,4 - 0,8	PETP	1,2 - 2
PPO	0,5 - 0,8	FEP	3,5 - 5

Şekil 2.9. Amorf ve yarı kristalin malzemelerin çekme oranları

$$S_L = \frac{L_K - L_P}{L_P} \tag{2.1}$$

Bu formülde, S_L çekme oranını, L_K kalıptaki uzunluk, L_P ise parçadaki uzunluğu ifade etmektedir.



1	Plastiğin kalıba girişi – atmosferik basınç
1-2.	Kalıp gözünün doldurulması
2.	Kalıp gözünün tamamen dolduğu an
2-3.	Ütüleme fazı
3.	Tutma basıncına geçiş.
4.	Tutma basıncı fazı başlangıcı
4-5.	Kalıptaki soğuma ve katı tabaka kalınlıklarının artması sonucu basınç düşüşü. Özgül hacimdeki küçülmeyi karşılayacak malzeme beslemesi devam etmektedir.
5.	Yolluk girişinin donması ile malzeme akışının durması,tutma fazının sonu
5-6.	Parçanın soğuması ve çekmesi sonucu basınç düşüşü
6.	Atmosferik basınça düşülmesi,parça boyutları kalıp boyutlarına eşit. Kalıpta çekmenin başlangıcı
6-7.	Kalıpta sabit basınç altında soğuma
7.	Kalıbın açılması, parçanın düşürülmesi
7-8.	Kalıp dışında ortam şartlarında soğuma
8	Parçanın son hacmine erişmesi

Şekil 2.10. Hacim-basınç-sıcaklık diyagramı üzerinde enjeksiyon çevrimi ve çekme

Plastik enjeksiyon prosesinde çekme oranını etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

- Kalıp ve eriyik sıcaklıkları
- Ütüleme ve tutma basınçları
- Kristalleşme
- Soğutma hızı / parça et kalınlığı
- Nem Absorpsiyonu
- Akış yönü
- Malzeme katkıları

2.5. Plastik Enjeksiyon Kalite Hataları

Plastik enjeksiyon işleminde istenilen ölçü ve özelliklerde parça alınamadığı durumlarda parça ıskartaya ayrılmaktadır. Bu hatalar, kalıp tasarımı, enjeksiyon parametresi ve operatör kaynaklı olarak meydana gelebilmektedir.

Plastik enjeksiyon prosesinde görülen enjeksiyon hataları aşağıda listelenmiştir;

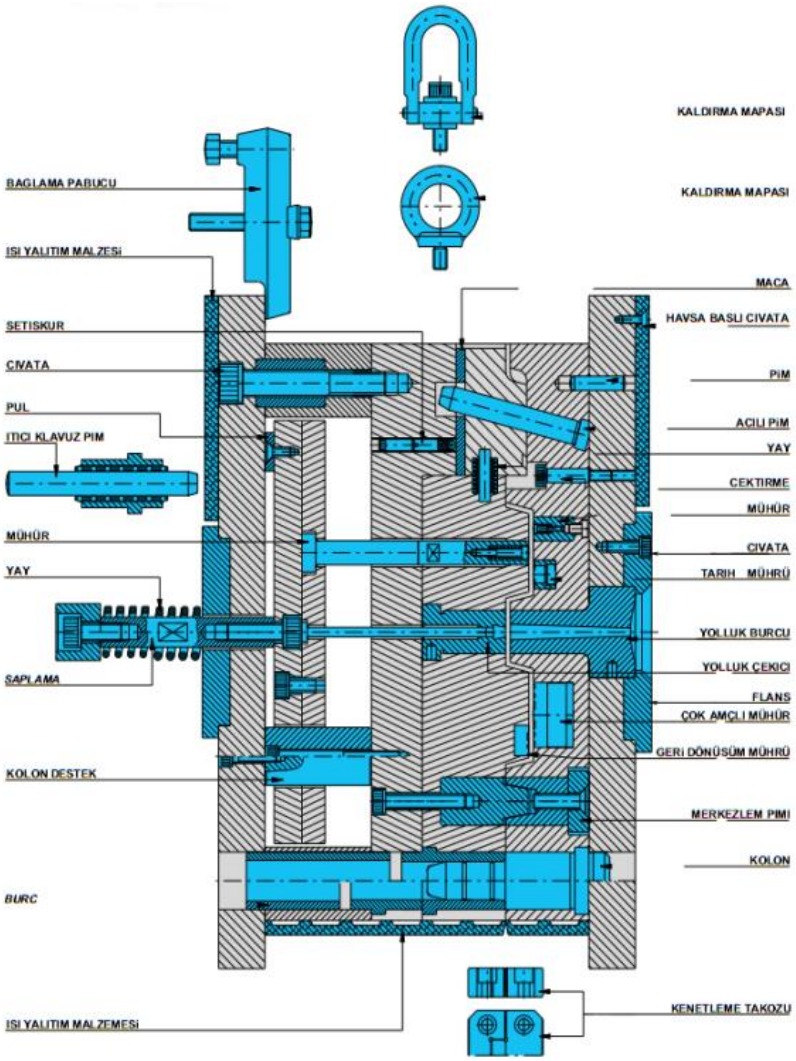
- Eksik Enjeksiyon
- Çarpılma
- Çapak
- Çöküntü
- Birleşme yeri izi
- Kırılma, çatlama

- Parçanın kalıptan çıkmaması
- Parçada akış izleri görülmesi
- Parçada bölgesel yanmalar
- Kabuk şeklinde soyulma
- Bozuk yüzey kalitesi

2.6. Plastik Enjeksiyon Kalıpları

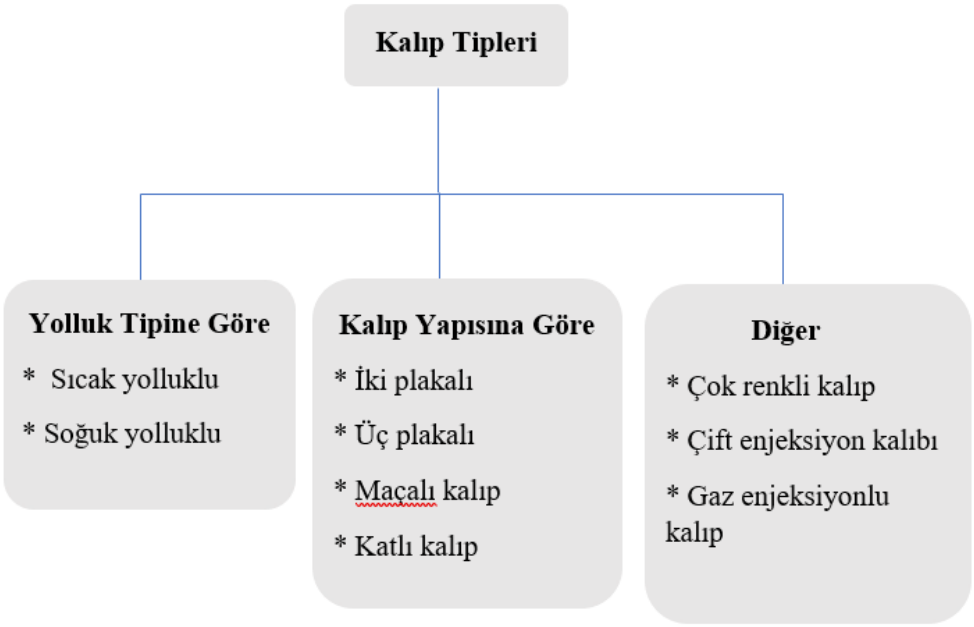
Plastik enjeksiyon kalıbı, eriyik halde bulunan plastik hammaddeye gerekli kalite şartlarında şekil verdikten sonra katılaştırma fonksiyonunu yerine getiren hacim kalıbı tipindeki takımlardır.

Plastik enjeksiyon kalıbı temel fonksiyonları, kalıbın doldurulması, eriyik plastiğin donması ve parçanın kalıptan çıkarılmasıdır.



Şekil 2.11. Plastik enjeksiyon kalıp bileşenleri

Plastik enjeksiyon kalıpları, yolluk tipine göre, kalıp yapısına göre diğer olarak gruplandırılır.



Şekil 2.12. Plastik enjeksiyon kalıp tipleri

2.7. Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçimi

İmalatı yapılacak ürünün boyut, ağırlık, tasarım, kullanılan hammadde vb. değişkenlere göre kalıp boyutu ve özellikleri değişir. Kalıba uygun plastik enjeksiyon makinası seçimi üretilebilirlik, verimlilik ve kalitesel beklentiler nedeniyle son derece önemlidir.

