



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA İÇİN
HAZIRLANAN KOBALT ESASLI
SÜPERALAŞIM BESLEME STOKLARININ
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

EREN GAYRETLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. H. Özkan GÜLSOY

İSTANBUL, 2019

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Eren GAYRETLİ'nin "Toz Enjeksiyon Kalıplama için hazırlanan Kobalt Esaslı Süperalaşım besleme stoklarının reolojik özelliklerinin incelenmesi" başlıklı tez çalışması, 15 Şubat 2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. H.Özkan GÜLSOY

(Danışman)

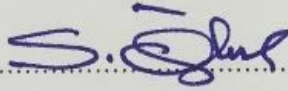
Marmara Üniversitesi



Prof.Dr. Sunullah ÖZBEK

(Üye)

Gedik Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Elif UZUN

(Üye)

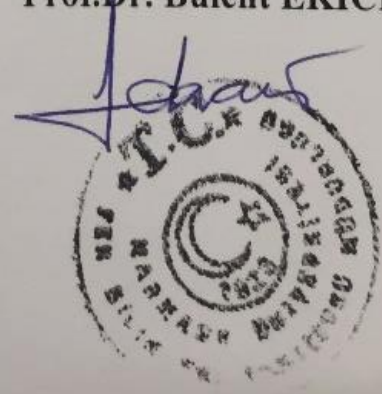
Marmara Üniversitesi



ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ^{20.02.2019} tarih ve ^{2019/05-02} sayılı kararı ile EREN GAYRETLİ'nin Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof.Dr. Bülent EKİCİ





MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA İÇİN
HAZIRLANAN KOBALT ESASLI
SÜPERALAŞIM BESLEME STOKLARININ
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

EREN GAYRETLİ

533316018

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. H. Özkan GÜLSOY

İSTANBUL, 2019

ÖNSÖZ

Yapılan çalışma ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikimi, hoşgörüsünü, tecrübelerini ve özverisini esirgemen, tez danışmanım olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. H. Özkan GÜLSOY'a ,

Çalışmalarım sırasında birlikte çalıştığımız, bilgisinden ve yardımından faydalandığım Dr. Selim HARTOMACIOĞLU ve Semih ÖZBEY'e,

Tezimin tüm aşamaları boyunca her türlü desteğini sürekli yanımda hissettiğim annem, babam, arkadaşlarım ve Dilan Deniz ADIGÜZEL'e

SONSUZ TEŞEKKÜRLERİMİ VE MİNNETLERİMİ SUNARIM.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖNSÖZ	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Amaç	2
2.KOBALT ESASLI S.A TOZLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Süperalaşımın Üretimi	7
2.3. Süperalaşımın Mekanik Özellikleri	9
2.4. Süperalaşımın Uygulama Alanları	11
2.4.1. Demir esaslı süperalaşım	12
2.4.2. Nikel esaslı süperalaşım	12
2.4.3. Kobalt esaslı süperalaşım	14
3. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA	17
3.1. Giriş	17
3.2. Besleme Stoğu Hazırlama	21
3.3. Toz Bağlayıcı Oranı	21
3.4. Enjeksiyon Kalıplama	23
3.5. Bağlayıcı Giderme	24
3.6. Sinterleme	26
3.6.1. Katı Hal Sinterleme	27
3.6.2. Sıvı faz sinterleme	28
3.6.3. Sinterleme parametreleri ve etkileri	31
3.6.4 Son İşlemler ve Kalite Kontrol	33
3.6.5 Toz Enjeksiyon Kalıplama Teknolojisinin Uygulama Alanları	33

3.7. Toz-Bağlayıcı Karışımının Reolojik Özellikleri	41
3.7.1. Temel Reoloji	41
3.7.2. Newtonian Akış Davranışı	43
3.7.3. Newtonian Olmayan Akış Davranışı	45
3.7.3.1. Plastik Akış (Bingham Akış)	45
3.7.3.2. Psödoplastik Akış (Yalancı Plastik Akış)	46
3.7.3.3. Dilatant Akış	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1. Giriş	47
4.2. Malzeme	47
4.3. Cihaz ve Ekipmanlar	51
4.3.1. Toz ve Bağlayıcıların Şekil ve Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi	55
4.3.2. Besleme Stoğunun Hazırlanması	56
4.3.3. Besleme Stoklarının Reometre ile Viskozitelerinin Ölçülmesi	58
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
5.1. Sıcaklıkla değişim	60
5.1.1. 160 °C’de yapılan çalışma	60
5.1.2. 155 °C’de yapılan çalışma	62
5.1.3. 150 °C’de yapılan çalışma	64
5.1.4. 145 °C’de yapılan çalışma	66
5.1.5. 140 °C’de yapılan çalışma	68
5.1.6. 135 °C’de yapılan çalışma	70
5.1.7. 130 °C’de yapılan çalışma	71
5.1.8. Artan sıcaklıklar ile yapılan deneyelere ait sonuçlar	74
6. SONUÇ	77
7.KAYNAKÇA	79

ÖZET

TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA İÇİN HAZIRLANAN KOBALT ESASLI SÜPERALAŞIM BESLEME STOKLARININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kobalt esaslı tozlar günümüz ileri teknoloji süperalaşımaları arasında önemli bir yere sahip olup, yüksek sıcaklık ve yüksek mukavemet gerektiren havacılık, otomotiv gibi sektörlerde kullanılabilen bir malzemedir. Farklı üretim metotları ile üretilebilen kobalt esaslı süperalaşım ürünler endüstrinin birçok alanında yüksek miktarlarda kullanılabilmektedir. Bu üretim metotlarından birisi olan Toz Metalurjisi (TM) üretim teknikleri kobalt esaslı süperalaşım malzemelerin üretiminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Karmaşık şekilli malzemelerin üretiminde Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) tekniği, endüstriyel açıdan oldukça avantajlı bir yöntemidir.

Bu tez çalışmasında, kobalt esaslı süperalaşım tozları ve çeşitli polimer bağlayıcılar besleme stoğu hazırlamak için kullanılmıştır. Hacimce %57.5-65 oranında değişen toz ilaveleri ve polimer bağlayıcılarla karıştırılarak besleme stokları elde edilmiştir. Besleme stoklarının reolojik özelliklerinin incelenmesi için rotasyonel reometre cihazı kullanılarak farklı sıcaklıklarda ölçümleri yapılmıştır. Besleme stokları, TEK için temel gereksinimlerden biri olan psödoplastik akış davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Besleme stoğu ayrıca yüksek toz ilavelerinde sıcaklığa yüksek hassasiyet gösterdiği gözlemlenmiştir.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF COBALT BASED SUPERALLOY FEEDSTOCKS PREPARED FOR POWDER INJECTION MOLDING

Cobalt superalloys has an important place among today's high-tech materials due to resistance to high temperatures and high strength. Superalloys are used commonly aerospace and automotive industry due to this properties. Powder Metallurgy is one of the reliable and efficient production method for this superalloys. Powder Injection Molding (PIM) method is a very advantageous method in terms of industrial in the production of mixed shaped materials.

In this study, cobalt powders and various polymeric binders were used to prepare the feedstock. Feedstocks were investigated regarding to viscosity. Feedstocks were obtained by mixing with volume of 57.5-65% of powder additives and polymer binders. The rheological properties of the feed stocks were measured at different temperatures using a rheometer. Feed stocks exhibit pseudoplastic flow behavior, one of the basic requirements for PIM. The feedstock also exhibits high sensitivity to temperature in high-dust appliances.

SEMBOLLER

D₁₀ : Toz kütlesinin % 10'unun ortalama partikül boyutu

D₅₀ : Toz kütlesinin % 50'sinin ortalama partikül boyutu

D₉₀ : Toz kütlesinin % 90'ının ortalama partikül boyutu

Pa :Pascal

Cp :Santipoise

ρ_{Gy} : Görünür yoğunluk

η : Dinamik viskozite

$\dot{\gamma}$: Kayma hızı (oranı)

τ : Kayma gerilmesi

KISALTMALAR

- CM** : Carnauba Mum
PP : Polipropilen
PM : Parafin Mum
SA : Stearik Asit
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
TEK : Toz Enjeksiyon Kalıplama
EV : Elektron Volt
PIM : Powder Injection Molding
HIP : Hot Isostatic Press
T/M : Toz Metalurjisi
%ağ. : % ağırlık

ŞEKİL LİSTESİ

	SAYFA
Şekil 2.1. Kobaltın genel görünüşü	3
Şekil 2.2. Süperalaşım parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan proseslerin akış şeması	8
Şekil 2.3. Sıcaklığa bağlı olarak değişik malzeme gruplarının 1000 saat zaman dayanımları	11
Şekil 2.4. Nikel esaslı süperalaşımın yapısında önem arz eden elementler	12
Şekil 2.5. Kobaltın kristal yapısı	15
Şekil 3.1. TEK şematik gösterimi	18
Şekil 3.2. TEK metoduyla üretilmiş parçalar/Üretim hacmi ve parça karmaşıklığına bağlı olarak üretim teknolojilerinin uygun oldukları bölgeler	19
Şekil 3.3. Toz ve bağlayıcı durumlarının şematik gösterimi	22
Şekil 3.4. Kritik toz yoğunluğunun bulunması	22
Şekil 3.5. Bağlayıcı gidermede karşılaşılan hatalar	25
Şekil 3.6. Örnek bağlayıcı giderme grafiği	25
Şekil 3.7. Sinterlemede itici güçlere tepki olarak oluşan atom hareketleri	28
Şekil 3.8. Sıvı faz sinterleme tekniğinde meydana gelen mikroyapısal değişimler	29
Şekil 3.9. Sıvı faz sinterlemesinde çözünme yeniden çökme aşamasının şematik olarak gösterilişi	30
Şekil 3.10. Boyutları 50, 5 ve 0,05 µm olan nikel tozlarının sabit ısıtma hızında sinterleme yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	31
Şekil 3.11. Değişik presleme basınçlarıyla şekillendirilen farklı ham yoğunluktaki parçaların sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi	32
Şekil 3.12. Farklı uygulama alanlarında TEK ile üretilmiş parçalar	34
Şekil 3.13. Toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş ürünler	35
Şekil 3.14. Bir iplik kılavuzu parçasına uygulanan entegre dizayn örneği	38
Şekil 3.15. Toz enjeksiyon kalıplama uygulamalarının bölgesel konsantrasyonları	39
Şekil 3.16. Kayma altında malzemelerin klasik davranışları	42
Şekil 3.17. Birbirine paralel molekül tabakalarından oluşmuş bir sıvı bloğu	43
Şekil 3.18. Akış davranış türlerinin akış eğrileri	44

Şekil 3.19. Newtoniyen Davranışa Ait; (a) Akış Eğrisi, (b) Viskozite Eğrisi	45
Şekil 3.20. Dilatant akış mekanizmasının şekilsel gösterimi	46
Şekil 4.1. Ortalama tane boyut dağılımları	48
Şekil 4.2. Kobalt süperalaşım tozlarının SEM görüntüleri	50
Şekil 4.3. Precisa hassas terazi	51
Şekil 4.4. Turbula 3 boyutlu karıştırıcı	52
Şekil 4.5. Toz-bağlayıcı karıştırma cihazının genel görünüşü	53
Şekil 4.6. Anton Paar Reometre a) ekipmanları b) teknik özellikleri	54
Şekil 4.7. Sıcak su banyosu	55
Şekil 4.8. Bağlayıcılara ait TGA grafiği	56
Şekil 4.9. Viskozite ölçüm girdileri a) kayma hızı girdileri b) sıcaklık girdileri	69
Şekil 5.1. 160 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	61
Şekil 5.2. 155 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	63
Şekil 5.3. 150 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	65
Şekil 5.4. 145 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	67
Şekil 5.5. 140 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	69
Şekil 5.6. 135 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	71
Şekil 5.7. 130 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si	73
Şekil 5.8. Sabit kayma hızında artan sıcaklıkla viskozite değişimi çalışmalar	75

TABLO LİSTESİ

SAYFA

Tablo 2.1. Kobaltın kullanım alanları	4
Tablo 2.2. Alaşım elementlerinin süperalaşımlarda üstlendikleri roller	6
Tablo 2.3. Kobaltın özellikleri	16
Tablo 3.1. Çözülebilir bağlayıcı giderme örnekleri	24
Tablo 3.2. Toz enjeksiyon kalıplama yönteminin uygulama alanları	34
Tablo 3.3. Şekil 3.11’de (g-h-1) gösterilmiş olan kavrama kollarının üretimini yapan bir şirketin, TEK yönteminin talaşlı imalat ve hassas döküm yöntemlerine tercih edilmesinin nedenine yönelik yaptığı bir analizin sonucu	36
Tablo 3.4. Sinterleme işlemi etkileri	40
Tablo 3.5. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin viskozite değerleri	44
Tablo 4.1. Tozların genel özellikleri	48
Tablo 4.2. Bağlayıcı ve yüzey aktifleyicilere ait teknik özellikleri	50
Tablo 4.3. Toz-bağlayıcı karıştırma cihazının teknik özellikleri	53
Tablo 4.4. Tozların içerikleri (% bazında)	55
Tablo 4.5. Toz-bağlayıcı karışımının reçetesi	57

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1 Giriş

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), bir toz işleme methodudur. Düşük ilk yatırım ve işletme maaliyeti ile yüksek hassaslık ve karmaşıklığındaki parçalar bu yöntem ile kolayca anizotropik olmayacak şekilde üretilebilmektedir. Bir başka ifadeyle TEK, çeşitli tozlardan "metal, seramik, intermetalik ve kompozit" iş parçalarının ekonomik olarak üretilmesi işlemidir (Kryachek 2004). Asıl proses tozların (genellikle metal veya seramik tozlarının) içerisinde ergitilmiş termoplastik veya termoset esaslı polimer malzemeler ile karıştırılması ve homojen bir şekilde dağıtılması ve bu malzemenin basınç kullanılarak arzu edilen kalıp boşluğuna doldurulması, kalıplanmış parçanın kalıptan çıkartılarak bağlayıcı-toz karışımından polimer maddelerin (bağlayıcıların) kontrol edilebilen özel koşullar altında uzaklaştırılması ve parçaların sinterlenmesi ve bu sayede nihai ürün elde edilme aşamalarını içermektedir (Wang, 2012; Hausnerova, Lin, 1994).