Plastik enjeksiyon makinesine kalıbın bağlanabilirliğinin belirlenmesi için aşağıdaki kriterler göz önüne alınmalıdır.

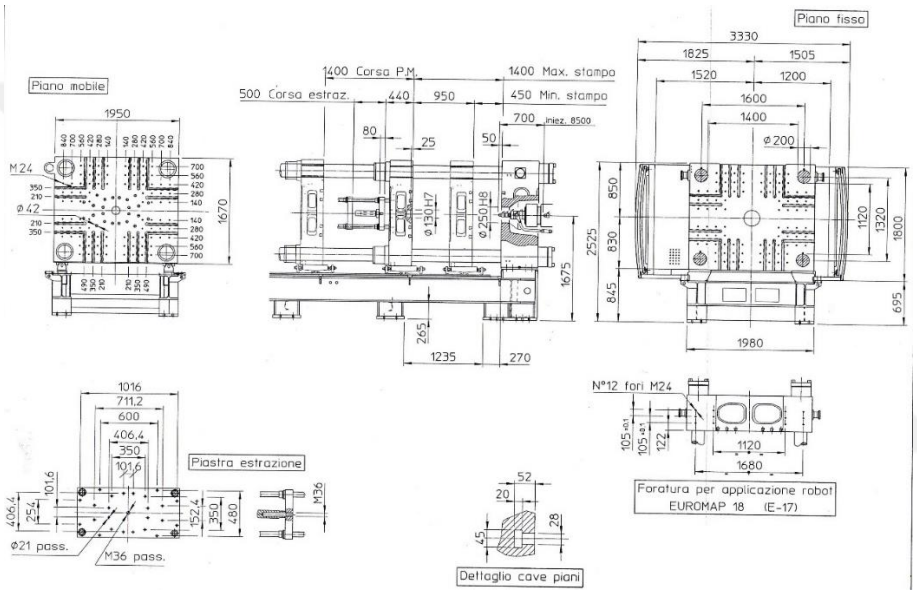
- Enjeksiyon makinesi baskı hacmi
- Kolon aralığı
- Plastik enjeksiyon makinesi kapama kuvveti
- Plastik enjeksiyon makinesi maksimum mengene açılma, itici vurma, strok mesafesi
- Kalıp tipine uygunluk

2.7.1. Enjeksiyon Makinesi Baskı Hacmi

Plastik enjeksiyon makinesinin bir çevrimde kalıba enjekte edebileceği maksimum eriyik hammadde miktarıdır. Gerekli eriyik miktarını belirlerken kalıp göz sayısı ve yolluk ağırlıkları da dikkate alınmalıdır.

2.7.2. Kolon Aralığı

Kalıbın mengene üzerinde bağlandığı kalıp montaj alanıdır. Kalıbın makineye bağlanabilmesi için kolon aralığının kalıp boyutundan küçük olmamalıdır.



Şekil 2.13. 1400 ton kapama kuvvetine sahip makine ölçüleri

2.7.3. Plastik Enjeksiyon Makinesi Maximum Kapama Kuvveti

Kalıba eriyik malzeme enjeksiyonu ve tutma basınçlar esnasında oluşan basıncı karşılayıp kalıbın açılmasını engelleyen mengene kuvvetidir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

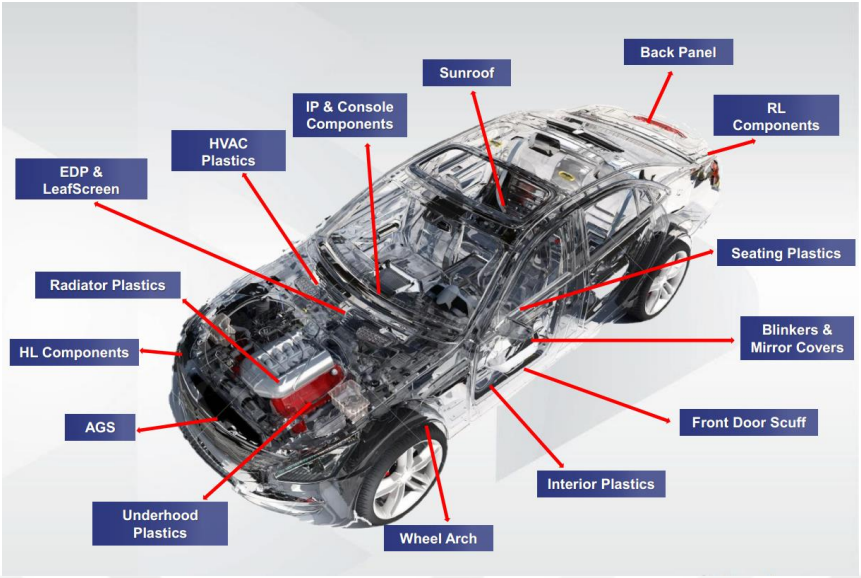
3.1. Çalışma Yapılan İşletmenin Tanıtımı

Bu çalışma, 2005 yılında Bursa'da kurulan otomotiv sektörü için plastik parça imalatı yapan bir sanayi tesisinde yapılmıştır.



Şekil 3.1. Tesise ait görsel

İşletmede, kapama kuvveti 500 kN ile 23000 kN aralığında değişen otuz yedi adet hidrolik, bir adet elektrikli enjeksiyon makinesi ve iki adet alüminyum kaplama makinası bulunmaktadır. Geleneksel plastik enjeksiyon, Bi-enjeksiyon, T-enjeksiyon ve spin enjeksiyon yöntemleri ile üretim yapılmaktadır. İşletmede, yıllık altı bin ton plastik hammadde kullanılmakta ve kırk milyon referans üretilmektedir.



Şekil 3.2. Tesiste üretimi yapılan ürün grupları

3.2. Tesiste Üretilen Referansların Gruplandırılması

Tesiste üretilen ürün grupları aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır.

- Far gövde parçaları



Şekil 3.3. Örnek far gövde referansları

- Küçük aydınlatma parçaları



Şekil 3.4. Örnek küçük aydınlatma referansları

- Optik parçalar
- İç trim Parçalar



Şekil 3.5. Örnek iç trim referansları

- Fan grubu



Şekil 3.6. Örnek fan referansları

- Klima Parçaları
- Kaput altı parçalar
- Çamurluk
- Çift enjeksiyon parçalar



Şekil 3.7. Örnek çift enjeksiyon referansları

3.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi Elektrik Tüketimi Ölçümü

İşletmede bulunan her bir enjeksiyon makinesi, kaplama makinesi, chiller soğutma gurubuna ait elektrik tüketimleri sayaç vasıtasıyla ölçülerek Doruk Otomasyon sistemine aktarılmaktadır. Otomasyon sistemi sayaçtan okuduğu değerleri, vardiya operatör, tarih, bakım, duruşlar gibi durumlara göre sınıflandırarak verileri tutmaktadır. Bu sayede elektrik tüketim verilerine, saatlik, iş emrine göre, üretilen referansa göre, gibi durumlar için ayrı ayrı ulaşılabilmektedir. Ayrıca makinelerin duruş esnasındaki tüketimleri de ölçülerek net elektrik tüketimi verilerine ulaşılabilmektedir.

Bu çalışmada sadece enjeksiyon işleminde harcanan elektrik enerjisi değerleri analiz edilmiş olup, soğutma, ısıtma ve diğer tüketim değerleri dikkate alınmamıştır.

3.4. Elektrik Tüketim Değerlerinin Analizi

Otomasyondan çekilen elektrik tüketim değerleri sınıflandırılarak analiz edilmiştir. Elde edilen verilerden aykırı değerler çıkartılarak üretim yapılan kalıpların ortalama elektrik tüketimleri, enjeksiyon makinelerinin elektrik tüketim ortalamaları hesaplandı. Aykırı veriler 80/20 pareto analizi uygulanarak ayıklandı.

Aynı kalıbın farklı enjeksiyon makinesinde basılması, simetrik veya ikiz kalıp ile parça basılması durumlarına göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca ürün grupları sınıflandırılarak ortalama değer elde edilmiştir.

Üretim yapılan referansların kilogram başına elektrik tüketimi hesaplandı ve ürün grupları sınıflandırılarak kendi içlerinde karşılaştırılarak, ortalama tüketim değerlerine göre kalıp enerji tüketimleri karşılaştırıldı. Her makinenin kendine has enerji profili olduğu için aynı makinedeki kalıplar arasında karşılaştırma yapıldı.