Kobalt esaslı süperalaşımalar, yüksek sıcaklıklarda mükemmel aşınma ve korozyon dirençleri ile kesici ve delici aletler, talaşlı işlem takımları ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar olarak kullanılan ve endüstri için önemli malzemelerdir. Co esaslı süperalaşımaların çoğu özelliği Co'nın kristalografik doğasından kaynaklanmaktadır. Cr, W, Mo katı eriyik sertleşmesi ve karbür oluşumu sağlarken korozyon dayanımı Cr tarafından sağlanır. İyi özelliklerinden dolayı Co esaslı süperalaşımaların yeni türlerinin geliştirilmesi amacıyla oldukça yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda üstün korozyon ve oksidasyon direnci ile mekanik ve tribolojik özelliklerin eşsiz bir kombinasyonunu sergileyen Stellite alaşımaları Co-212 serisi ve Fe-Si içerikli alaşımalar, Co esaslı süper alaşımaların önde gelenlerindedir (Davis, 2000; Betteridge, 1982; Özgün ve Akbulut, 2016).

TEK yönteminde kullanılan besleme stoğu prosesin devamı ve verimliliği için çok önemlidir. Uygun bağlayıcılar ile tozların uygun şartlarda hazırlanması (Uygun oran, uygun sıcaklık), kalıplama ve bağlayıcı giderme gibi devam aşamaları için yüksek bir önem taşımaktadır. Başlangıç aşaması önemli olup uygun şartlar altında hazırlanmalıdır. Tüm bu aşamalarda yaşanan başarısızlıklar final ürün özelliklerini ve performansını belirler (Bilketay, 2017).

Yapılan çalışmada TEK yönteminde kullanılmak üzere kobalt esaslı süperalaşım tozların besleme stoğu karışımlarının hazırlanması ve çeşitli sıcaklıklarda reolojik davranışları açıklanmaya çalışılmıştır. Başlangıç aşamasında belirli tane boyutu aralıklarına sahip kobalt tozları ile polimerik bağlayıcılar ile farklı katı toz oranlarında belirli sıcaklık aralıklarında karıştırılmış ve homojen karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımların reolojik özellikleri (değişik sıcaklık ve kayma oranlarında) tespit edilmiştir. Karışım viskozitesine bağlı olarak kalıplama sıcaklık ve hızı belirlenmiştir.

1.2 Amaç

Hazırlanan bu tez çalışmasında; TEK tekniğinde kullanılmak üzere kobalt esaslı süperalaşım tozlarının besleme stoğu malzemelerin hazırlanması, reolojik ve bağlayıcı giderme şartlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için farklı analiz metotları kullanılarak incelemeler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür bilgileri ile karşılaştırılmıştır.

2.KOBALT ESASLI SÜPERALAŞIM TOZLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Kobalt yer kabuğunda % 0.0025 bulunan, periyodik cetvelde 27 olan bir geçiş elementidir. Dünya üzerinde en çok bulunan metaller içinde 30. sıradadır (Derin, 1999). Yaygın olarak Afrika ülkeleri Kanada ve Avustralya'da üretilir. Çoğunlukla kobaltit [CoAsS], smaltit [CoAsS₂], linnalit [Co₃S₄] ve eritrit [Co₃(AsO₄).8 H₂O] mineralleri hâlinde bulunur ve genellikle bizmut, bakır, manganez, antimon cevherleri ile birlikte bulunur, sülfür ve oksit formundadır. Genellikle bakır ve nikel üretiminde yan ürün olarak üretilir, özel olarak kobalt madenciliği adı altında herhangi bir üretim yapılmamaktadır (Derin, 1999; Meb, 2012). Kobalt, genellikle bileşiklerinde +2 ya da +3 değerlidir ama +4 , +1 ve -1 değerlikli olduğu birleşikleri de vardır. Kobalt +2 ve +3 değerlikli olduğu durumlarda çok sayıda düzenleşim birleşimi ya da karmaşıklar oluşturur. Üç değerlikli kobaltın oluşturduğu karmaşıklar platin dışındaki diğer metallerin oluşturduklarından daha fazladır ve karmaşıkların düzenleşim sayısı çoğunlukla altıdır. İyonizasyon enerjisi 7.881 eV tür. Kobalt sert, gümüş renginde, davranış ve özellik bakımından nikel ile demire çok benzeyen bir metaldir. Ergime noktası 1495 °C ve kaynama noktası da 2967 °C civarındadır. Özgül ağırlığı 8,99 g/cm³ tür. Sertliği, saf demirinki kadardır. (Meb, 2012).



Şekil 2.1. Kobaltın genel görünüşü (Meb, 2012).

Kobaltın eski çağlarda (yaklaşık olarak M.Ö. 2000) renklendirici olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Kobalt ile renklendirilmiş renkli taşlar bulunmuş ve ticari bir değer olarak

kullanılmıştır. Kobalt genel olarak bu taşlara lacivert rengi sağlamıştır (Young, 1960). Kobalt bileşikleri eski çağlarda kullanıldıktan sonra, 16. yüzyıla kadar unutulmuş ve Alman minerolojist Georgius Agricola'nın yaptığı çalışmalar ile tekrardan akıllara gelmiş ve madencilik faaliyetleri olarak yaygınlaşmıştır (Derin, 1999). Esas olarak kobaltın keşfi ve bilinen metalik kobalt olarak literatüre girmesi 1735 yılında İsviçreli bilim adamı Georg Brandt, bir element olarak keşfedilmesi ise 1780 yılında Bergman tarafından olmuştur (Derin, 1999).

Modern çağlarda ise kobalt ve kobalt bileşikleri geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çömlekçilik, kaplama, yüksek sıcaklık alaşımlarında, radyolojide, insan besinlerinde, boyalarda kullanılmaktadır. İnsanların elektronik ürünlerine talebinin artmasıyla dizüstü bilgisayarlar ve telefonlar için pillerde önemli miktarlarda kullanılmaktadır (Young, 1960; Derin, 1999).

Kobalt elementi krom, demir, tungsten, titanyum, molibden, tantalyum gibi elementler ile alaşımlar yapabilir. Bu alaşımların birçoğu yüksek sıcaklık alaşımları olarak kabul edilir. Yüksek sıcaklık aynı zamanda yüksek mukavemet gösteren alaşımlar süper alaşımlar olarak adlandırılır. Bu tarz alaşımlarda kobalt, nikel muadil olarak kullanılabilir. Uçak motorlarında, buhar ve gaz türbinlerinde kullanılan bu alaşımlar nikel yapıları kadar iyi sonuçlar vermektedir (Chandler ve Baxter, 1978).

Tablo 2.1. Kobaltın kullanım alanları (Derin, 1999; Young, 1960).

Kullanım Alanları	Üretim Yüzdesi
Süper Alaşımlar	% 26
Yüksek Sıcaklık Alaşımlar	% 7
Sert Malzeme ve Karbürler	% 14
Magnetler	% 9
Katalizörler	% 13
Pigmentler	% 10
Piller	% 9
Diğer	% 12

X-40, X-45, Co-212-C ve Haynes Stellite 31 alaşımları kobalt esaslı süperalaşım olup sülfürizasyona (Asitlenme sonucu paslanma) karşı yüksek direnç gösterirler ve mikroyapı olarak yüksek stabilite gösterirler. Kobalt 1121 °C'ye kadar ferromanyetik özellik gösterir. Manyetik durumun kalkmasından sonra bile manyetizmanın yitirilmemesi için kullanılır ve genellikle manyetik alaşım malzemesi olarak Fe-Ni-Co veya Fe-Co-V alaşımları kullanılır (Chandler ve Baxter, 1978; Derin 1999).

Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak malzemelerde yüzey kararlılığı ve nispeten yüksek mekanik gerilim özellikleri istenilmektedir (Bradley 1979). Çok yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında, refrakter malzeme olarak seramiklere olduğu kadar VB grubu (vanadyum, niyobyum, tantal) ve VIB grubu (krom, molibden, tungsten) metallere de ihtiyaç duyulmaktadır. Refrakter malzeme olarak kullanılan metallerin oksidasyon direnci çok düşüktür. Bu yüzden bu malzemeler daha çok oksidasyona uğramayan alanlarda kullanılmaktadır. Seramik malzemeler ise, birçok yapısal uygulama için yeterli tokluğa sahip değildir. Uygulamalarda yetersiz kalan malzeme teknolojisi ve mevcut teknolojideki sınırlamalar, süperalaşımların kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir (Hagel ve Sims., 1972).

Süperalaşım terimi, ikinci dünya savaşından hemen sonra yüksek sıcaklık performansı gerektiren turbo süper yükleyiciler ve uçak türbin motorlarında kullanılmak üzere geliştirilen bir alaşım grubunu tanımlamak için kullanılmıştır (Garimella, Liaw ve Klarstrom 1997). Süperalaşımların en önemli özellikleri;

- 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları,
- Yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon kayıplarının oldukça düşük seviyelerde olması,
- Aşırı korozif ortamlardaki korozyon davranışlarının yüksek ve erozyon dirençlerinin yüksek olmasıdır.

Kabul gören tanımlamaya göre süperalaşımlar, oldukça şiddetli mekanik gerilmelerle karşılaşılan ve çoğunlukla yüksek yüzey kararlılığı gerektiren yüksek sıcaklıklardaki servis şartlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve temeli VIII B grubu elementler tarafından

oluşturulan bir alaşım grubudur (Sims, Stoloff ve Hagel, 1987). Süperalaşımalar genellikle nikel, kobalt, demir ve krom ile birlikte daha düşük miktardaki tungsten, molibden, tantal, niyobyum, titanyum ve alüminyum gibi elementlerin çeşitli kompozisyonlarından oluşurlar (Garimella ve diğ., 1997). Tablo 3.1’de içerdikleri alaşım elementlerinin süperalaşımlarda ne gibi roller oynadığı gösterilmiştir (Stoloff, 2005).

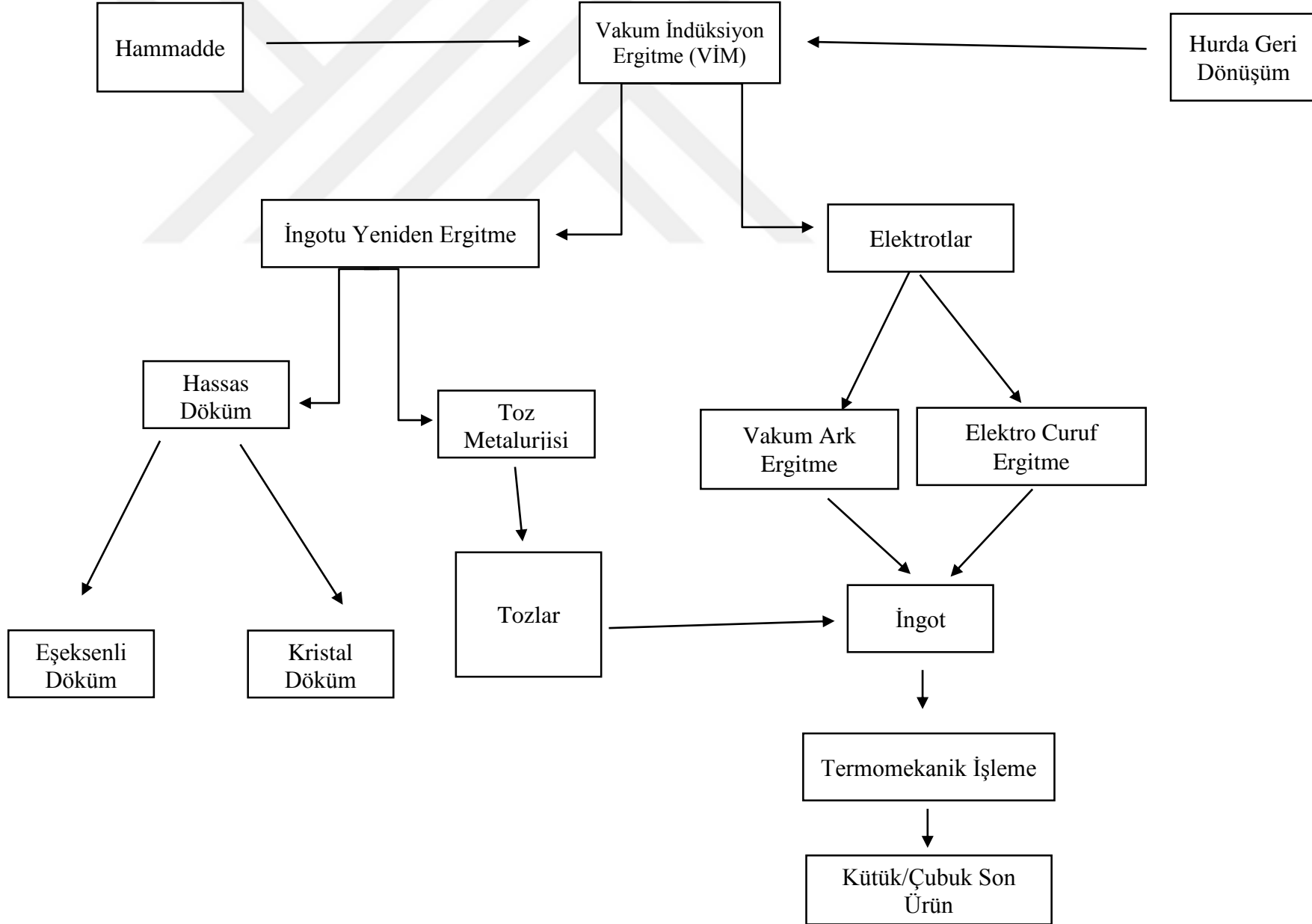
Tablo 2.2. Alaşım elementlerinin süperalaşımlarda üstlendikleri roller (Stoloff,2005).