3.5. Plastik Enjeksiyon Makinesi Elektrik İhtiyaç Bilgileri

Hidrolik tip enjeksiyon makinelerinde, elektrikli motor, makine ısıtıcıları, kalıp ısıtıcıları, robot, diğer grup elektrik tüketimi yapan ekipmanlar için elektrik ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca kalıp soğutması için soğutma suyuna ihtiyaç bulunmaktadır.

Çizelge 3.1. 11000 kN kapasiteli plastik enjeksiyon makinesi enerji ihtiyacı

ENERJİ İHTİYAÇ BİLGİLERİ									
Voltaj	ELEKTRİK MOTOR 1	ELEKTRİK MOTOR 2	MAKİNE ISI	KALIP ISI GRUP	ROBOT	HİDROLİK SİSTEM YAĞI	HİDROLİK YAĞLAMA YAĞI	PNÖMATİK	SOĞUTMA
380 V	75 KW	55 KW	1.GRP 68 2.GRP 10 KW	24 ÇIKIŞ	10 KW	SHELL TELLUS 46 1800 L	SHELL 68 10 L	6 BAR	234500 KJ/h

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Her bir makinenin elektrik tüketimlerini ölçen sayaçlardan okunan 9 aylık elektrik tüketim verileri aylık ve saatlik veriler olarak otomasyon sisteminden çekilmiştir. Elde edilen verilen verilere pareto analizi uygulanarak aykırı veriler çıkartılarak, kalıp ve makinelerin ortalama elektrik tüketimleri hesaplandı.

Elektrik tüketimini etkileyen faktörlerin etkilerinin analiz edilebilmesi için aynı şartlarda oluşan elektrik tüketim senaryoları üzerinde analiz yapıldı. Kalıpların aylık olarak saatlik tüketimleri, enjeksiyon makinesi aylık ortalama tüketimlerinin yanında, aşağıdaki gibi farklı senaryolar için analizler yapılarak çeşitli faktörlerin elektrik tüketimine etkisi araştırıldı.

- Aynı kalıp ile faklı enjeksiyon makinesinde üretim yapılması
- Simetrik veya benzer tasarıma sahip parçalara ait kalıplar ile üretim yapılması
- Ürün gruplarının sınıflandırılarak karşılaştırılması
- Aynı parçaya ait yapılan yedek kalıpların elektrik tüketimlerinin karşılaştırılması

Üretimi yapılan parçaların kilogram başına enerji tüketimi hesaplandı ve ürün grupları kendi içlerinde sınıflandırılarak kalıpların enerji tüketimleri belirlendi.

4.1. Enjeksiyon Makinelerinin Enerji Tüketim Profilleri

Her enjeksiyon makinesinin kendine ait bir elektrik tüketim profili bulunmaktadır. Dış faktörlerin etkisinin ölçülmesi ve kalıp bazlı elektrik tüketimlerinin karşılaştırılabilmesi için öncelikli olarak işletmedeki enjeksiyon makinelerinin elektrik profilleri ölçüldü.

Çizelge 4.1. Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerine ait teknik bilgiler

Makine	Kapama Kuvveti (kN)	Tip	ELEKTRİK MOTOR 1 (kW)	ELEKTRİK MOTOR 2 (kW)	MAKİNE ISITICI (kW)	KALIP ISI GRUP	ROBOT (kW)
100 Ton	1000	Elektrikli	-	-	12	Var	-
120 Ton-1	1200	Hidrolik	15	-	10	-	-
120 Ton-2	1200	Hidrolik	15	-	10	-	-
120 Ton-3	1200	Hidrolik	15	-	10	Var	-
120 Ton-4	1200	Hidrolik	15	-	10	Var	-
120 Ton-5	1200	Hidrolik	15	-	10	Var	-
180 Ton	1800	Hidrolik	25	-	15	Var	-
250 Ton	2500	Hidrolik	30	-	22,8	-	-
300 Ton-1	3000	Hidrolik	37	-	25	Var	8
300 Ton-2	3000	Hidrolik	37	-	25	Var	8
350 Ton-1	3500	Hidrolik	55	-	25+10	Var	8
350 Ton-2	3500	Hidrolik	55	-	25+10	Var	8
400 Ton	4000	Hidrolik	37	-	25	-	-
500 Ton-1	5000	Hidrolik	55	-	31	Var	8
500 Ton-2	5000	Hidrolik	55	-	31	Var	8
600 Ton-1	6000	Hidrolik	55	-	54	Var	8
600 Ton-2	6000	Hidrolik	55	-	54	Var	8
1300 Ton	13000	Hidrolik	75	55	50	Var	8
1400 Ton-1	14000	Hidrolik	75	55	50	Var	10
1400 Ton-2	14000	Hidrolik	75	55	50	Var	10
1400 Ton-3	14000	Hidrolik	75	55	50	Var	10
1800 Ton	18000	Hidrolik	75	55	55	Var	10
2000 Ton	20000	Hidrolik	90	75	98	Var	10
2300 Ton-1	23000	Hidrolik	132	132	98	Var	10
2300 Ton-2	23000	Hidrolik	132	132	98	Var	10

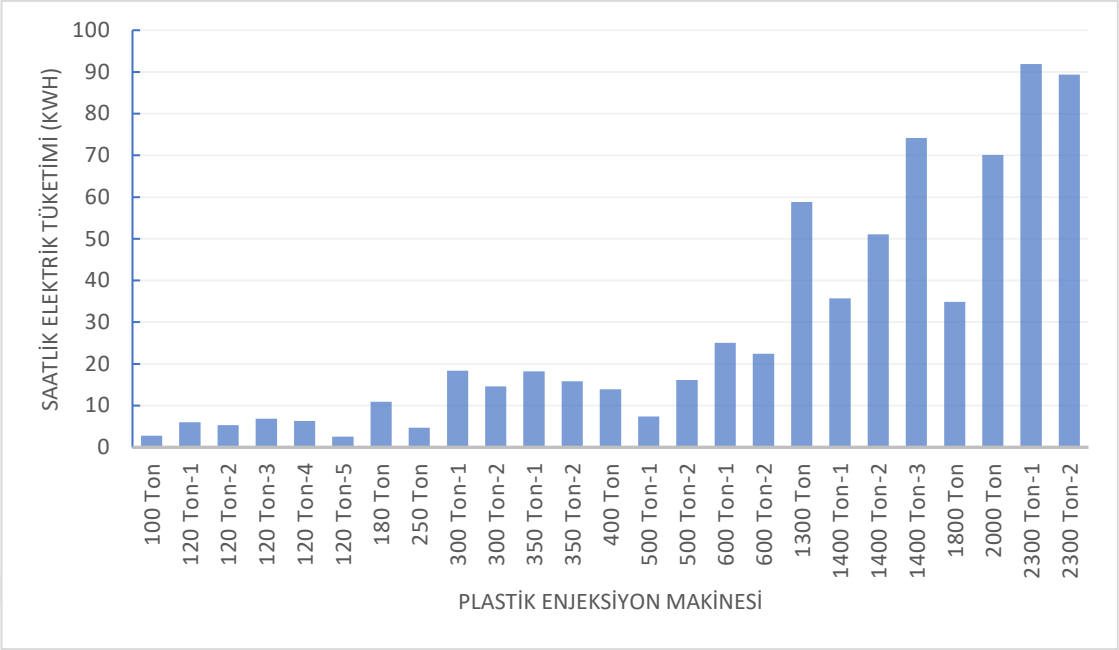
Enjeksiyon makineleri kapasitelerine göre sınıflandırılmıştır. Enerji tüketimleri karşılaştırılırken makine kapasiteleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.2. Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerine ait aylık elektrik tüketimleri