Element Etkileri	Fe-esaslı	Co-esaslı	Ni-esaslı
Katı çözelti mukavemetlendiriciler	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
YMK matris stabilize ediciler	C, W, Ni	Ni	---
MC tipi karbür oluşturucular	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M ₇ C ₃ tipi karbür oluşturucular	---	Cr	Cr
M ₂₃ C ₆ tipi karbür oluşturucular	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M ₆ C tipi karbür oluşturucular	Mo	Mo, W	Mo, W
M(CN) tipi karbonitrür oluşturucular	C, N	C, N	C, N
γ'-Ni ₃ (Al, Ti) oluşturucular	Al, Ni, Ti	---	Al, Ti
Hegzagonal η (Ni ₃ Ti) oluşumunu geciktiriciler	Al, Zr	---	---
γ' fazının solvüs sıcaklığını yükselticiler	---	---	Co
Sertleştirici çökelti ve/veya intermetalikler	Al, Ti, Nb	Al, Mo, Ti, W, Ta	Al, Ti, Nb
γ" (Ni ₃ Nb) oluşturucular	---	---	Nb
Oksidasyon direnci	Cr	Al, Cr	Al, Cr
Sıcak korozyon direnci geliştiriciler	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci	Cr	Cr	Cr
Kopma sünekliği arttırıcılar	B	B, Zr	B, Zr
Tane sınırı segregasyonuna neden olucular	---	---	B, C, Zr
İşlenebilirlik arttırıcılar	---	Ni ₃ Ti	---

2.2. Süperalaşımın Üretimi

Süperalaşım tozları ve ürünlerinin ilk aşaması ingotların üretilmesi ile başlar. Sonra ise bu ingotlar üç büyük üretim yönteminde nihai ürün elde etmek için kullanılırlar. Bu üretim yöntemleri sırasıyla; yeniden ergitme ve hassas döküm, yeniden ergitme ve sorasında dövme, süperalaşım tozları elde etmek amacıyla yeniden ergitme şeklindedir. İngotlar ana alaşımı oluşturmak amacıyla elementlerin ve/veya geri dönüşümü yapılan malzemelerin birleştirilmesini sağlamak için refrakter bir pota içerisinde vakum indüksiyon ergitme (VIM) ile üretilirler. Seçilen alaşımın elektrik ark fırınları kullanılarak hava/cüruf ortamında ergitilmeleri potansiyel olarak mümkün olmasına rağmen, düşük ergime sıcaklığına sahip maddelerin kontaminasyonlarını engellemek için süperalaşımın VIM ile ergitilmeleri daha verimlidir. Kontaminasyona neden olan elementlerin buharlaştırılarak uzaklaştırılmasının ardından; Al, Ti ve Hf gibi γ' oluşturucu reaktif elementler ilave edilmeden önce ergiyiği deoksidi etmek amacıyla karbon kaynatma reaksiyonu kullanılır. İstenilen alaşım bileşimindeki VIM ingot elde edildikten sonra katılmış birleştirme işlemlerine tabi tutulur (Pollock ve Tin., 2006). Şekil 2.2.'de süperalaşım parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan proseslerin akış şeması verilmiştir.

Şekil 2.2. Süperalaşım parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan proseslerin akış şeması (Stoloff, 2005).



2.3. Süperalaşımların Mekanik Özellikleri

Süperalaşımlar genellikle sünektirler. Kobalt esaslı süperalaşımların sünekliği genellikle nikel esaslı ve demir-nikel esaslı süperalaşımlardan daha azdır. Kısa süreli çekme süneklikleri hasar oluşumundaki uzama ile belirlenir ve genellikle %10-%70 arasında değişir. Fakat γ' ile mukavemet kazanan alaşımlarda daha düşük olup genellikle %10-%40 arasındadır. Sürünme-kopma süneklikleri genellikle çekme sünekliklerinden düşüktür. 760°C'de döküm alaşımlarının kopma sünekliği %1,5'in altındadır; fakat çoğu yüksek mukavemetli polikristalin eşeksenli döküm alaşımı %2'den daha yüksek kopma sünekliğine sahiptir. Yönlendirilmiş katılaşıma ile dökülen tek kristalli süperalaşımların sünekliği, test yönü ile tek kristalin oryantasyonu arasındaki ilişkiye bağlı olarak farklılık gösterir (Donachie 2002).

Alaşımların sistemine bağlı olarak oda sıcaklığında polikristalin eşeksenli alaşımların elastisite modülü 172-242 GPa arasında değişebilmesine rağmen, süperalaşımlar tipik olarak 207 GPa seviyelerinde dinamik elastisite modülüne sahiptirler. Tane yönelmesi veya kristal oryantasyonuna neden olan üretim yöntemine ve tane veya kristal oryantasyonu ile test yönü arasındaki ilişkiye bağlı olarak modül 124-310 GPa arasında değişir. Elastisite modülünün yüksek sıcaklıklarda dinamik olarak ölçülmesi elzemdir, çünkü statik modüller yüksek sıcaklıklar tarafından büyük ölçüde etkilenerek dinamik değerde büyük düşüş gösterir. Sıcaklığın oda sıcaklığından 871°C'ye çıkmasıyla modüllerde %25-30 civarında bir azalma görülebilir (Donachie 2002). Oda sıcaklığında γ' ile mukavemetlenen alaşımların kısa süreli akma mukavemetleri 550-1380 MPa aralığında değişir. Gerçek değerler kompozisyon ve üretim yöntemine (döküm, dövme vb.) bağlıdır. Dövme alaşımlar en yüksek değerlere sahip olma eğilimindedirler. En yüksek sertleştirici içeriğe sahip alaşımlar (örneğin Rene 95 ve IN100) en yüksek mukavemetlere sahiptirler. Fakat mukavemet, tane boyutu ve yığılmış enerjinin bir fonksiyonudur ve U630 ve IN718 gibi alaşımlar çok yüksek akma mukavemetleri ile üretilebilirler. Katı çözelti ile sertleşen alaşımlar daha düşük mukavemet sergiler. Süperalaşımların oda sıcaklığındaki çekme mukavemetleri 690 MPa ile 1520 MPa aralığında değişir. Süperalaşımların akma mukavemetleri oda sıcaklığından 760°C civarına kadar bir artış eğilimi gösterip, bundan sonra azalır. Bu, kısa süreli mukavemet değerleri sıcaklık artışıyla sürekli bir şekilde azalan sıradan alaşımların tersi bir durumdur. Çekme mukavemetleri genellikle aynı trendi sergilemez. Aynı zamanda çekme sünekliği de düşme eğilimi sergiler (Donachie 2002 b).

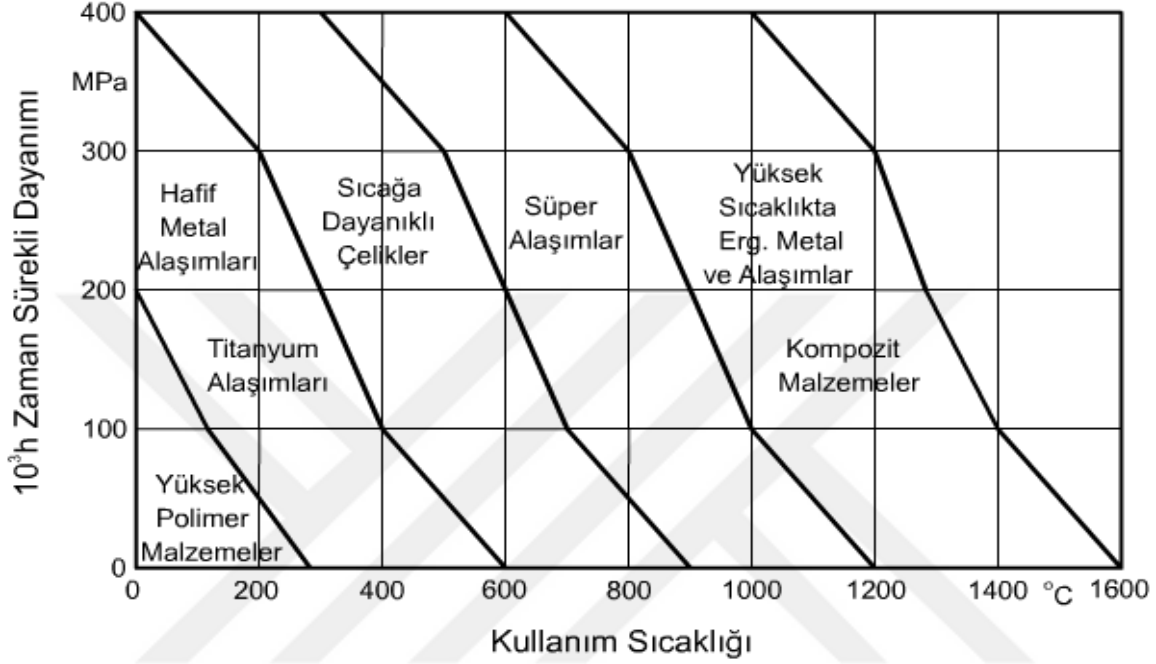
Süperalaşımın dayanımları tane boyutuna ve tane boyutu ile parça kalınlığı arasındaki ilişkiye son derece bağımlıdır. Kopma ömrü ve sürünme mukavemeti, parça kalınlığı/tane boyutu oranının artmasıyla artmaktadır. Dövme bir süperalaşımında bahsi geçen oran sabit tutulduğunda, parça ömrü ve sürünme dayanımı tane boyutunun artmasıyla artar. Kalınlığın tane boyutuna oranına ömür ve sürünme dayanımı bakımından dökme süperalaşım da benzer bağımlılığı sergiler. Bu durumlar ince kesitlerde iri taneler oluştuğunda ciddi olabilmektedir. İnce kesitler genellikle sürünme dayanımını azaltırlar. Kesitin azalması kopma mukavemetinin de kalın kesitlere kıyasla daha düşük olması anlamına gelir. Modern döküm süperalaşımında tane boyutunun kontrolü büyük önem taşır. Sürünme ve kopma mukavemetini düşüren çok ince tanelerden ve iyi kopma mukavemeti sağlamasına rağmen çekme dayanımını düşüren çok iri tanelerden kaçınılmasını sağlayacak bir dengenin tutturulması gereklidir (Sims ve diğerleri, 1987).

En yüksek çekme mukavemeti, muhtemelen 760°C civarına kadar olan orta sıcaklık rejimi üst sınırındaki uygulamalarda kullanılan ince tane boyutuna sahip dövme veya T/M süperalaşımında görülür. En yüksek sürünme (kopma sürünmesi) özellikleri yüksek sıcaklık rejimlerinde kullanılan ve daha kaba taneli olan döküm süperalaşımında görülür. Kopma mukavemeti zamanın bir fonksiyonudur. 1000 saat kopma gerilmesi kapasitesi, açık bir şekilde 100 saat kopma gerilmesi kapasitesinden daha düşüktür. Sürünme kapasitesi de bir teste izin verilmiş sürünme miktarının bir fonksiyonudur. 982°C'de 100 saat hasarı için sürünme-kopma mukavemetleri 45 MPa (U500 gibi eski bir γ' ile sertleşen dövme alaşımı için) ile 205 MPa (çok kristalli eşksenli döküm süperalaşım MAR-M 266 için) arasında değişir. Kolonsal taneli ve tek kristalli alaşımlarınki daha yüksek olabilmektedir (Donachie 2002).

Süperalaşımın genellikle bir özelliğin diğer özelliklere tercih edilerek optimize edilmesini sağlayacak şekilde üretilirler. Benzer bileşime sahip döküm ve dövme parçalar farklı ürün formları için farklı ısı işlemlere tabi tutulabilirler. Bir süperalaşım aynı ürün formlarında kullanıldığında bile, proses muameleleri diğer özellikler göz ardı edilerek istenilen özelliğin optimum olmasını sağlayacak şekilde belirlenir. Örneğin Waspaloy gibi bir alaşım gaz türbin diskleri için dövme formunda üretilir. İşleme şartlarının ayarlanmasıyla (özellikle ısı işlem) sürünme kopma mukavemeti harcanarak yüksek akma mukavemeti başarılar (Donachie 2002).

2.4. Süperalaşımların Uygulama Alanları

Süperalaşımlar 600 ile 1100°C arasında kullanılabilirler. Alaşımda en yüksek kullanım sıcaklığı, ergime sıcaklığının % 80'i (0,8 Terg.) kadardır. Şekil 3.2'de değişik malzeme gruplarının sıcaklığa bağlı olarak 103 saat zaman dayanımları verilmiştir (Topbaş, 1993).



Şekil 2.3. Sıcaklığa bağlı olarak değişik malzeme gruplarının 10000 saat zaman dayanımları (Topbaş 1993)

Süperalaşımların uygulama alanlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür:

- Uçaklar ve endüstriyel gaz türbinlerinde diskler, ateşleme odaları, vidalar, kasalar (mahfazalar), şaftlar, egzoz sistemleri, bıçaklar (pervane kanatçıkları), vanalar, yanma odaları, art yakıcılar, uçak itme gücü yönlendiricileri.
- Buhar türbinli elektrik santrallerinde vidalar, bıçaklar, baca gazı ara ısıtıcıları.
- Pistonlu motorlarda turbo yükleyiciler, egzoz supapları, sıcak bujiler, supap yuvaları.
- Metal üretim/işlemede sıcak işlem takım ve kalıpları, döküm kalıpları.
- Medikal uygulamalarda dişçilik ve protezle ilgili aletler.
- Uzay araçlarında aerodinamik bir şekilde ısıtılan kaplamalar, roket motor parçaları.
- Isıl işlem donanımlarında tepsiler, bağlayıcılar, taşıyıcı bantlar, potalar, vantilatörler, fırın susturucuları.
- Nükleer güç sistemlerinde tahrik mekanizmaları için kontrol kolları, supap gövdesi/kolları, yağlar, oluklar/kanallar.

- Kimya ve petrokimya endüstrisinde vidalar, vantilatörler, vanalar, reaksiyon kapları, borular, pompalar.
- Kirlilik kontrol donanımları olarak temizleyiciler.
- Metal işleme imalathanelerinde fırın/ocak, son yakıcılar, egzoz fanları.
- Kömür gazlaştırma ve sıvılaştırma sistemlerinde ısı dönüştürücüler, ara ısıtıcılar, borular (Stoloff 2005).

Süperalaşım, kobalt esaslı süperalaşım, demir esaslı süperalaşım ve nikel esaslı süperalaşım olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. Ek olarak nikel esaslı alaşımlara benzer metalurjik özelliklere sahip olan, fakat onlara nazaran daha büyük demir içeriğine sahip nikel-demir esaslı süperalaşım olarak adlandırılan büyük bir alt grup da vardır (Sims 1987).

2.4.1. Demir esaslı süperalaşım

Demir esaslı süperalaşım, ana element olan demire ilave olarak önemli miktarda krom, nikel ve çok az miktarda da molibden veya tungsten içermektedirler. Bu gruptaki alaşım mukavemetlerini karbür çökmesi, intermetalik çökeltiler ve/veya katı çözümlü sertleşmesi ile kazanırlar. Bu grubun nikel-krom oranları ve mukavemetlendirme mekanizmaları, paslanmaz çeliklerden farklıdır. Paslanmaz çelikler %12-25 Cr ve %0-20 Ni içermekte, demir esaslı süperalaşım ise %20'den daha fazla nikel içermektedir (%25-35). Yüksek miktarda demir içeren birçok süperalaşım olmasına rağmen, bunların hepsi demir esaslı süperalaşım değildir. Çünkü bu süperalaşım demir, nikel, krom, kobalt, az miktarda molibden, tungsten ve niyobyum gibi elementlerin karmaşık kombinasyonlarıdır (Çay 2005).