Makine	2023 Eylül Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2023 Ekim Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2023 Kasım Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2023 Aralık Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2024 Ocak Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2024 Şubat Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2024 Mart Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2024 Nisan Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2024 Mayıs Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh)	2023 Ekim-2024 Mayıs Ortalama (kWh)
100 Ton	3,01	2,91	2,57	3,13	3,03	2,66	2,74	2,57	2,69	**2,76**
120 Ton-1	6,00	6,40	4,55	6,38	5,58	6,00	6,00	6,17	5,90	**6,01**
120 Ton-2	5,45	5,79	4,75	5,41	4,75	5,41	5,28	5,15	5,39	**5,32**
120 Ton-3	6,46	7,43	6,41	6,96	6,58	6,91	6,90	6,92	6,93	**6,85**
120 Ton-4	6,36	6,14	4,86	6,69	5,67	6,14	6,83	6,59	6,89	**6,35**
120 Ton-5	2,54	2,63	2,42	2,58	2,56	2,47	2,61	2,49	2,57	**2,55**
180 Ton	11,01	10,96	9,35	11,26	10,94	11,01	11,35	10,47	11,15	**10,94**
250 Ton	3,67	3,63	2,70	3,80	6,34	5,70	4,95	4,95	5,19	**4,68**
300 Ton-1	17,41	18,56	17,15	18,77	19,64	19,05	18,27	17,76	18,50	**18,39**
300 Ton-2	14,09	13,33	11,80	16,12	12,48	15,66	15,51	14,67	14,90	**14,61**
350 Ton-1	20,21	18,74	16,96	17,81	18,80	18,36	19,09	17,67	17,01	**18,18**
350 Ton-2	15,30	18,38	13,22	17,92	13,91	18,44	15,13	16,53	14,67	**15,82**
400 Ton	16,00	13,82	13,01	13,45	13,33	13,41	15,14	16,58	14,24	**13,91**
500 Ton-1	7,96	7,22	7,07	7,87	6,47	7,16	7,06	7,90	7,92	**7,42**
500 Ton-2	16,42	15,90	14,88	15,59	15,57	16,43	16,79	16,88	15,20	**16,14**
600 Ton-1	25,08	23,78	24,25	24,36	22,45	24,19	25,57	25,95	26,05	**25,01**
600 Ton-2	22,65	22,66	22,71	22,38	21,73	22,72	22,57	22,96	20,99	**22,42**
1300 Ton	61,15	61,81	55,74	60,28	56,01	63,74	59,84	55,83	55,45	**58,85**
1400 Ton-1	47,20	46,07	34,91	31,22	27,55	32,41	32,26	31,80	30,70	**35,68**
1400 Ton-2	54,07	50,06	47,04	46,47	48,12	52,81	53,02	52,85	48,86	**51,05**
1400 Ton-3	64,37	69,09	76,63	72,01	76,48	71,76	78,52	74,86	88,53	**74,18**
1800 Ton	37,74	30,93	32,17	35,47	32,51	36,42	37,80	34,49	38,10	**34,91**
2000 Ton	64,17	66,71	63,26	64,66	65,20	72,47	76,83	74,54	74,26	**70,10**
2300 Ton-1		79,33	88,43	93,22	92,76	94,93	91,14	94,43	92,29	**91,92**
2300 Ton-2		89,23	82,04	93,90	79,89	95,23		100,40	85,94	**89,34**

Makine verileri ve elde edilen veriler analiz edildiğinde saatlik elektrik tüketiminin makine kapasitesi ile orantılı olduğu ancak belirli makinelerde daha düşük veya aynı kapasiteli olmasına rağmen yüksek enerji tüketimi olduğu görülmüştür.

Bazı makinelerde, saatlik elektrik tüketimlerinin aylık ortalamalarının dalgalı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum makinede çalışan kalıpların değişmesi veya makinede ortaya çıkan bir problem kaynaklı olabilir. Aylık enerji tüketimleri incelenerek kestirimci bakım uygulaması yapılabilir.



Şekil 4.1. Çalışma yapılan enjeksiyon makinelerinin ortalama saatlik elektrik tüketimi

Elde edilen veriler analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Elektrik ihtiyacı aynı olan 1200 kN kapama kuvveti kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin, 2,55 kWh ile 6,85 kWh arasında değiştiği, saatlik tüketimi en yüksek olan makine ile saatlik tüketimi en düşük makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında % 168'lik bir fark olduğu görülmüştür.

- Elektrik ihtiyacı aynı olan 3000 kN kapama kuvveti kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin, 14,61 kWh ile 18,18 kWh arasında değiştiği, saatlik tüketimi en yüksek olan makine ile saatlik tüketimi en düşük makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında % 24'lük bir fark görülmüştür.

- Elektrik ihtiyacı aynı olan 5000 kN ile 6000 kN kapama kuvveti kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin, 7,42 kWh ile 22,42 kWh arasında değiştiği, saatlik tüketimi en yüksek olan makine ile saatlik tüketimi en düşük makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında % 202'lik bir fark olduğu görülmüştür.

- Elektrik ihtiyacı aynı olan 13000 kN ile 14000 kN kapama kuvveti kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin 35,68 kWh ile 74,18 kWh arasında değiştiği, saatlik tüketimi en yüksek olan makine ile saatlik tüketimi en düşük makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında % 108'lik bir fark olduğu görülmüştür.

- Elektrik ihtiyacı aynı olan 23000 kN kapama kuvveti kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin 91,92 kWh ile 89,34 kWh arasında değiştiği, saatlik tüketimi en yüksek olan makine ile saatlik tüketimi en düşük makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında % 3'lük bir fark olduğu görülmüştür.

Beklenenin dışında ortaya çıkan saatlik tüketim sonuçlarının sebepleri birçok farklı etkene bağlı olduğu göz önüne alındığında kök sebebi bulmak için benzer şartlarda oluşan tüketimlerin analizi yapıldı.

4.2. Aynı Kalıbın Farklı Makinelerde Çalıştırılması

Enjeksiyon makinesi saatlik elektrik tüketimi, kalıp parametresi, hammadde tipi, kalıp tasarımı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Enerji tüketiminde makine etkisini görebilmek için aynı kalıbın farklı makinelerde üretim yapıldığı senaryolar karşılaştırıldı.

4.2.1. Kalıbın Aynı Kapasite ve Aynı Elektrik İhtiyacına Sahip Makinelerde Çalıştırılması

Makine enerji profilinin elektrik tüketimine etkisini karşılaştırabilmek için kalıbın aynı kapasite ve özelliklerdeki makinelerdeki makinelerde tükettiği saatlik enerji değeri karşılaştırıldı.

Çizelge 4.3. 1200 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)
3. stop gövde	120 Ton-1	5,48	6,01	53,71
3. stop gövde	120 Ton-5	2,29	2,55	51,28
Sis lambası	120 Ton-3	6,03	6,85	41,35
Sis lambası	120 Ton-5	2,60	2,55	31,04
Lens Kalıbı	120 Ton-4	7,80	6,35	37,15
Lens Kalıbı	120 Ton-5	2,61	2,55	42,78

3. stop gövde kalıbı ve lens kalıbının saatlik elektrik tüketimlerinin ortalama makine saatlik elektrik tüketimi ile uyumlu, çevrim sürelerinin de kendi aralarında uyumlu olduğu görülmüş, sis lambası kalıbı için çevrim sürelerinin uyumsuz ancak saatlik elektrik tüketimlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Veriler analiz edildiğinde aynı kapasiteli makinelerin saatlik elektrik tüketimi arasında %198'e varan farklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı kapasiteli makinelerde oluşan bu farkın kök nedeni bulunarak enerji tasarrufu sağlanabilir.

Çizelge 4.4. 3500 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)
Hvac-Kapı Sağ	350 Ton-1	20,85	18,18	39,38
Hvac-Kapı Sağ	350 Ton-2	14,81	15,82	43,09
Hvac-Kapı Sol	350 Ton-1	19,21	18,18	48,23
Hvac-Kapı Sol	350 Ton-2	15,32	15,82	44,73

Hvac- kapı sağ ve sol kalıplarının, saatlik elektrik tüketiminin makine ortalama saatlik tüketimi ile uyumlu, çevrim sürelerinin de kısmen uyumlu olduğu görülmüştür. Benzer şartlarda üretim yapılan farklı makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında %40,7'e varan farklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı kapasiteli makinelerde oluşan bu farkın kök nedeni bulunarak enerji tasarrufu sağlanabilir.

Çizelge 4.5. 5000 kN ve 6000 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)
Şeffaf Bıçak Tutucu-1	500 Ton-1	5,25	7,42	127,66
Şeffaf Bıçak Tutucu-1	500 Ton-2	18,54	16,14	122,68
Şeffaf Bıçak Tutucu-2	500 Ton-1	5,86	7,42	117,32
Şeffaf Bıçak Tutucu-2	500 Ton-2	17,03	16,14	129,32
Şeffaf Bıçak Tutucu-3	500 Ton-1	6,61	7,42	134,59
Şeffaf Bıçak Tutucu-3	500 Ton-2	11,09	16,14	152,60
Şeffaf Bıçak Tutucu-4	500 Ton-1	5,87	7,42	181,67
Şeffaf Bıçak Tutucu-4	500 Ton-2	11,32	16,14	190,09
Üst Çerçeve	600 Ton-1	28,31	25,01	40,98
Üst Çerçeve	600 Ton-2	23,48	22,42	42,99
Işık Klavuzu Taşıyıcı	600 Ton-1	31,72	25,01	55,28
Işık Klavuzu Taşıyıcı	600 Ton-2	24,88	22,42	52,11
Braket	600 Ton-1	25,71	25,01	48,24
Braket	600 Ton-2	22,79	22,42	44,88

5000 kN kapasiteli makinede üretimi yapılan şeffaf bıçak kalıplarının saatlik elektrik tüketimleri ile makine saatlik elektrik tüketim ortalamalarının uyumsuz, çevrim sürelerinin ise kısmen uyumsuz sonuçlar verdiği görülmüştür.