2.4.2. Nikel esaslı süperalaşım

Nikel çok yönlü bir elementtir ve çoğu metal ile alaşımlanabilir. Nikel ile bakır arasında tamamen katı çözümlülük mevcuttur. Nikel ile demir ve krom arasındaki yüksek çözümlülük oranları ise birçok alaşım kombinasyonunu mümkün kılar. Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdaki nikel matris (γ); katı çözümlü sertleşmesi, karbür çökmesi veya çökme sertleşmesi ile güçlendirilebilir (Mankins ve Lamb., 1990).

Tüm süperalaşım sınıfları içerisinde en geniş kullanım alanına sahip olan, nikel esaslı süperalaşımlardır. Nikel esaslı süperalaşım karmaşık bir kompozisyona ve iyi yüksek

sıcaklık özelliklerine sahip olup, benzer sıcaklıklarda kullanılan herhangi bir alaşım sisteminden çok daha geniş kullanım alanı bulurlar (Garimella ve diğ., 1997). Nikel esaslı süperalaşımlar başta döküm ve dövme olmak üzere farklı yöntemlerle üretilmektedirler. (Pollock ve Tin., 2006).

Nikel esaslı süperalaşımlarda kullanılan temel alaşım elementlerinden bazıları Cr, Al, Ti, Nb, Fe, Co, Mo, W, Ta, V, B, Zr ve C'dur. Krom ilavesinin amacı öncelikli olarak korozyon ve oksidasyon direncini arttırmaktır. Optimum korozyon özellikleri ağırlıkça %15-30 krom ilavesi yapıldığında beklenir ki, karbonun bulunması halinde krom aynı zamanda çökelme sertleşmesi sağlayan krom karbürleri de oluşturur (Garimella ve diğ., 1997). Şekil 2.5.'te nikel esaslı süperalaşımlarda önem arz eden elementlerin periyodik cetveldeki grupları, atom yarıçapları ve rolleri görülmektedir.

IIA		IIIA		IVA		Grup		
	B 0,097		C 0,077					
	Al 0,143							
			IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	
			Ti 0,147	V 0,132	Cr 0,125		Fe 0,124	Co 0,125
	Y 0,181		Zr 0,158	Nb 0,143	Mo 0,136		Ru 0,134	
			Hf 0,159	Ta 0,147	W 0,137	Re 0,138		
								Ni 0,125

γ' oluşturucular
 Tane sınırı elementleri
 γ oluşturucular

Şekil 2.4. Nikel esaslı süperalaşımların yapısında önem arz eden elementler (Sims 1987)

Çoğu nikel esaslı alaşım mukavemetini γ' çökeltilerinden kazanır. Bu mukavemetlenme için gerekli olan elementler Al, Ti ve Nb'dur. γ' çökeltileri $Ni_3(Al, Ti)$ formülü şeklinde oluşur. Ağırlıkça %4'ün üzerinde Nb bulunduğu Nb, farklı bir mukavemet artırıcı faz olan Ni_3Nb formülüne sahip γ'' çökeltilerini oluşturur. Daha az miktarda bulunduğu Nb, γ' çökeltilerindeki Al ve Ti'un yerini alabilmektedir. Hem Ti hem de Nb intermetalik

çökeltilerin yanında ek mukavemet artışı sağlayan karbürler de oluştururlar. Al aynı zamanda alaşım yüzeyinde dayanıklı bir oksit tabakası oluşturarak yüksek sıcaklık oksidasyon direncini geliştirir (Garimella ve diğ., 1997).

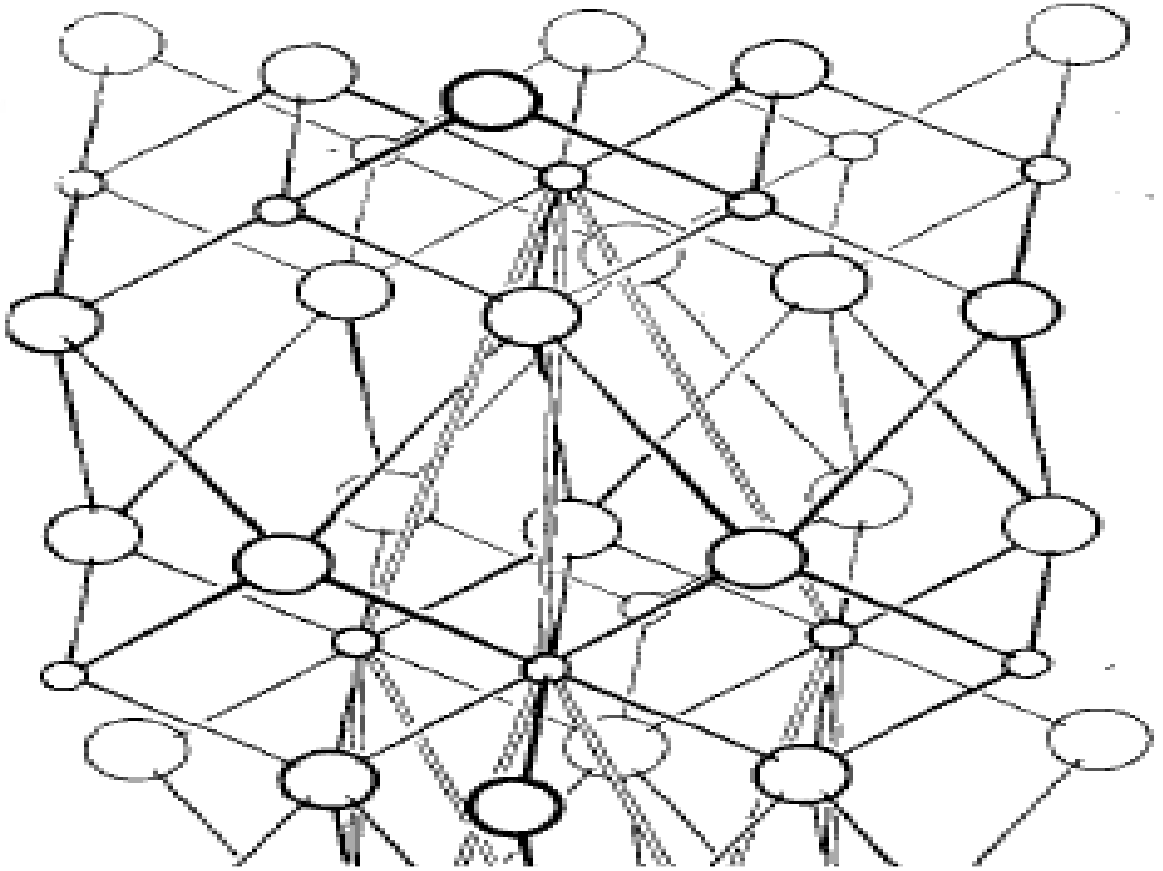
Nikel esaslı süperalaşımlara demir ilavesinin amacı, alaşımın maliyetini düşürmektir. Ancak oksidasyon direncinin düşmesine neden olacağından demir miktarı artışında bir sınırlama vardır. Demir aynı zamanda özellikler üzerinde zararlı etkileri olan σ fazının oluşumuna yol açar. Kobalt ilavesi yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirirken alüminyum ve titanyumun Ni-Cr matris içindeki çözünürlüğünü azaltır. Kobaltın nikel esaslı süperalaşımların, özellikle Al ve Ti içeren nikel esaslı süperalaşımların işlenebilirliğini arttırdığı belirtilmektedir (Garimella ve diğ., 1997). Nikel esaslı süperalaşımlarda katı çözeltili mukavemetlenmesi, yüksek sıcaklıklarda molibden, tungsten ve tantal ilavesi ile sağlanır. Bunlar aynı zamanda γ' çökeltilerinin içinde çözünür ve mukavemet özelliklerini geliştirirler. Mo, W ve Ta aynı zamanda birbirleriyle ve Fe ve Cr ile karmaşık karbürler oluştururlar ki, bu karbürler mukavemet özelliklerini arttırıcı etkiye sahiptirler (Garimella ve diğ.; , 1997, Bilketaş, 2017).

Bor ve zirkon elementleri sürünme mukavemetini ve sünekliği arttırmak için ilave edilir. Bunlar tane sınırlarına segregasyon olurlar ve tane sınırı karbürlerinin aglomere olmalarını yavaşlatırlar. Ni, Co, Fe ve Cr matris sınıfı elementlerdir ve süperalaşımların matrislerini oluştururlar. Süperalaşımın matrisi bu elementler tarafından oluşmadığında, bu elementlerin ilave edilmesi Mo, W ve V ile birlikte katı çözeltili sertleşmesi sağlar. Ta, Ti, Al ve Nb çökelti sertleşmesi için ilave edilirlerken C, B ve Zr tane sınırı alt sınıfına ait elementlerdir. Bazı elementler (örneğin Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, ve Ti) karbür de oluştururlar. Cr ve Al oksit alt sınıfına ait elementler olup, alaşım yüzeyinde oksit tabakaları oluştururlar (Garimella ve diğ.; , 1997, Bilketaş, 2017).

2.4.3. Kobalt esaslı süperalaşımlar

Kobalt esaslı dökme ısı dayanımlı alaşımlar ilk kez ikinci dünya savaşı sırasında, yüksek gerilmeler altında çalışan gaz türbin bıçaklarında kullanılmıştır. Mukavemet açısından kobalt alaşımları 980°C üzerindeki sıcaklıklar haricinde nikel alaşımlarıyla rekabet edememektedirler. Buna rağmen, kaynaklanma ile tamir edilebilme kolaylığı ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel korozyon direnci sağlayan yüksek krom içerikleri nedeniyle kobalt

esaslı alaşımlar, yüksek basınç türbin kanatçıklarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Donachie 2002). Süperalaşımlar ise kısaca yüksek sıcaklıklarda kullanılan ve oksitlenmeye karşı dirençli yapılar olarak tanımlanır ve nikel, kobalt esaslı olarak sınıflandırılır (Lund ve Wagner, 1965). Havacılık, otomotiv, kimya ve petrol gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. Süperalaşımlar, oldukça yüksek mekanik gerilmelerle karşılaşılan ve çoğunlukla yüksek yüzey kararlılığı gerektiren yüksek sıcaklıklardaki ortamlarda kullanılmak üzere geliştirilen ve temeli VIIIB grubu elementler tarafından oluşturulan bir alaşım grubudur (zgn ve Akbulut, 2016).



şekil 2.5. Kobaltın kristal yapısı (Grime ve Santos, n.d)

Kobalt esaslı alaşımlar ise 800-1100 °C arasında kadar yüksek korozyon direnci ve dayanım gösteren alaşımlardır. Kobalt alaşımlarının özkütleleri $8.3-9.4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ dir. Oda sıcaklığında (HCP) hekzagonal sıkı paket yapıda bulunurlar. Ancak 417 °C'den itibaren kübik yüzey merkezli hale geçerler. Vakum ortamında işlendiği için nikel alaşımlara göre daha maaliyetlidir (Losertov, 2014). Kobalt tozları biyomedikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Mekanik zelliklerinden (Young modülü değerinin yüksek olması, yorulmaya

karşı yüksek direnç göstermesi, kaynak edilebilirliği v.b.), kimyasal özelliklerinden (korozyon direncinin yüksek olmasından) ve biyouygunluk özelliklerinden (insan dokusuna uygunluk) ötürü diş implantı, omuz ve diz protezlerinde v.b. gibi medikal ürünlerde kullanılmaktadır (Marek, Novak, Mlynar, Vojtech, Kubatik ve Malek, 2015).

Tablo 2.3. Kobaltın özellikleri (National Toxicology Program, 2009).

Kobalt	
Molekül ağırlığı	58.9
Renk	Gri
Kristal yapısı	Hekzagonal ve kübik
Erime noktası (°C)	1,495
Kaynama noktası (°C)	2,927
Özkütle	8.9
Çözünürlük	Seyreltik nitrik asit
Buhar basıncı	1 Pa (1,517°C)

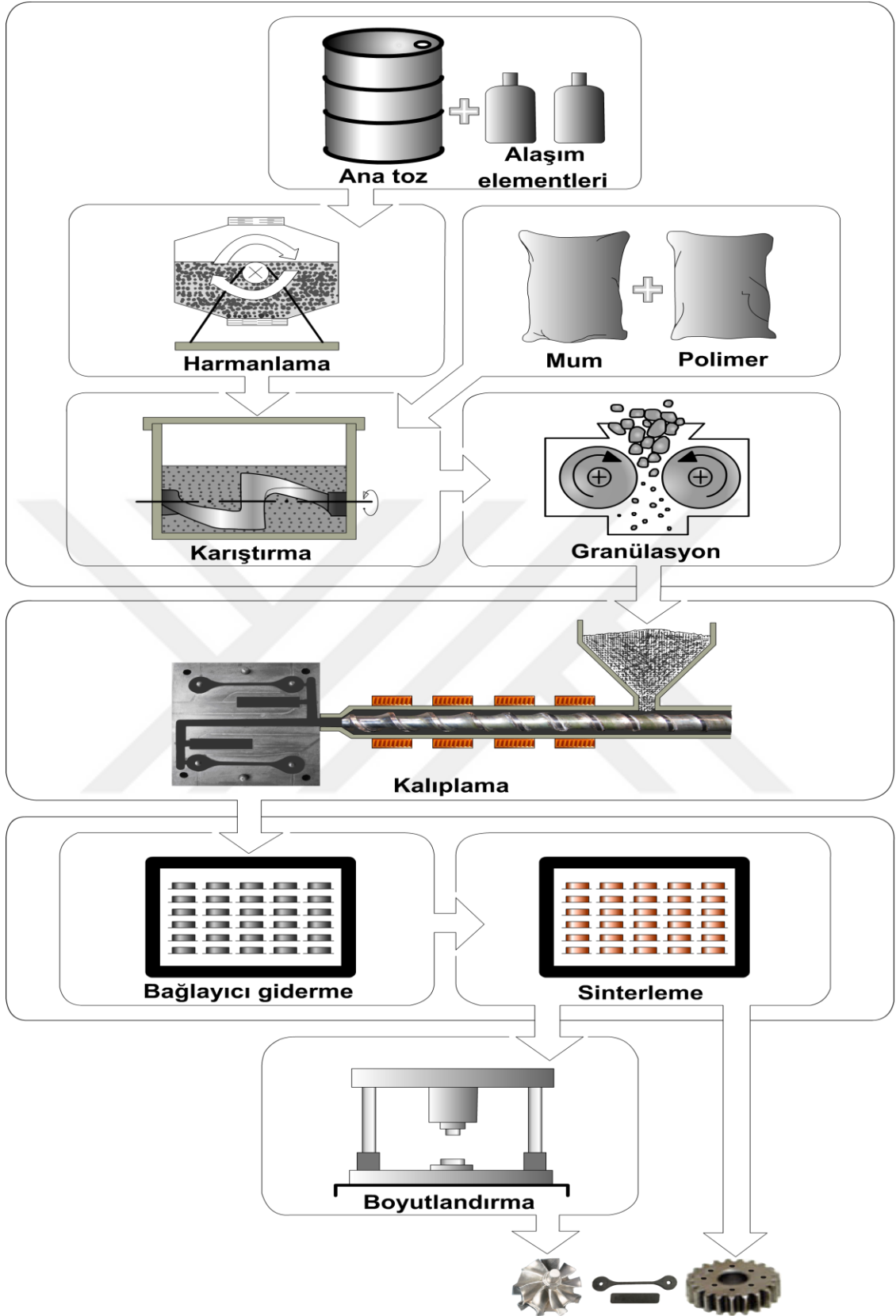
Kobalt süperalaşımaları genellikle döküm ile üretilmiş parçalar, toz metal parçalar, sıcak izostatik preslenmiş (HIP) parçalar, kaynaklanmış sert yüzeyler, lazer sert yüzeyler ve termalsprey kaplamalar gibi farklı formlarda kullanılabilir. Döküm alaşımları çok yaygın olarak kullanılmalarına rağmen Co esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretiminde porozite, segregasyon, iri tane boyutu ve dendritler arası ötektik karbür ağı gibi problemlerin önlenmesi veya giderilmesi için önemli tedbirler veya ilave ısı işlemleri gerekmektedir ve bu döküm yöntemi ile üretimi zor hale getirmektedir. Aksi halde nispeten büyük boyutlu karbür yapıları ve gözenekler gibi var olan kusurlar yüzünden yüksek gevrekliğe ve düşük darbe ve yorulma direncine sahip olurlar (Özgün ve Akbulut, 2016). Co esaslı süperalaşımların toz metalurjisi ile üretiminde genellikle sıcak izostatik presleme de uygulanmaktadır. Sıcak presleme tekniğinde Argon gazı atmosferinde basınç ve sinterleme işlemi bir arada yapıldığından ayrı bir sinterleme işlemi gerektirmez. İşlem basınçla birlikte yapıldığı için kısa sürede gerçekleşmektedir (Somunkıran ve Balın, 2011). Daha önceden hazırlanmış kalıplar sayesinde grafit kalıplara konulan metal tozları 10 dakikalık kısa bir sürede kompaktlanabilmektedirler. Ayrıca düzgün içyapılı malzemeler, yüksek yoğunluk, düşük maliyet, sıcak presleme tekniğinin avantajları arasındadır. Ancak bu yöntem hem çok pahalıdır hem de esnekliği azdır (Özgün ve Akbulut, 2016).

Endüstriyel talepler, Stellite alaşımlarının kullanım alanını daha yüksek gerilmeli uygulamalara kaydırmaktayken, üretim prosesleri ihtiyaç duyulan tribo-mekanik özellikleri sağlayacak şekilde adapte edilebilir. Toz metalurjisinin süperalaşımların üretilmesi için potansiyel avantajları 1960'ların sonunda ortaya çıkmıştır. 1970'lerde süperalaşım tüketici ve üreticileri toz metalurjisini düşük maliyetli ve yüksek performanslı uçak parçalarının üretimi için potansiyel yol olarak görmeye başladılar. T/M ile üretilmiş süperalaşımlar, geleneksel döküm veya dövme parçaların performans gereklerini karşılayamadığı uygulamalarda kullanılırlar. Geleneksel malzemelerin başarısızlığı (hasara uğraması) genellikle düşük veya homojen olmayan özelliklerden ve termomekanik özelliklerin düşmesine neden olan segregasyondan kaynaklanmaktadır (Yang, Sun, Guan, ve Hu, 2003).

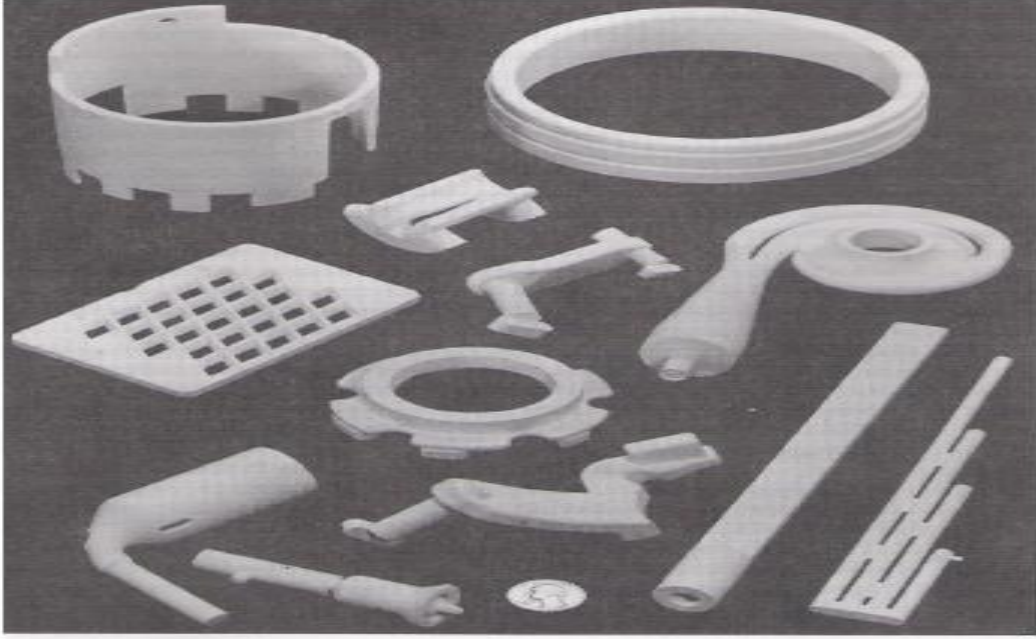
3. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA

3.1. Giriş

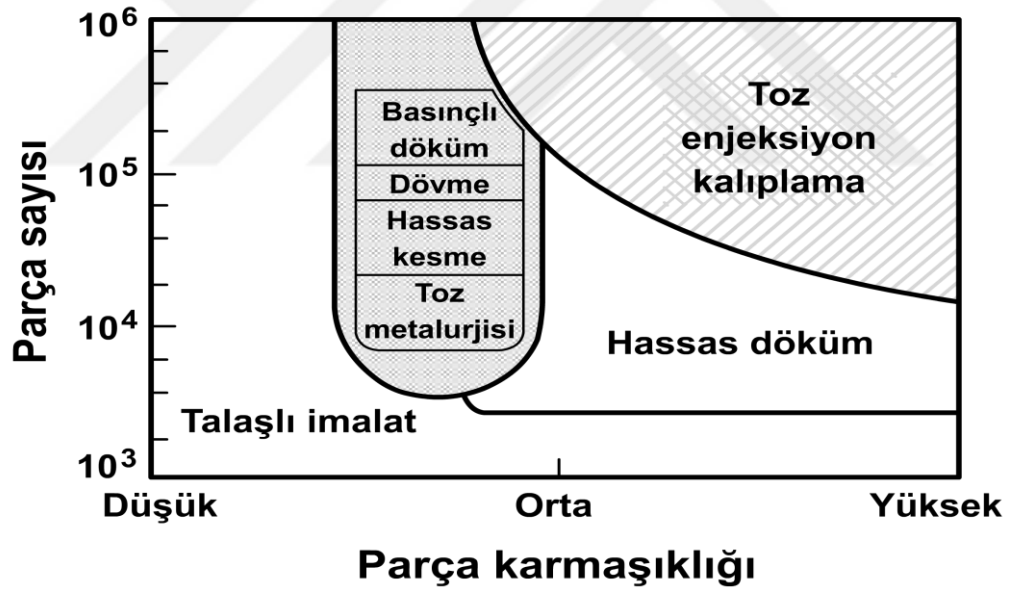
Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), 20 µm'dan küçük ince metal veya seramik tozlarının polimer bağlayıcılarla harmanlanması ve bu karışımın enjeksiyon kalıplama makinelerinde pres edilerek şekillendirilmesidir. Bu yöntem 1900'lü yılların başında seramik buji imalatında ilk olarak uygulanmıştır ve ilerleyen yıllarda ise balmumu, selüloz, epoksi, malzemeleri TEK yönteminde bağlayıcı olarak kullanılarak düşük üretim hacminde seramik malzemeler şekillendirilmiştir (Bilketay, 2017). TEK, küçük, karışık ve zor şekilleri olan, özel boyutlu, hassas ve toleransı az olan, düzgün yüzeyli olması gereken, islenmesi güç ve fazla işlem gerektiren parçaların, uygun maliyette üretimi için geliştirilmiş bir üretim metodudur (Karataş ve Santaş 1998). Bu yöntem ile farklı metal ve/veya seramik parçaları diğer imalat seçeneklerine göre çok daha ekonomik ve hızlı bir biçimde üretilebilmektedir. Enjeksiyon kalıplama işlemi ile plastik malzemelerin şekillendirilmesi uzun yıllardan beri uygulanan bir yöntemdir. Fakat birçok mühendislik uygulamaları için bu polimerik malzemeler sertlik, mukavemet, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme gibi yeterli teknik özelliklere sahip değildir. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için toz metalurjisi ve plastik enjeksiyon teknolojilerinin bir arada kullanıldığı toz enjeksiyon kalıplama teknolojisi ortaya çıkmıştır (German ve Bose, 1997).



Şekil 3.1. TEK şematik gösterimi (Yücel, 2007).



(a)



(b)

Şekil 3.2. a) TEK metoduyla üretilmiş parçalar (Yücel, 2007). b) Üretim hacmi ve parça karmaşıklığına bağlı olarak üretim teknolojilerinin uygun oldukları bölgeler (Froes 1998).

1970'li yılların başlangıcında Amerika'da geliştirilerek niobyum alaşımlı malzemeden yapılmış roket parçası ve jetlerde kullanılan vidalı sızdırmazlık elemanı TEK'de meydana gelen önemli tasarım çalışmaları olmuştur. Bu gibi önemli gelişmelerden sonra endüstriyel olarak büyük oranda hızlı bir gelişme meydana gelmiş ve günümüzde TEK teknolojisi çok sayıda fabrikada kullanılmaktadır.

Toz Enjeksiyon Kalıplamanın Avantajları ve Dezavantajları (Yücel, 2007).

Avantajları

1. Geleneksel T/M ile üretilmeyecek karmaşıklıkta şekilli parçaların üretilmesi.
2. Parçaların tümünde sinterleme sonrası esit yoğunluğa ulaşılabilmesi.
3. Geleneksel T/M ile üretimi çok zor olan küçük parçaların üretimi.
4. Geleneksel T/M işlemine göre daha iyi yüzey kalitesine sahip olunması.

Dezavantajları

1. Düzgün parça üretimi için toz boyutlarının küçük ($20 \mu\text{m}$ 'nin altı) ve toz seklinin (küresel) uygun olması.
2. Geleneksel T/M işleminde yer almayan bağlayıcı çıkarma işleminin zorluğu.
3. Bağlayıcı çıkarma ve sinterleme asamalarında ön görülmeyen hataların çok sayıda üretilmiş ön ürünün firesine sebep olması.
4. Geleneksel T/M'ye göre daha pahalı kalıp, tezgah ve operatör maliyeti.

Polimer malzemelerin şekillendirilmesi, enjeksiyon kalıplama ile uzun bir süredir uygulanan bir yöntemdir. Fakat bu polimerik malzemeler yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, mukavemet, sertlik gibi yeterli teknik özellik birçok mühendislik uygulamaları için elverişli değildir. Bu teknik sorunları ortadan kaldırmak için plastik enjeksiyon teknolojisi ve toz metalurjisinin beraber kullanıldığı TEK üretim teknolojisi ortaya çıkarılmıştır. Kısa sürede içerisinde de toz metalurjisi ile parça şekillendirme ve üretme en çok gelecek vadeden yöntemlerden biri olarak kabul görmüştür. TEK süreci Şekil 3.1'de gösterildiği gibi bir dizi ardışık operasyondan oluşmaktadır. Metal ve/veya seramik tozlarını polimer bağlayıcılarla belirli oranlarda karıştırılarak besleme stoğu denilen karışım elde edilmektedir. Besleme stoğundaki bağlayıcı miktarı hacimsel olarak %15'den %50'ye kadar değişmektedir. Elde edilen besleme stoğu karıştırılmakta ve daha sonra granül hale getirilerek enjeksiyon makinasına konulur. Uygun sıcaklık ve basınçla oluşturulacak malzemenin kalıp boşluğuna gönderilir. Kalıbın şeklini almış ham parçalar kalıptan çıkarılarak ısıtılarak veya çözgen

yöntemleriyle bağlayıcı giderme işlemi uygulanır. Bağlayıcının parçadan ayrıştırılmasından sonra yapılacak işlem, parçanın sinterlenmesidir. Sinterleme işlemi ile parçadan istenilen yoğunlukta nihai ürün elde edilmektedir. Gerekğinde ilave işlemler sürecin devamında uygunabilmektedir (Çakar, 2006; Yücel, 2007; German, 1997; Özgün, 2012).