6000 kN kapasiteli makinelerde üretimi yapılan üst çerçeve ve braket kalıplarının saatlik elektrik tüketimleri ile makine ortalamalarının uyumlu çevrim sürelerinin de uyumlu sonuç verdiği ancak ışık kılavuzu kalıbının çevrim sürelerinin kısmen uyumsuz sonuçlar verdiği görülmüştür.

Benzer şartlarda üretim yapılan farklı makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında %253,1'e varan farklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Benzer enerji ihtiyacına sahip makinelerde oluşan bu farkların kök nedeni bulunarak enerji tasarrufu sağlanabilir.

Çizelge 4.6. 13000 kN ve 14000 kN kapasiteli makinelerde aynı kalıbın farklı makinede çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)
Vites Çevresi Sol	1400 Ton-2	52,49	51,05	49,58
Vites Çevresi Sol	1400 Ton-3	55,27	74,18	51,64
Yolcu Alt Çerçeve Sol	1400 Ton-2	63,71	51,05	54,84
Yolcu Alt Çerçeve Sol	1400 Ton-3	95,60	74,18	57,30
Arka Stop	1400 Ton-2	47,49	51,05	68,95
Arka Stop	1300 Ton	61,40	58,85	66,75

Vites çevresi sol kalıbının saatlik elektrik tüketiminin makine ortalamasına göre uyumsuz, çevrim sürelerinin ise uyumlu olduğu görülmüştür. Yolcu alt çerçeve sol kalıbının saatlik elektrik tüketiminin ortalama makine saatlik elektrik tüketiminin üzerinde olduğu çevrim sürelerinin ise uyumlu olduğu, arka stop kalıbında ise makine ortalama saatlik tüketimleri ile çevrim sürelerinin uyumlu olduğu görülmüştür.

Benzer şartlarda üretim yapılan farklı makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında %50,1'e varan farklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Benzer enerji ihtiyacına sahip makinelerde oluşan bu farkın kök nedeni bulunarak enerji tasarrufu sağlanabilir.

4.2.2. Kalıbın Farklı Kapasitedeki Makinelerde Çalıştırılması

Farklı kapama kuvveti kapasiteli makinelerin enerji tüketim etkisini karşılaştırabilmek için kalıbın farklı kapasiteli makinelerde çalıştığı durumlar karşılaştırıldı.

Çizelge 4.7. Kalıbın farklı kapasiteli makinelerde çalıştırılması durumundaki saatlik elektrik tüketimleri

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)
İç Trim-1 Sol	100 Ton	2,96	2,76	34,25
İç Trim-1 Sol	250 Ton	4,41	4,68	41,73
İç Trim-2	100 Ton	2,67	2,76	34,98
İç Trim-2	250 Ton	4,64	4,68	33,70
İç Trim-3 Sol	180 Ton	11,24	10,94	33,92
İç Trim-3 Sol	400 Ton	18,33	13,91	34,70
İç trim-4 Sol	180 Ton	12,37	10,94	38,42
İç trim-4 Sol	400 Ton	16,62	13,91	35,66
İç trim-4 Sağ	180 Ton	12,50	10,94	38,21
İç trim-4 Sağ	400 Ton	15,77	13,91	35,64
Çerçeve	500 Ton	16,17	16,14	45,10
Çerçeve	1400 Ton-3	50,32	74,18	47,53
Reflektör	600 Ton-2	21,76	22,42	54,51
Reflektör	1300 Ton	57,73	58,85	51,98
Ön Far Gövde	1400 Ton-2	53,28	51,05	69,97
Ön Far Gövde	2000 Ton	58,58	70,10	69,03
Hvac Gövde	1400 Ton-3	99,44	74,18	59,59
Hvac Gövde	2000 Ton	81,99	70,10	56,89

İç trim-1 sol kalıbının çevrim süreleri kendi aralarında uyumsuz olmasına rağmen çalıştığı makinelerin ortalama saatlik tüketimi ile uyumludur, kalıbın 250 ton hidrolik enjeksiyon makinesinde üretilmesi esnasında saatlik tüketiminin 100 ton elektrikli makineye göre %49 daha fazla olduğu ve çevrim süresinin daha yüksek olduğu görülmüştür. İç trim-2 kalıbının çevrim süresi ve çalıştığı makinelerin ortalama saatlik tüketimleri ile uyumludur, kalıbın 250 ton hidrolik enjeksiyon makinesi esnasında saatlik elektrik tüketiminin 100 ton elektrikli makineye göre %74 daha fazla olduğu ve çevrim süresinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

180 ton ve 400 ton makinelerde çalışan iç trim-3 sol, iç trim-4 sol ve iç trim-4 sağ kalıplarının çevrim süreleri uyumludur, saatlik elektrik tüketimleri ise makinelerin ortalama tüketimlerinden yüksek olmakla birlikte uyumludur. Kalıpların 400 ton kapasiteli enjeksiyon makinesinde üretilmesi esnasında saatlik elektrik tüketiminin,180

ton kapasiteli enjeksiyon makinesine göre % 64, %34 ve %26 daha fazla olduğu ancak çevrim süresinin arttığı görülmüştür.

500 ton ve 1400 ton-3 makinelerde çalışan çerçeve kalıbının çevrim süreleri ile uyumludur, saatlik elektrik tüketimleri 500 ton makinede uyumlu iken 1400 ton kapasiteli makine ortalamasının altındadır. Kalıbın 1400 ton kapasiteli enjeksiyon makinesinde üretilmesi durumunda saatlik elektrik tüketiminin,500 ton kapasiteli enjeksiyon makinesine göre %211 daha fazla olduğu görülmüştür.

600 ton ve 1300 ton makinelerde çalışan reflektör kalıbının çevrim süreleri ve makinelerin ortalama saatlik elektrik tüketimleri ile uyumludur. Kalıbın 1300 ton kapasiteli enjeksiyon makinesinde üretilmesi esnasında saatlik elektrik tüketiminin,600 ton kapasiteli enjeksiyon makinesine göre %165 daha fazla olduğu görülmüştür.

1400 ton-2 ve 2000 ton makinelerde çalışan ön far gövde kalıbının çevrim süreleri uyumlu olup üretim yapılan enjeksiyon makinesinin saatlik elektrik tüketimleri kısmen uyumludur. Kalıbın 2000 ton kapasiteli enjeksiyon makinesinde üretilmesi esnasında saatlik elektrik tüketiminin, 1400 ton-2 kapasiteli enjeksiyon makinesine göre %10 daha fazla olduğu görülmüştür.

Kalıplar, çevrim süresi de dikkate alınarak daha düşük saatlik elektrik tüketimi ile üretim yapılan makinelerde üretim yapılarak enerji tasarrufu yapılabilir. Bu durumda makinelerin doluluğu ve olası çevrim süresi, işçilik süresi vb. maliyet artışlarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

4.3. Simetrik veya Benzer Tasarıma Sahip Kalıpların Elektrik Tüketimlerinin Karşılaştırılması

Eş kalıp veya tasarıma sahip kalıpların saatlik enerji tüketimleri karşılaştırıldı.

Çizelge 4.8. Simetrik ve eş kalıpların enerji tüketim karşılaştırması

Kalıp	Makine	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	Ağırlık (gr)	Göz sayısı
Plastik Pim-1.kalıp	400 Ton	13,48	13,91	59,76	29,00	4
Plastik Pim-2.kalıp	400 Ton	13,34	13,91	60,76	29,00	4
Pervane -1	100 ton	2,76	2,76	25,59	120,00	1
Pervane -2	200 ton	5,59	5,42	28,85	120,00	1

Plastik pim kalıbının aynı tasarıma sahip yedek kalıbı bulunmaktadır. Aynı makinede üretimi yapılan her iki kalıptan çıkan parça ağırlıkları aynıdır. Ölçüm yapılan durumda saatlik elektrik tüketimleri ve çevrim süreleri birbirlerine oldukça yakındır.