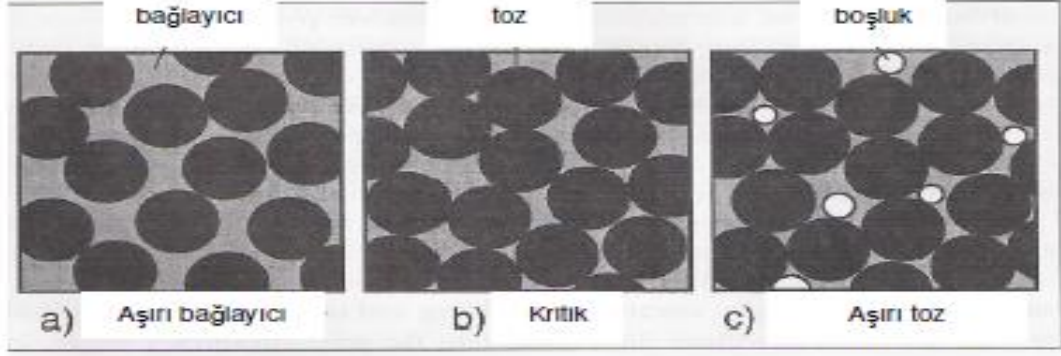
3.2. Besleme Stoğu Hazırlama

TEK'deki ilk adım besleme stoğunun hazırlanmasıdır. Tozun bağlayıcılarla bir araya getirilip küçük parçalara ayrılmış hali besleme stoğu olarak adlandırılır. Tozun karakteristik özellikleri, toz-polimer oranı, karıştırma işlemi ve küçük parçalara ayırma teknikleri besleme stoğunu etkileyen faktörlerdir. Besleme stoğu mum, polietilen, polipropilen gibi termoplastiklerin yanı sıra gıda atıkları, selüloz, jel gibi çeşitli organik malzemeler katkı ve bağlayıcı malzemesi olarak oluşmaktadır. Kalıplama işleminin kolay bir şekilde yapılabilmesi ve son boyut toleranslarının istenilen biçimde olması için besleme stoğu en uygun şekilde belirlenmelidir. Besleme stoğundaki bağlayıcı miktarı hacimsel olarak %15'den %50'ye kadar değişmektedir. Kalıplamayı kolaylaştırmak amacıyla düşük molekül ağırlıklı polimerler viskoziteyi azaltmak için kullanılır. Yeterli miktardaki bağlayıcı ile, toz parçacıkları arasında boşluk ve gözenek olmayacak şekilde kaplanmalıdır. Mümkün olduğunca toz, yüksek paketleme yoğunluğunda seçilmelidir. Tozun şekli ve boyutu uygun olmalıdır. Bağlayıcı oranının fazla olması besleme stoğunun viskozitesini düşürür ve bağlayıcının giderildiği aşamada tozlar arası temas en az düzeyde olacağından parça şeklini koruyamaz. Bundan dolayı toz-bağlayıcı oranı iyi bir kalıplama yapılabilmesi için çok önemlidir. Besleme stoğunun kalitesi ve homojenliği kalıplanma ve sinterleme adımlarını önemli derecede etkilemektedir. Sinterleme sırasında ürünün çekmesini en aza indirmek için besleme stoğu genellikle maksimum toz oranına sahip olmalıdır (Liu, Loh, Tor, Khor., 2003; Thian, Loh, Khor, Tor., 2002; Suri, Atre, German, de Souza., 2003).

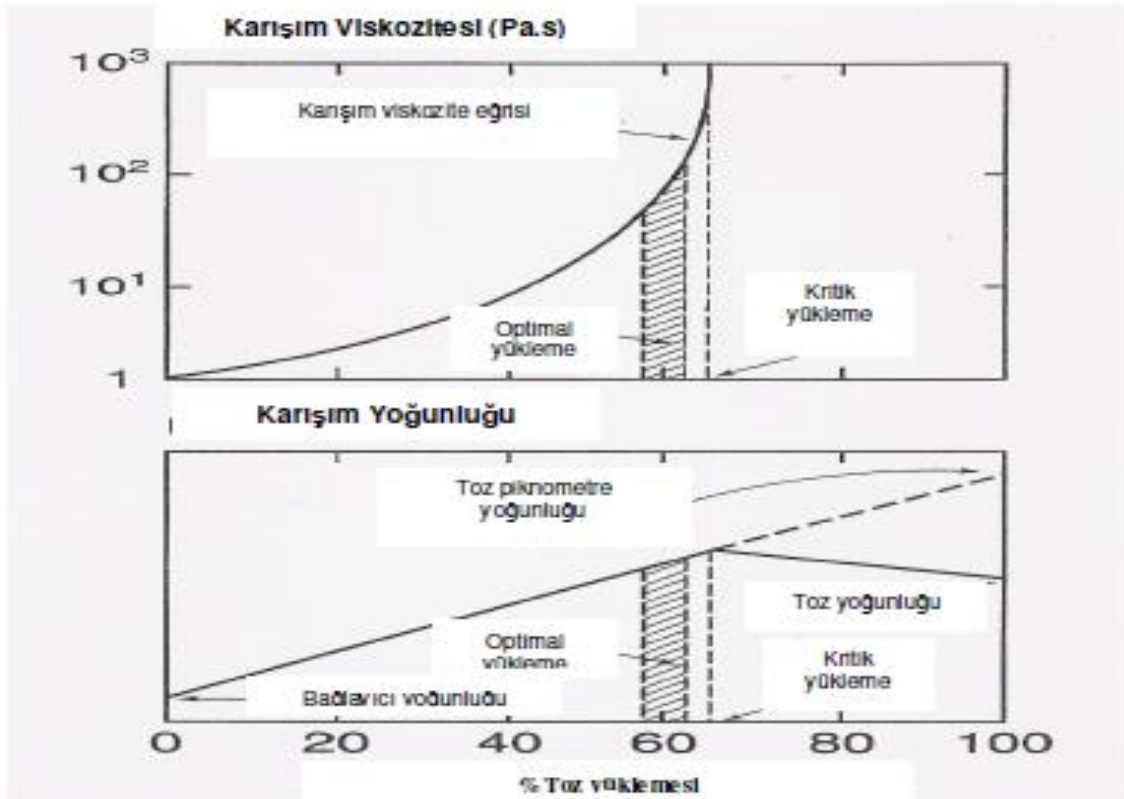
3.3. Toz-bağlayıcı oranı

TEK besleme stoğunda toz-bağlayıcı oranının optimum şekilde belirlenmesi daha sonraki aşamaların sorunsuz ilerlemesi için gereklidir. Sekil 3.3'de üç farklı durum görülmektedir. Bağlayıcı miktarı az olduğunda viskozite yüksek olur ve toz taneleri arasında hava boşlukları oluşur. Bu da kalıplamayı zorlaştırır. Kritik oranda viskozite çok yüksektir ve hava boşlukları karışım içerisinde dağılmıştır. Besleme stoğu kritik oranın biraz altındaki bir oranda oluşturulur. Toz oranı fazla olduğunda, bağlayıcılar tozlar arasında boşlukların

olusmasını engelleyemez. Bu ise bağlayıcı giderme esnasında çatlamalara neden olur. Asırı bağlayıcı, kalıplama sırasında tozların ayrışmasına ve homojensizliğe sebep olur. Bağlayıcının fazla olması bağlayıcı giderme aşamasında toz tanelerinin birbirini taşıyamamasından dolayı çökmelere sebep olur. Kritik yükleme oranı tozlar arasında nokta temaslının olduğu ve tozlar arasında boşluk olmayan orandır (Yücel, 2007).



Şekil 3.3. Toz ve bağlayıcı durumlarının şematik gösterimi (Yücel, 2007).



Şekil 3.4. Kritik toz yoğunluğunun bulunması

3.4. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama, besleme stoğunun yeterli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak, içindeki bağlayıcının eritildikten sonra kalıp boşluğu içerisine belli bir basınç altında doldurulması işlemidir. Kalıplama için kullanılan cihazlar plastik sektöründe kullanılan geleneksel enjeksiyon kalıplama cihazları temel alınarak geliştirilmişlerdir. Sertleştirilmiş vida ve barel aşınmayı azaltacak şekilde ve vida tasarımı ise değiştirilerek plastikleştirme esnasında homojenliği sağlayacak tarzda toz kalıplama yapmak için cihaz ekipmanları üzerinde küçük değişimler uygulanarak geliştirilmiştir. Kalıplama işleminde tozun homojen dağılması, hatasız ve boşluksuz bir şekilde parça elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle erimiş madde en az bir zorlanma ile kalıbın içerisine akacak yeterli derecede bir viskoziteye sahip olmalıdır (Shah, 1988; Dalkılıç, 2001).

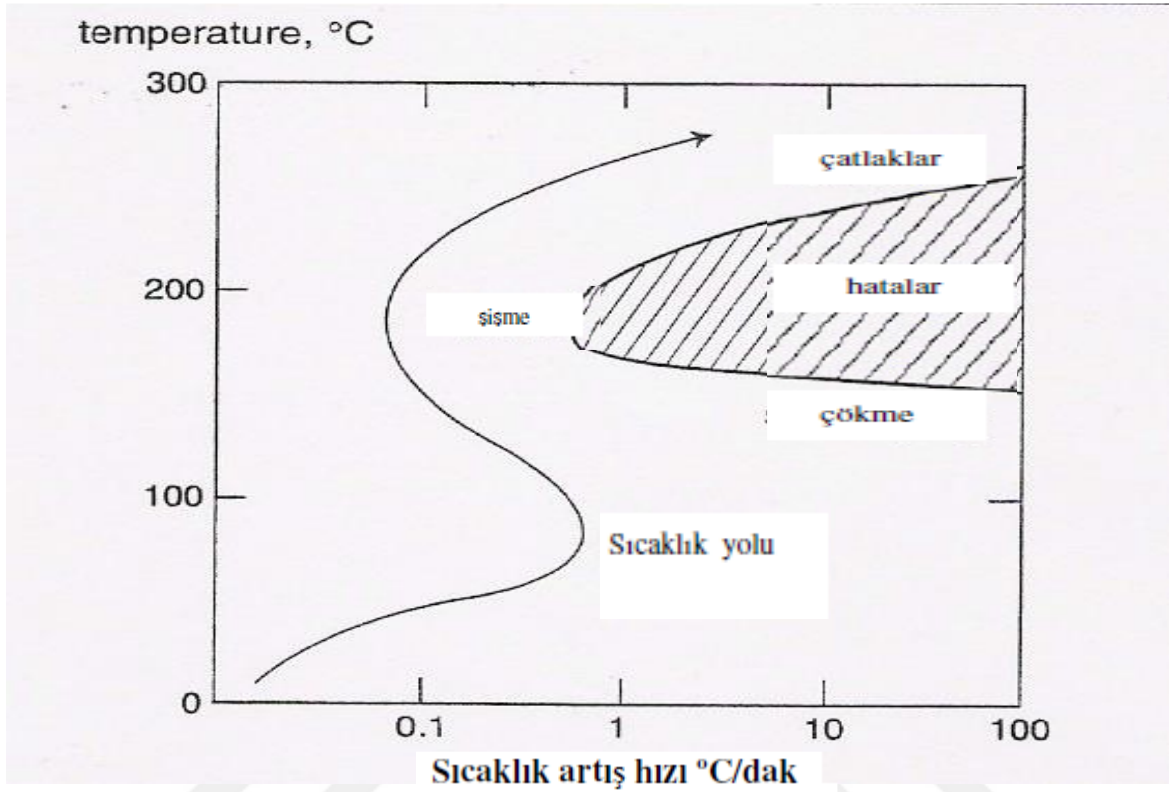
Karıştırılıp tane haline getirilmiş besleme stoğu, TEK makinesinde istenilen şekle getirilir. Kalıplama işlemi kalıpların kapatılıp kilitlenmesi ile başlar. Bu işlem için kullanılan metal kalıplar benzer olarak polimer malzemelerin kalıplanmasında da kullanılmaktadır. Besleme hunisine konulan granül haldeki besleme stoğu silindir haznede ısıtıcılar sayesinde ergiyik duruma getirilir ve piston vasıtasıyla kalıba doldurulur. Pistonun görevi karışımı sıkıştırma ve karışımı kalıba iletmektir. Kalıba doldurulan besleme stoğu bir süre basınç altında bekletilerek katılaştırılır. Cihazın enjeksiyon kısmı uzaklaştırılır ve parça kalıp açılarak çıkarılır. Kalıplama çevriminde en düşük maliyette ve en kısa sürede tamamlanmalıdır. Bu yüzden enjeksiyon basıncı, silindir sıcaklığı ve akış hızı gibi parametreler kalıplamada oldukça önemlidir. Enjeksiyon basıncı hem kalıbın doldurulmasında hem de parça şeklinin korunmasında, öte yandan silindir sıcaklığı ise besleme stoğunun bozulmaması ve akıcılık (viskozite) bakımından önemlidir. Enjeksiyon kalıplama teknolojisinde bir besleme stoğunun kalıplanma aşaması özellikle önemlidir. Çünkü bu aşamada viskozite yüksek olursa, besleme stoğunun kalıba aktarılması için yüksek basınçlar gerektirir. Kalıp yüksek basınçla enjeksiyon sırasında parça kalıba yapışır ve jet oluşumu ile toz ve bağlayıcı ayrışması meydana getirir. Ayrıca bu aşamada oluşabilecek kusurlar (oyuklanmalar, tabakalanmalar, faz segregasyonları) daha sonraki aşamalarda giderilmesi mümkün olmayan sonuçlar meydana getirir (German, 1990; Özgün, 2012).

3.5. Bağlayıcı Giderme

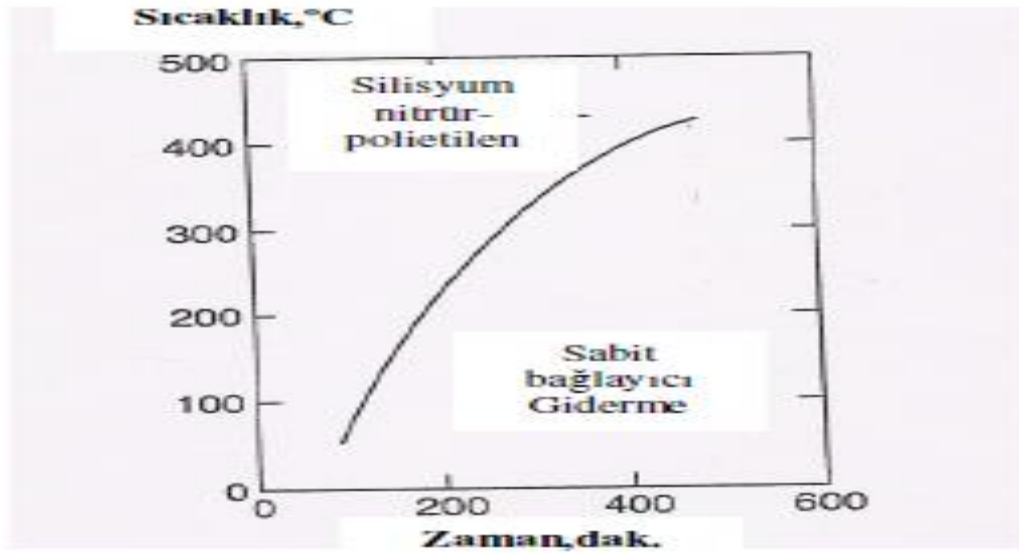
Bağlayıcı giderme, toza çeşitli sebeplerle katılan bağlayıcıların sinterleme öncesi farklı yöntemlerle uzaklaştırılması, besleme stoğuna istenen şekil verildikten sonra ham parçadan bağlayıcının çıkarılma işlemidir. Bu işlem büyük zorlukların kaynağı ve genellikle en fazla zaman alan aşamadır. Bağlayıcıların temel işlevi kalıplamaya kadardır. Eğer bağlayıcı sistemi sinterleme gibi aşamalardan önce giderilemezse nihai üründe kimyasal tepkimeler, çatlak ve çökmelere sebebiyet verir. Üründen bağlayıcının uzaklaştırılması TEK işleminin anahtar evrelerinden biridir. Bağlayıcı giderme işlemindeki amaç kalıplanmış numuneye zarar vermeden en kısa sürede bağlayıcıların yapıdan uzaklaştırılmasıdır. Bütün bağlayıcıların çıkarılması tozların dökülmesine ve parçanın bozulmasına yol açacağından, ürünün şekli korunarak bağlayıcıların yapıdan uzaklaştırma işlemi birkaç basamakta gerçekleştirilir. Bu işlemler kimyasal çözündürme ve termal ayırıştırma olmak üzere iki yöntemle ayrılır.

Tablo 3.1. Çözülebilir bağlayıcı giderme örnekleri (Yücel, 2007).

Çözülebilir Bağlayıcı Bileşeni	Çözülmez Bağlayıcı Bileşeni	Çözücü
Parafin Wax	Polipropilen	Heptan
Fıstık Yağı	Polietilen	Etilen diklorür
Polietilen Glikol	Poliasetal	Su
Polietilen Glikol	Polimetil metakrilat	Su
Asetanilid	Polistren	Su
Balmumu	Polietilen	Karbon tetraklorür



Şekil 3.5. Bağlayıcı gidermede karşılaşılan hatalar.



Şekil 3.6. Örnek bağlayıcı giderme grafiği (Yücel, 2007).

Kimyasal çözüldürme işlemi ile enjekte edilmiş ham parçaların su, organik çözücüler gibi çözüldürücülerle çözüldürülmesini içerir. Termal ayrıştırma işleminde ise önceden belirlenmiş sıcaklık aralıklarında, sıcaklıkların etkisiyle yapıda bulunan farklı bağlayıcı sistemlerinin erimeye, ayrılmaya ve buharlaşarak yapıdan uzaklaşmasını içermektedir. Bu işlemler sinterleme uygulamasına yönelik birbirini izleyen işlemler dizisinden veya tek başlarına da uygulanabilmektedir. İlk aşamada bağlayıcının büyük bir yoğunluğu kimyasal çözüldürme, kalan kısmı da termal ayrıştırma ile parçadan giderilir. İlk aşamada bir çözücü içinde çözünebilen parçadaki bağlayıcı sistemi, sıcak bir çözücünün içerisine daldırılıp bağlayıcıyı sıvılaştırarak ayırma işlemine dayanır. İkinci aşamada ise sıcaklığın etkisiyle yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı sisteminin buharlaştırılarak uzaklaştırılma işlemi ile gerçekleşir. Sıcaklık ile bağlayıcının uzaklaştırılmasında sıcaklık artış hızı önemlidir. Çünkü bağlayıcının parçadan ani olarak uzaklaştırılması yapıda çatlak ve bozulmalara sebebiyet vermektedir (Shah, 1987; Angermann, 1993; Özgün, 2012).

3.6. Sinterleme

Toz enjeksiyonla kalıplanmış ve bağlayıcı sistemi giderilmiş parçaların yoğunluğu ve dayanımları düşüktür. Bu nedenle parçalar kolayca kırılırlar. Yoğunlukları ve mukavemetleri yüksek parçalar üretmek için sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme, toz parçacıklarının bir araya gelip yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak, birbirleriyle bağ kurup nihai bir yapıya dönüştürüldüğü ısıl işlemdir. Bu bağ işlemi ile toz parçacıklar arasındaki temas noktalarında boyunlaşma oluşur. Boyunlaşmanın artmasıyla parçada çekmeler meydana gelerek gözenekler kapanır. Bu sayede yoğunlaşma gerçekleşir ve parçanın dayanımı artar. Sinterlemedeki bağlanma durumu, erime noktası düşük malzemelerin sıvılaştırılarak sıvı faz sinterlemesi ile gerçekleşse de yoğunlukla erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda katı halde sinterleme ile atom hareketleriyle oluşur. Sinterleme işlemi, atmosfer kontrollü fırınlarda veya vakum altında uygun sinterleme sıcaklıklarında gerçekleştirilir (German, 2007; German, 2014).

TEK'da bağlayıcı giderme işleminden sonra sinterleme işlemi gerçekleşir. Sinterlemenin amacı ham halde hiçbir yük taşıyamayacak olan parçanın, yüksek sıcaklıklarda pisirilerek mukavemetini artırmaktır. Bağlayıcı giderme işleminde iyice artan boşluk miktarı sinterlenerek yok edilir ve parçada çekmeler meydana gelir. Boşluk miktarının azalması parçanın yoğunluğunun artması ve mekanik özelliklerinin iyileşmesi anlamına gelmektedir.

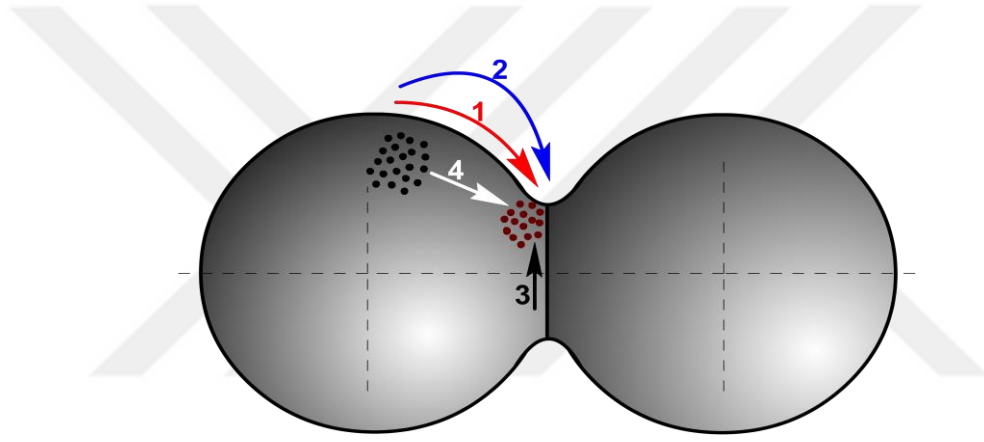
Sinterleme işleminden sonra parçanın mukavemet ve sertliğinin artmasının yanı sıra süneklik, iletkenlik, manyetik özellik, aşınma ve korozyon direnci gibi mühendislik özelliklerinde de artma meydana gelir. Sinterleme işlemi, malzemenin erime sıcaklığının yaklaşık 3/4'ü ile 4/5'i arasında bir sıcaklıkta gerçekleşir. TEK ile üretilen parçaların sinterleme sıcaklığı erime sıcaklığına yakındır. TEK işleminde bağlayıcı gidermeden sonra parçanın yoğunluğu yaklaşık % 60 civarındadır. Bu da parçada % 40 civarında boşluk olduğunu gösterir. Ön sinterleme sonrasında bu yoğunluk yaklaşık % 70'lere çıkar. Sinterlemeden sonra % 95-100 teorik sinterleme yoğunluğuna ulaşılır. Bu yoğunlaşma doğal olarak parçanın çekmesi ile meydana gelmektedir. Boşlukları yok etmek, başlangıç boyutlarının kısılması demektir. Parçanın çekmesi sinterlemede ana hedef olmasına rağmen, çekme ile parçada çarpılmalar meydana gelebilmektedir. Besleme stogundaki tozların yüksek paketleme yoğunluğu, sinterleme sırasında çekme miktarını ve çarpılmayı düşürür. Yüksek paketleme yoğunluğu daha fazla temas noktası sağladığından dolayı sinterlemede avantajdır. Sinterlemenin etkileri Şekil 3.5.'de görülmektedir. (Ersümer, 1993; German, 1997; Mutsuddy ve Ford, 1995; Yücel, 2007).

3.6.1. Katı Hal Sinterleme

Toz üretimi malzemeye enerji vermek suretiyle yüzey alanı veya yüzey enerjisi oluşturma işlemi olup, sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilmektedir. Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımlı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşmektedir. Diğer bir ifadeyle sinterlemede itici güç yüzey enerjisinin azalma eğilimidir. İtici güçler veya sinterleme gerilmeleri mikroyapıdaki eğriliklerden kaynaklanmaktadır. İtici güçlere tepki olarak mikroyapıda atom hareketleri meydana gelir. Yüksek sıcaklıklarda sıçrayan atomlar bazen parçacıkların birleşme yerlerine giderek yüzey alanını ve yüzey enerjisini azaltırlar. Diğer bir deyişle atom hareketleri sırasında, atomlar mikroyapıdaki boşlukları doldurmaktadır (German 1996).

Taşınım mekanizmaları, itici güçlere karşılık olarak kütle akışının nasıl olduğunu belirler. Yüzey taşınım mekanizmaları ve hacim taşınım mekanizmaları kütle akışının iki sınıfıdır. Aralarındaki fark atomların boyun bölgesini nereden doldurmaya başladıklarıyla ilgilidir. Yüzey taşınımında atomlar, boyun bölgesini, yakınındaki gözenek yüzeylerinden başlayarak doldurur. Hacim taşınımı ise tane sınırlarındaki atomları boyun bölgesinde yeniden konumlandırır. Şekil 3.7'de sinterleme esnasında itici güçlere tepki olarak oluşan

atom hareketleri gösterilmiştir. Şekilde 1 ve 2 numaralı oklar yüzey yayınımlarını, 3 ve 4 numaralı oklar ise hacim yayınımlarını temsil etmektedir. Yüzey taşınımı çekme veya yoğunluk artışı olmayan boyun büyümesini içerir. Birçok malzemenin düşük sıcaklıkta yapılan sinterlemede yüzey yayınımları baskındır. Hacim taşınım kontrollü sinterleme çekmeye neden olmaktadır. Kütle tane sınırından bazen de tane içinden gelir ve boyun yanındaki gözeneğin yüzeyinde toplanır. Hacim taşınım mekanizmaları hacim yayınımları, tane sınırı yayınımları, plastik akış ve viskoz akış içerir. Hem yüzey hem de hacim taşınım mekanizmaları boyun büyümesine neden olurlarken aralarındaki en önemli fark sinterleme esnasındaki yoğunluk veya çekmedir. Hacim taşınım mekanizmaları genelde yüksek sıcaklıklarda baskındır (German 1996).

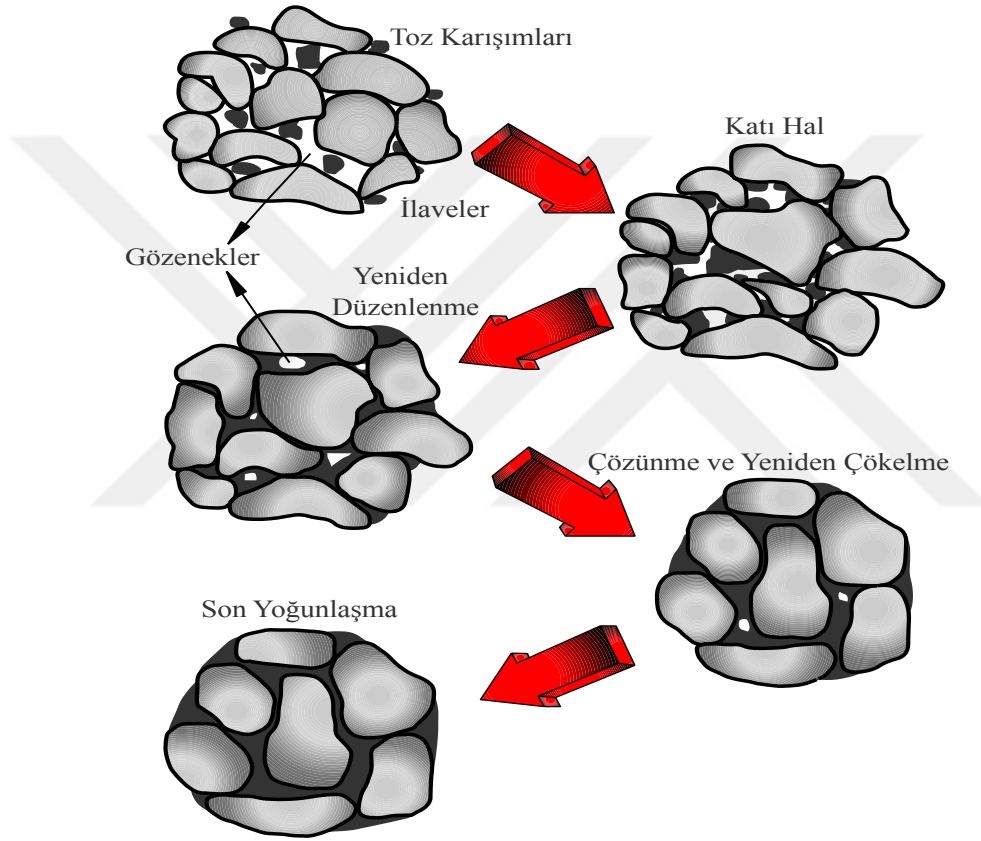


Şekil 3.7. Sinterlemede itici güçlere tepki olarak oluşan atom hareketleri. 1 numaralı ok yüzey yayınımlarını, 2 numaralı ok buharlaşma ve yoğunlaşmayı, 3 numaralı ok kütle difüzyonunu ve 4 numaralı ok hacim difüzyonunu temsil etmektedir (Thümmeler, Oberacker., 1993)

3.6.2. Sıvı faz sinterleme

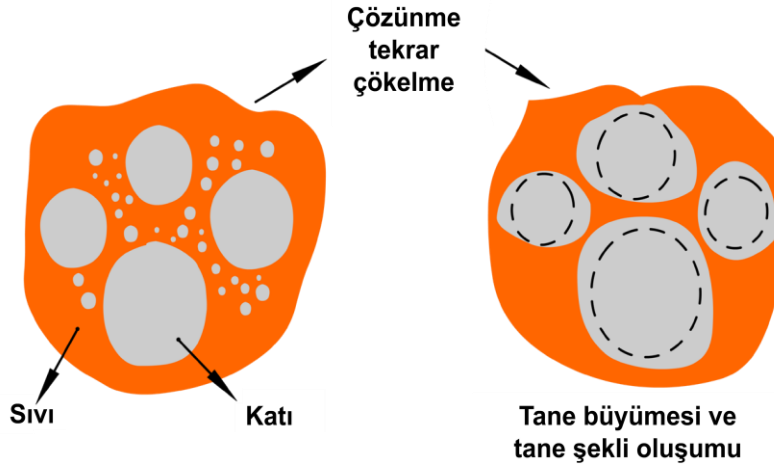
Sıvı faz sinterleme esnasında sıvı faz ve katı bir toz kümesi aynı anda bulunmaktadır. Genellikle sıvı faz sinterleme, parçacıklar arasında bağ oluşumunu ve sinterleme hızını büyük ölçüde arttırmaktadır. Sıvı fazın oluşturduğu kılcal çekim kuvvetleri sayesinde parçacıklar birbirlerini çekmekte ve herhangi bir basınç olmaksızın hızlı bir yoğunlaşma meydana gelmektedir. Oluşan sıvı faz, parçacıklar arasındaki sürtünmeyi azaltarak yeniden düzenlenmeyi hızlandırmaktadır. Parçacıklar arası bağlanmaya; mukavemet, süneklik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik ve korozyon direnci gibi gözenek yapısında ve parça özelliklerinde meydana gelen önemli değişiklikler eşlik eder (James 1985).