Eşlenik kalıbı bulunan pervane kalıbının göz sayısı ve parça ağırlığı aynıdır ancak farklı makinede üretimi yapılmaktadır. Daha önceki bulgular ile paralel olarak 100 ton elektrikli enjeksiyon makinesinin saatlik elektrik tüketiminin %102 daha az olduğu ve çevrim süresinin daha kısa olduğu görülmüştür.

4.4. Kalıp Enerji Tüketimleri

Daha önceki yapılan analizlerde üretim yapılan makinenin enerji profilinin kalıbın saatlik elektrik tüketiminde ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu nedenle karşılaştırma yapılırken aynı makinede üretim yapılan kalıp verilerinin kullanılması daha sağlıklı sonuç verecektir.

Yapılan literatür araştırması ve firma verileri dikkate alındığında kalıp parametreleri, kullanılan hammadde elektrik tüketimini etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Bu kısımda, kalıp tasarımının elektrik tüketimine etkisini araştırmak için aynı makinede çalışan, aynı parça grupları karşılaştırılmış enerji tüketimleri kg hammadde başına elektrik tüketimi ve saatlik elektrik tüketim değerleri üzerinden belirlenmiştir.

Kg hammadde başına elektrik tüketimi hesabı,

Çizelge 4.9. Kg hammadde elektrik tüketimi hesabı

Kg hammadde başına elektrik kullanımı	kWh/kg	E_{kg}
Saatlik elektrik tüketimi	kWh	E_{sa}
Çevrim süresi	s	Çs
Toplam hammadde ağırlığı	kg	m

$$E_{kg} = \frac{E_{sa} * Çs}{m * 3600} \quad (4.1)$$

Far gövde kalıplarının, parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.10. Far gövde kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
Ön Far Gövde-1	1400 Ton-2	PP-TD40	2	0,6	81,80	51,05	42,22	0,80
Ön Far Gövde-2	1400 Ton-2	PP-TD40	2	1,03	73,64	51,05	58,01	0,58
Arka Far Gövde-1	1400 Ton-2	PC+ABS	2	0,53	68,95	51,05	47,49	0,86
Ön Far Gövde-3	1400 Ton-2	PP-TD40	2	0,7	69,97	51,05	53,28	0,74
Ön Far Gövde-4	1800 Ton	PP-TD40	2	1,1	75,15	34,91	36,07	0,34
Ön Far Gövde-5	1800 Ton	PP-TD20	2	0,92	89,06	34,91	37,14	0,50
Ön Far Gövde-6	1800 Ton	PP-TD20	2	0,92	82,16	34,91	37,17	0,46

Far gövde parçası üretimi yapılan 1400 ton-2 ve 1800 ton makinelerinin saatlik enerji tüketim ortalamaları arasında %46'lık fark bulunmaktadır, bu nedenle enerji tüketimleri belirlenirken aynı makinede üretimi yapılan kalıplar değerlendirilmiştir.

Hammadde ağırlığı, kalıp göz sayısı ve çevrim süreleri, kg hammadde başına elektrik tüketimlerinde önemli bir etkendir. 1400 ton-2 makinesinde üretimi yapılan ön far gövde-1 kalıbının saatlik elektrik tüketimi en düşük olmasına rağmen kg hammadde başına elektrik tüketimi konusunda verimsiz gözükmektedir, bu durumun sebebinin

kalıbın baskı sayısının artmasından mütevellit kalıpta daha uzun soğutma süresi gerekmesi ve bunun sonucu olarak yüksek çevrim süresi ile çalışılmasıdır. Ön far gövde-2 kalıbının saatlik elektrik tüketimi en yüksek olmasına rağmen kg hammadde başına elektrik tüketimi en verimli kalıp olduğu görülmüştür. Arka far gövde-1 kalıbı saatlik elektrik tüketimi daha düşük olmasına karşın düşük hammadde ağırlığı nedeniyle kg hammadde başına elektrik tüketimi göz önüne alındığında en verimsiz kalıp olduğu görülmüştür.

1800 ton enjeksiyon makinesinde üretimi yapılan ön far gövde-4 parçası, düşük çevrim süresi ve yüksek parça ağırlığı aynı zamanda düşük saatlik tüketim değerleri nedeniyle en verimli kalıp olduğu görülmüştür. Ön far gövde-5 ve ön far gövde-6 kalıplarında kullanılan hammadde ağırlığı aynı olmasına ve saatlik tüketimlerinin çok yakın olmasına rağmen çevrim süresindeki fark nedeniyle ön far gövde kalıbının daha verimli olduğu görülmüştür.

Saatlik elektrik tüketimi veya kg hammadde başına elektrik tüketimi verilerin tek başına kalıp elektrik tüketimi kıyasında yeterli olmadığı bu nedenle her iki verinin birlikte değerlendirilmesi daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

Kalıp tasarımı aşamasında enerji ihtiyacı ampirik olarak modellenerek veya kalıp akış analizi yapılarak enerji tasarrufuna uygun tasarımlar yapılarak saatlik elektrik tüketimi düşürülebilir.

İç trim kalıplarının, parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.11. İç trim kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
İç Trim-1	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,712	49,58	51,05	52,49	1,02
İç Trim-2	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,711	49,51	51,05	56,20	1,09
İç Trim-3	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,722	54,84	51,05	63,71	1,34
İç Trim-4	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,64	55,22	51,05	65,72	1,57
İç Trim-5	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,478	54,12	51,05	43,45	1,37
İç Trim-6	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,48	53,27	51,05	44,14	1,36
İç Trim-7	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,236	36,20	51,05	51,09	2,18
İç Trim-8	1400 Ton-2	PP Compound	1	0,236	36,10	51,05	51,60	2,19

İç trim kalıplarının enerji tüketimleri analiz edilirken aynı göz sayısına sahip ve bir gözlü kalıplar değerlendirmeye alındı. Benzer ağırlık ve çevrim süresine sahip iç trim-1 ve iç trim-2 kalıplarının saatlik elektrik tüketimlerindeki fark nedeniyle iç trim-1 kalıbının en verimli kalıp olduğu görülmüştür. Yüksek ağırlıkları ve düşük çevrim süreleri ile iç trim-1 ve iç trim-2 kalıpları kg hammadde başına elektrik tüketimi açısında en verimli kalıplar olduğu, iç trim-5 ve iç trim-6 kalıplarının saatlik elektrik tüketimi açısından en verimli kalıplar olduğu görülmüştür. İç trim-3 ve iç trim-4 kalıpları saatlik elektrik tüketimi ve çevrim süreleri en uzun kalıplar olmasına rağmen kg hammadde başına en elektrik tüketimi açısından en verimsiz kalıplar iç trim-7 ve iç trim-8 kalıplarıdır. Üretim ekipleri ile yapılan görüşmede, iç trim-7 ve 8 kalıplarının yedek parça statüsünde olması ve makine dolulukları nedeniyle yüksek kapama kuvveti kapasiteli makinede üretim yapıldığı belirtildi.

Reflektör kalıplarının, parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.12. Reflektör kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
Reflektör-1	120 Ton-3	PC	2	0,036	34,77	7,07	6,85	0,93
Reflektör-2	120 Ton-5	PC/ABS	4	0,036	42,73	2,74	2,55	0,21
Reflektör-3	120 Ton-5	PMMA	4	0,025	53,36	2,41	2,55	0,37
Reflektör-4	300 Ton-1	PBT	2	0,133	43,63	18,39	18,08	0,82
Reflektör-5	300 Ton-1	PBT	2	0,088	44,21	18,39	16,71	1,17
Reflektör-6	300 Ton-1	PC	4	0,096	45,93	18,39	17,34	0,57
Reflektör-7	300 Ton-1	PBT	2	0,108	38,29	18,39	16,44	0,81
Reflektör-8	300 Ton-1	PBT	2	0,099	30,52	18,39	17,75	0,76
Reflektör-9	300 Ton-2	PA66	2	0,073	49,85	14,61	12,59	1,19
Reflektör-10	300 Ton-2	PC	2	0,074	35,83	14,61	14,22	0,96
Reflektör-11	300 Ton-2	PC	2	0,054	36,23	14,61	15,30	1,42
Reflektör-12	300 Ton-2	PC	2	0,094	45,17	14,61	15,86	1,05
Reflektör-13	300 Ton-2	PC	2	0,081	55,02	14,61	15,31	1,44
Reflektör-14	300 Ton-2	PC	2	0,054	35,02	14,61	15,91	1,42
Reflektör-15	300 Ton-2	PEI	2	0,098	37,08	14,61	19,64	1,03
Reflektör-16	300 Ton-2	PC	2	0,043	34,12	14,61	14,83	1,63
Reflektör-17	180 Ton	PBT	2	0,049	34,26	10,94	11,60	1,12
Reflektör-18	180 Ton	PBT	2	0,085	41,36	10,94	11,23	0,76
Reflektör-19	180 Ton	PBT	2	0,080	39,85	10,94	11,01	0,76
Reflektör-20	250 Ton	PC	2	0,063	42,93	4,68	6,70	0,63
Reflektör-21	250 Ton	PBT	2	0,095	54,78	4,68	6,89	0,55
Reflektör-22	600 Ton-1	PC	2	0,137	52,95	25,01	27,31	1,47
Reflektör-23	600 Ton-1	PC	2	0,128	44,74	25,01	27,33	1,32
Reflektör-4	600 Ton-2	PBT	2	0,133	44,72	22,42	21,08	0,98
Reflektör-24	600 Ton-2	PBT	2	0,133	45,31	22,42	21,65	1,02
Reflektör-25	600 Ton-2	PC	2	0,207	51,21	22,42	26,17	0,90
Reflektör-26	600 Ton-2	PC	2	0,147	57,58	22,42	23,77	1,29
Reflektör-27	600 Ton-2	PBT	2	0,170	54,51	22,42	21,76	0,97

Reflektör kalıplarının enerji tüketimleri analiz edilirken, farklı göz sayısına sahip, farklı makine gruplarında üretim yapılan, farklı hammaddelerin kullanıldığı kalıpların enerji profilleri analiz edildi.

Reflektör-2 kalıbı, yüksek göz sayısı, düşük saatlik tüketim değeri ile düşük parça ağırlığına rağmen kg hammadde başına tüketim açısından en verimli kalıp olmuştur. Bu sonucun ortaya çıkmasında enerji tüketim profili düşük olan 120 ton-5 makinesinde üretim yapılmış olmasının etkisi göz ardı edilmemelidir. Aynı makinede üretim yapılan reflektör-3 kalıbı saatlik tüketim olarak en verimli kalıp olmasına rağmen reflektör-2 kalıbın daha düşük çevrim süresi ile çalışması ve daha fazla hammadde kullanılması nedeniyle kg hammadde başına elektrik tüketiminde daha geride kalmıştır.

Reflektör-16 kalıbı düşük çevrim süresi olmasına rağmen, kapasitesine göre yüksek enerji tüketim profiline sahip olan 180 ton makinesinde üretim yapılması ve düşük parça ağırlığının etkisiyle kg hammadde başına elektrik tüketimi konusunda en verimsiz kalıp olmuştur.

600 ton-1 ve 600 ton-2 makinelerinde üretim yapılan kalıplarda makinelerin yüksek saatlik elektrik tüketim profiline sahip olmasına ve yüksek çevrim sürelerine karşın üretim yapılan kalıplarda kullanılan hammadde ağırlığının yüksek olmasıyla kg hammadde başına elektrik tüketimi konusunda 300 ton-1 ve 300 ton-2 makinelerinden daha verimli sonuçlar ortaya çıkmıştır.

İki farklı makinede üretimi yapılan reflektör-4 kalıbı enerji tüketim profili daha düşük olan 300 ton-1 kalıbında % 19 daha verimli çalıştığı görülmüştür.

Çerçeve kalıplarının parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.13. Çerçeve kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
Çerçeve-1	600 Ton-1	PC	2	0,128	40,98	25,01	28,31	1,26
Çerçeve-2	600 Ton-1	PC	2	0,065	57,09	25,01	24,71	3,01
Çerçeve-3	600 Ton-1	PC	2	0,065	48,85	25,01	25,54	2,67
Çerçeve-4	600 Ton-1	PC	2	0,055	50,15	25,01	24,61	3,12
Çerçeve-5	600 Ton-1	PC	2	0,053	52,67	25,01	23,46	3,24
Çerçeve-6	600 Ton-1	PC	2	0,047	45,72	25,01	23,24	3,15
Çerçeve-7	600 Ton-1	PC	2	0,039	46,60	25,01	23,92	3,94
Çerçeve-8	600 Ton-1	PC	2	0,202	54,40	25,01	25,99	0,97

Çerçeve-6 ve çerçeve-7 kalıpların, düşük çevrim süresi ve saatlik elektrik tüketimi açısından en verimli kalıp olmalarına rağmen düşük hammadde ağırlığı nedeniyle kg hammadde başına elektrik tüketimi açısından en verimsiz kalıp olduğu görülmüştür. Çerçeve-8 kalıbı yüksek çevrim süresi ve saatlik elektrik tüketimi değerlerine rağmen yüksek hammadde ağırlığı nedeniyle kg hammadde başına elektrik tüketimi açısından en verimli kalıp olmuştur.

Fan kalıplarının parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.14. Fan kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
Fan-1	300 Ton-1	PP-GF20	2	0,118	30,69	18,39	19,51	0,71
Fan-2	300 Ton-1	PP-GF20	2	0,114	38,71	18,39	23,11	1,09

Benzer tasarıma sahip fan-1 ve fan-2 kalıplarının aynı makinedeki elektrik tüketim verileri arasında % 53'lük bir fark olduğu görülmüştür. Farkın sebebi araştırıldığında kalıp deneme işlemleri nedeniyle böyle bir farkın ortaya çıktığı anlaşılmıştır.
Fan kalıplarının parça ve elektrik tüketim detayları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.15. Çift enjeksiyon hvac kalıplarının elektrik tüketim ve parça detayları

Kalıp	Makine	Hammadde-1	Hammadde-2	Kalıp Göz Sayısı	Parça Ağırlığı (kg)	Çevrim Süresi Ortalaması (sn)	2023 Eylül-2024 Mayıs Makine saatlik Enerji Tüketimi (kWh)	2023 Eylül-2024 Mayıs Kalıp saatlik Enerji Tüketimi	Kg Hammadde Başına Elektrik Tüketimi (kWh/kg)
H-vac-1	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,026	35,92	18,18	18,29	1,75
H-vac-2	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,057	39,38	18,18	20,85	1,00
H-vac-3	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,051	36,50	18,18	17,68	0,88
H-vac-4	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,026	36,55	18,18	18,09	1,77
H-vac-5	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,059	36,89	18,18	22,31	0,97
H-vac-6	350 Ton-1	PP-TD40	TPE	4	0,059	48,23	18,18	19,21	1,09
H-vac-7	350 Ton-2	PP-TD40	TPE	4	0,057	43,09	15,82	14,81	0,78
H-vac-8	350 Ton-2	PP-TD40	TPE	4	0,059	44,73	15,82	15,32	0,80
H-vac-9	350 Ton-2	PP-TD40	TPE	4	0,066	47,24	15,82	19,96	1,00
H-vac-10	350 Ton-2	PP-TD40	TPE	4	0,081	41,21	15,82	17,09	0,61
H-vac-11	350 Ton-2	PP-TD40	TPE	4	0,120	52,26	15,82	22,67	0,68

Çift enjeksiyon yöntemi ile üretimi yapılan dört gözlü h-vac kalıplarının enerji tüketimleri araştırıldı. Düşük ağırlıklar ve yüksek enerji tüketim profiline sahip makinede üretim yapılmasının etkisiyle h-vac-1 ve h-vac-4 kalıpları kg hammadde başına elektrik tüketimi konusunda en verimsiz kalıplar olmuştur. H-vac-7 kalıbı, saatlik elektrik tüketiminin en düşük olmasına karşın kısmen yüksek çevrim süresi ve düşük ağırlık nedeniyle kg hammadde başına elektrik tüketimi konusunda orta sınıfta yer aldığı görülmüştür. H-vac-11 kalıbı en yüksek ağırlığa sahip olmasının karşın yüksek çevrim süresi ve yüksek saatlik elektrik tüketimi nedeniyle enerji verimliliği konusunda olarak h-vac-10 kalıbının arkasında kaldığı görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Günümüz rekabet koşullarına uyum için kaliteden ödün vermeksizin maliyet iyileştirmeleri, sürdürülebilirlik ve sıfır karbon emisyonu hedefleri doğrultusunda enerji tasarrufu son derece önemlidir. Bu çalışmada, yüksek kalitesel etkiye sahip kalıp parametrelerinde değişiklik yapmadan bakım ve kalıp rotasyonu ile enerji tasarruf potansiyeli üzerinde duruldu.

Çalışmada kalıp ve makinelerin saatlik elektrik tüketimleri ölçülerek her bir plastik enjeksiyon makinesinin enerji profili çıkartıldı. Aynı veya daha düşük enerji ihtiyacı olan makinelerin saatlik elektrik tüketimleri arasında %311'e varan farklar olduğu görüldü. Yüksek enerji tüketiminin sebeplerini ortaya çıkartmak için aynı şartlarda üretim yapılan kalıpların elektrik tüketimi karşılaştırıldı. Aynı kalıbın, aynı elektrik ihtiyaçlarına sahip farklı makinelerde üretilmesi durumundaki saatlik elektrik tüketimleri arasında %253'e varan farklar olduğu, bazı makinelerin aynı veya daha düşük enerji ihtiyacı olmasına rağmen daha yüksek saatlik elektrik tüketimi olduğu görüldü. Aynı kalıbın farklı makinelerde üretim yapıldığı senaryoda saatlik elektrik tüketiminin makine enerji profili ile paralel sonuçlar verdiği görüldü ve bu durumun sonucunda her makinenin kendine özgü bir enerji profili olduğu sonucuna varıldı. Makinelerdeki bakım ihtiyaçları, makinedeki enerji harcayan ekipmanların enerji verimi gibi etkenlerin bu sonucun ortaya çıkmasında etkisi olduğu anlaşıldı. Ayrıca saatlik elektrik tüketimlerinin aylık takip edilmesiyle kestirimci bakım planlaması yapılabileceği sonucuna varıldı.

Parça ağırlığı, göz sayısı verilerinin kg hammadde başına elektrik tüketimini ciddi manada etkilediği için kalıpların enerji tüketimleri karşılaştırılırken saatlik enerji tüketimi ve kg hammadde başına elektrik tüketimi beraber değerlendirildi. Kalıbın, daha düşük kapasiteli makinelerde saatlik elektrik tüketiminin düştüğü sonucuna varıldı, ancak bazı durumlarda ortalama çevrim süresinin artması nedeniyle daha düşük saatlik tüketim olmasına rağmen daha verimsiz sonuçların ortaya çıktığı görüldü. Aynı ürün gurubundaki kalıplarda farklı enerji tüketimleri olduğu görüldü. Kalıp tasarım aşamasında, kalıp akış analizi ve ampirik model ile elektrik tüketimi hesaplanabilir ve enerji tasarrufu odaklı tasarım yapılarak elektrik tüketiminde tasarruf sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Mena Ledezma, J., & Posada Correa, J. C. (2023). Definition and evaluation of good manufacturing practices for plastic injection molding. Energy Efficiency, 16(4), 24.

Pacella, M., Mangini, M., & Papadia, G. (2023). Utilizing Mixture Regression Models for Clustering Time-Series Energy Consumption of a Plastic Injection Molding Process. Algorithms, 16(11), 524.

Mohamed, E. G., Ahmed, M., & Redouane, M. (2023, May). Smart Energy Consumption Control System While Respecting the Quality of the Injection Molded Product. In 2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET) (pp. 1-6). IEEE.

Czepiel, M., Bańkosz, M., & Sobczak-Kupiec, A. (2023). Advanced Injection Molding Methods. Materials, 16(17), 5802.

Anonim. Türkiye Plastik Sektörü 2023 Yili 11 Aylik Değerlendirme Bilgi Notu (2023) PAGEV, 2023/11 , 1-8.

Ishihara, M., Hibino, H., & Harada, T. (2020). Simulated annealing based simulation method for minimizing electricity cost considering production line scheduling including injection molding machines. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 14(4), JAMDSM0055-JAMDSM0055.

Rashid, O., Low, K. W. Q., & Pittman, J. F. T. (2020). Mold cooling in thermoplastics injection molding: Effectiveness and energy efficiency. Journal of Cleaner Production, 264, 121375.

Iwko, J., & Wróblewski, R. (2019). Experimental study on energy consumption in the plasticizing unit of the injection molding machine. Industry 4.0, 4(5), 241-243.

Ávila-Cedillo, J., Borja, V., López-Parra, M., & Ramírez-Reivich, A. C. (2019). Energy consumption analysis of ABS plastic parts injected in a hybrid injection moulding machine. International Journal of Sustainable Engineering, 12(2), 115-122.

Elduque, A., Elduque, D., Pina, C., Clavería, I., & Javierre, C. (2018). Electricity consumption estimation of the polymer material injection-molding manufacturing process: Empirical model and application. Materials, 11(9), 1740.

Meekers, I., Refalo, P., & Rochman, A. (2018). Analysis of process parameters affecting energy consumption in plastic injection moulding. Procedia CIRP, 69, 342-347.

Dunkelberg, H., Wagner, J., Hannen, C., Schlüter, B. A., Phan, L., Hesselbach, J., & Lin, C. X. (2018). Optimization of the energy supply in the plastics industry to reduce the primary energy demand. Journal of Cleaner Production, 192, 790-800.

Masato, D., Babenko, M., Shriky, B., Gough, T., Lucchetta, G., & Whiteside, B. (2018). Comparison of crystallization characteristics and mechanical properties of polypropylene processed by ultrasound and conventional micro-injection molding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 113-125.

Iwko, J., Wroblewski, R., & Steller, R. (2018). Experimental study on energy consumption in the plasticizing unit of the injection molding machine. Polimery, 63(5), 362-371.

Matarrese, P., Fontana, A., Sorlini, M., Diviani, L., Specht, I., & Maggi, A. (2017). Estimating energy consumption of injection moulding for environmental-driven mould design. Journal of Cleaner Production, 168, 1505-1512.

Mianehrow, H., & Abbasian, A. (2017). Energy monitoring of plastic injection molding process running with hydraulic injection molding machines. Journal of Cleaner Production, 148, 804-810.

Wen, J. S., Yin, C. H., Jiang, S. C., & Jin, G. (2017). Study of Energy Consumption in the Injection Molding Process. Journal of Macromolecular Science, Part B, 56(8), 553-567.

Tulbure, A., Ciortea, M., Hutanu, C., & Farcas, V. (2016, August). Energy optimization aspects by injection process technology. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 145, No. 2, p. 022038). IOP Publishing.

Schlueter, B. A., & Rosano, M. B. (2016). A holistic approach to energy efficiency assessment in plastic processing. Journal of Cleaner Production, 118, 19-28.

Spiering, T., Kohlitz, S., Sundmaeker, H., & Herrmann, C. (2015). Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 36, 45-59.

Elduque, A., Javierre, C., Elduque, D., & Fernández, Á. (2015). LCI databases sensitivity analysis of the environmental impact of the injection molding process. Sustainability, 7(4), 3792-3800.

Madan, J., Mani, M., Lee, J. H., & Lyons, K. W. (2015). Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. Journal of Cleaner Production, 105, 157-170.

Nur Anis, O. (2015). Sustainable manufacturing: optimization of electrical energy consumption in plastic injection molding process (Doctoral dissertation, Universiti Utara Malaysia).

Li, W., Kara, S., & Qureshi, F. (2015). Characterising energy and eco-efficiency of injection moulding processes. International journal of sustainable engineering, 8(1), 55-65.

Dawson, A. J., Coates, P. D., Collis, R., Owen, L., Owen, D., & Rajamani, H. S. (2004). Injection moulding process assessment by energy monitoring. Plastics, rubber and composites, 33(1), 19-25.

Ribeiro, I., Peças, P., & Henriques, E. (2012). Assessment of energy consumption in injection moulding process. In Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23-25, 2012 (pp. 263-268). Springer Berlin Heidelberg.

Lu, N. Y., Gong, G. X., Yang, Y., & Lu, J. H. (2012). Multi-objective process parameter optimization for energy saving in injection molding process. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 13(5), 382-394.

Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. Renewable and sustainable energy reviews, 15(1), 150-168.

Chen, W. C., Wang, M. W., Chen, C. T., & Fu, G. L. (2009). An integrated parameter optimization system for MISO plastic injection molding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 501-511.

Kanungo, A., & Swan, E. (2008, May). All electric injection molding machines: How much energy can you save. In Proceedings of the 13th Industrial Energy technology Conference, New Orleans, LA.

Thollander, P., Danestig, M., & Rohdin, P. (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. Energy policy, 35(11), 5774-5783.

Thiriez, A., & Gutowski, T. (2006, May). An environmental analysis of injection molding. In Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006. (pp. 195-200). IEEE.

Kelly, A. L., Woodhead, M., & Coates, P. D. (2005). Comparison of injection molding machine performance. Polymer Engineering & Science, 45(6), 857-865.

Worrell, E., Laitner, J. A., Ruth, M., & Finman, H. (2003). Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. Energy, 28(11), 1081-1098.

Wagner, A. H., Yu, J. S., & Kalyon, D. M. (1989). Injection molding of engineering plastics. Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute, 9(1), 17-32.