Geleneksel sıvı faz sinterlemede süreçler birbiri üzerine binen üç aşamada gerçekleşmektedir. Sıvı faz sinterlemede temel aşamaları ve mikroyapı değişimleri Şekil 3.8.'de şematik olarak verilmiştir. Başlangıçta, ısıtma esnasında taneler katı hal sinterleme ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar (German 1996).



Şekil 3.8. Sıvı faz sinterleme tekniğinde meydana gelen mikroyapısal değişimler (German 1996)

Yeniden düzenlenmeden sonra Şekil 3.9.'da şematik olarak gösterilen çözünme tekrar çökme aşaması gerçekleşir. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinde yayılır ve daha sonra büyük tanelerin üstüne çöker. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla önce küçük taneler sıvı faz içinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Sıvı faz sinterlemede son aşaması katı hal kontrollü sinterlemedir. Katı hal iskelet yapının varlığı nedeniyle bu aşamada yoğunlaşma yavaşlamaktadır (German 1996).

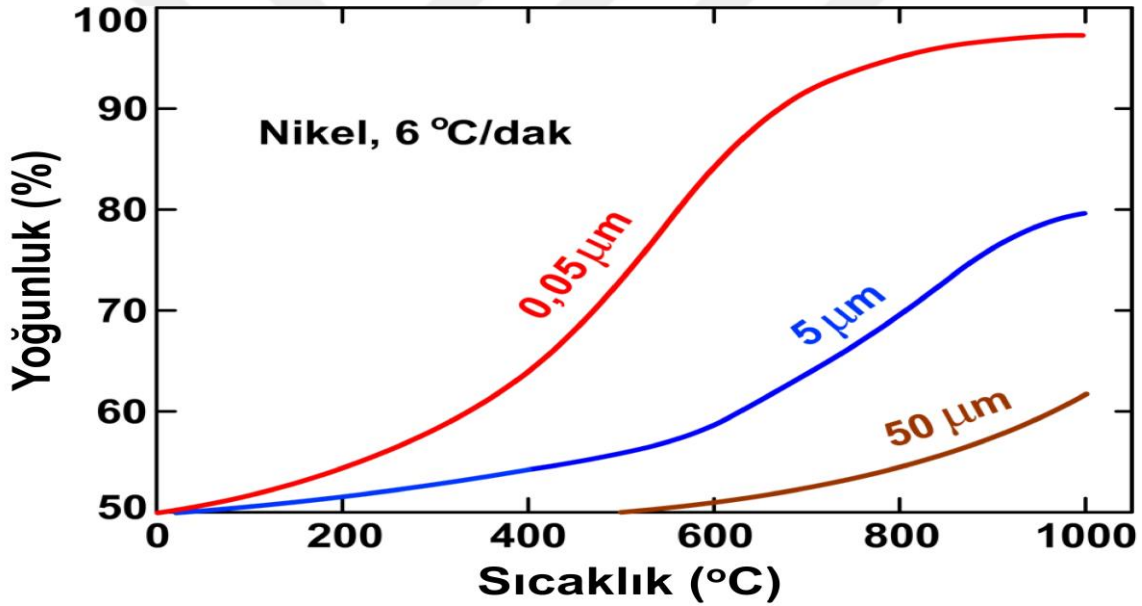


Şekil 3.9. Sıvı faz sinterlemede çözünme yeniden çökelme aşamasının şematik olarak gösterilişi (German 1996)

Sıvı faz sinterlemede birkaç farklı türü vardır. Süper solidüs sıvı faz sinterlemede bunlardan biri olup, bu sinterleme türünde karışım tozlar yerine önalaşım tozlar kullanılmaktadır. Alaşım tozlar her bir parçacıkta sıvı çekirdeklenmesi için solidüs ve likidüs eğrilerinin arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Sonuç olarak yarı katı parçacıklar yumuşar ve kılcak etkiden dolayı yeniden düzenlenme ile hızla yoğunlaşır. Oluşacak sıvının hacim oranı sıcaklık ve bileşim tarafından belirlenir. Bu işlem geniş ergime aralığına sahip sistemlere uygulanır ve büyük parçacıklar ile yüksek yoğunlaşma sağlandığı için çekicidir (German 1996). Sıvı faz sinterlemede farklı alternatiflerinden birisi de geçici sıvı faz sinterlemedir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip katı faz çözünme oranının yüksek olduğu durumlarda geçerli olan bu mekanizmada, şekillendirilmiş ham parça sinterleme sıcaklığına çıkartılırken sıvı faz oluşur ve oluşan sıvı faz, iç yayınmayla katı ergiye geçer ve alaşım oluşturarak yok olur. Parça sinterleme sıcaklığında bekletilirken sürecin sonunda oluşan, homojen bir katı eriyik veya iki veya daha fazla katı fazdan oluşan heterojen bir alaşım olabilir (German 1996). Tam yoğunluklu kompozitlerin üretimi ile ilgili diğer bir sıvı faz sinterleme seçeneği sinter döküm olarak da bilinen sıvı emdirmedir. Emdirme açık gözenek yapısına ve dış sıvı kaynağına dayalıdır. Düşük hızda ısıtma sırasında parçacık yapısı sinterlenir ve tepe sıcaklığa ulaşıldığında dışta sıvı oluşarak gözeneklere sızar. Bunun olabilmesi için sıvının temas açısının düşük olması gerekmektedir (German 1996).

3.6.3. Sinterleme parametreleri ve etkileri

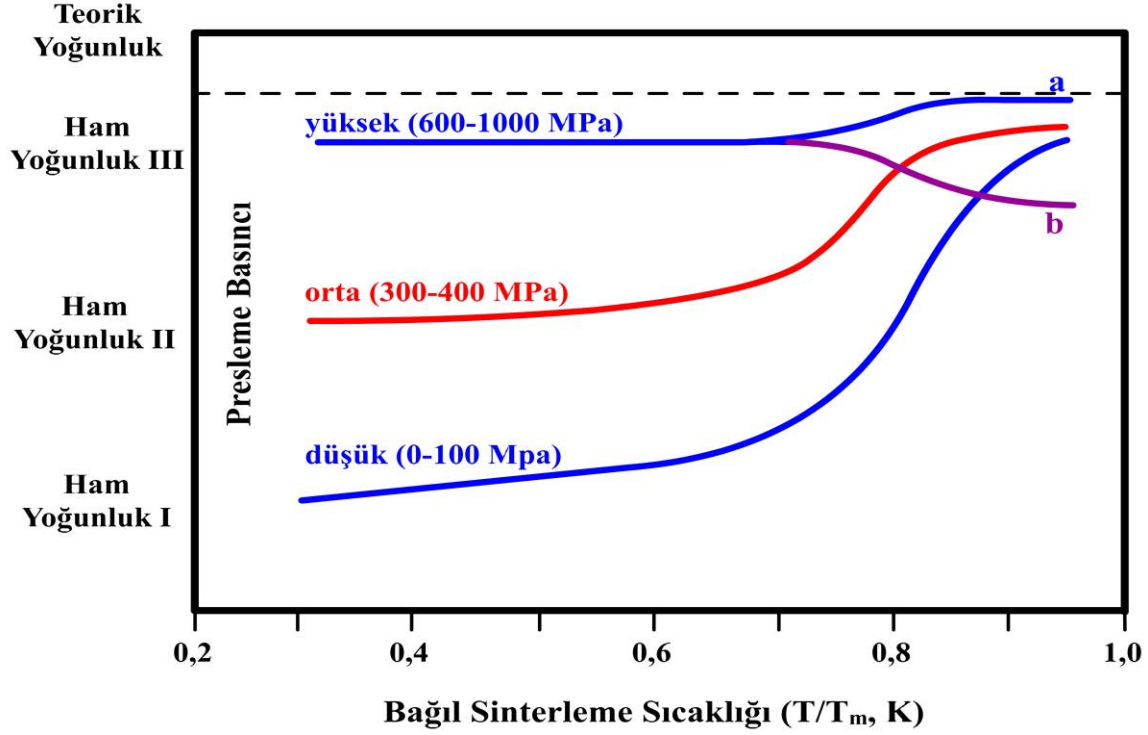
Birçok ham parçada sinterleme sırasında boyut, yoğunluk, mukavemet, sertlik, elektrik iletkenliği, ısıl iletkenlik, elastik modülü gibi özellik değişimleri olur. Bu değişimler üzerinde toz boyutu, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı, süresi ve ortamı gibi parametrelerin önemli etkileri vardır. Üretimde kullanılan tozun tane boyutunun sinterleme işlemi üzerinde etkileri vardır. Küçük parçacıklarda boyun bölgesinin doldurulması için daha az sayıda atom gerekir. Atomların hareket mesafesi daha kısadır ve sinterlemede itici güç olan gerilme daha büyüktür. Bunun sonucu olarak küçük boyutlu parçacıklar daha hızlı sinterlenirler. Bu durumu açıklamak için Şekil 3.10'deki farklı boyutlara sahip nikel tozlarının sabit ısıtma hızında sinterleme yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi örneğini vermek mümkündür (German 1996).



Şekil 3.10. Boyutları 50, 5 ve 0,05 µm olan nikel tozlarının sabit ısıtma hızında sinterleme yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi (German 1996)

Sinterleme işlemiyle sağlanacak yoğunlaşma miktarı üzerinde, şekillendirme esnasında uygulanan sıkıştırma basıncının etkisi vardır. Yüksek sıkıştırma basıncı, yoğunluğun ve parçacıklar arası temas boyutunun büyümesine yol açar. Sıkıştırma işlemi ham yoğunluğu arttırdığından, daha yüksek sinterleme yoğunluğuna ve daha az boyut değişimine yol açar. Sıkıştırma basıncının artırılması; daha iyi boyut kontrolü, daha az sinterleme çekmesi ve daha iyi özellikler sağlar (German 1996). Şekil 3.11'de farklı basınçlarla şekillendirilmiş ve dolayısıyla farklı ham yoğunluklara sahip olan parçaların sıcaklığa bağlı yoğunluk

değişimleri gösterilmiştir. Gümüş ve benzeri tozlarda olduğu gibi yüksek plastik deformasyona müsaade eden çok ince tozlarda, çok sıkı kapalı gözeneklerde hapsolan yüksek basınçlı gazlar sinterleme ile birlikte hacimsel genişleme gösterebilir. Bu ve benzeri durumlarda düşük basma gerilmesi kullanılmalıdır (Thümmeler 1993).



Şekil 3.11. Değişik presleme basınçlarıyla şekillendirilen farklı ham yoğunluktaki parçaların sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi (Thümmeler 1993)

Sinterleme işlemi, tek bileşenli sistemlerde metalin mutlak ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yapılırken; birden fazla bileşenli sistemlerde genellikle ergime sıcaklığı en düşük olan bileşenlerin ergime sıcaklığının üzerinde yapılmaktadır. Sinterleme sıcaklığı parçayı oluşturan ana malzemenin ergime sıcaklığının %70-80'i arasında olurken, bazı refrakter malzemeler için ergime sıcaklığının %90'ına çıkılabilir (German 1996). Sinterleme sıcaklığı ile sinterleme süresi arasında önemli bir ilişki olup, süre kısaltılmak isteniyorsa sinterleme sıcaklığının artırılması gerekmektedir.

Sinterleme işlemi sinterlenecek parça türüne bağlı olarak farklı atmosferler altında gerçekleştirilebilir. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Oksitleyici atmosferler: Hava, CO₂ ve H₂O,
- Redükleyici atmosferler: H, Metan CH₄ ve amonyak, CO,
- Vakum, helyum, argon ve azot içeren atmosferler,
- Nitrürleyici atmosferler: Amonyak (Wilyman, 1985).

3.6.4 Son İşlemler ve Kalite Kontrol

TEK prosesi ile üretilen parçalar her zaman tam bir son ürün olarak çıkmayabilir. Nihai ürün üzerinde bazen çapak gibi kalıntılar da oluşabilir. Meydana gelen bu istenmeyen durumlardan kurtulmak için veya malzeme özelliklerini arttırmak için ikincil işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. İkincil işlemler; sinterleme sonrası yapılan çapak alma, zımparalama, talaş kaldırma gibi yüzey işlemleri ile tekrar kalıplama ve ısıl işlem gibi mekanik özellikleri artırma operasyonlarından oluşur (Gülsoy, 2003).

3.6.5 Toz Enjeksiyon Kalıplama Teknolojisinin Uygulama Alanları

Toz enjeksiyon kalıplama teknolojisi çok geniş bir yelpazeye sahip uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Tablo 3.2.). Bu uygulama alanlarındaki üretim hacimleri 10.000 (off-shore endüstrisi için civatalar gibi yüksek katma değerli parçalar) ile günde 60.000 adet (mikrodişliler gibi yüksek sayıda üretilen parçalar için) arasında değişmektedir. Üretilen parçalar genellikle 1 ile 100 g arasında değişmekte, fakat daha küçük parçalar (0,2 g) veya 1 kg üzerindeki daha büyük parçalar da üretilebilmektedir (Vervoort, Vetter, Duszczyk, 1996). Şekil 2.15'te farklı uygulama alanları için TEK ile üretilmiş bazı parçalar görülmektedir.

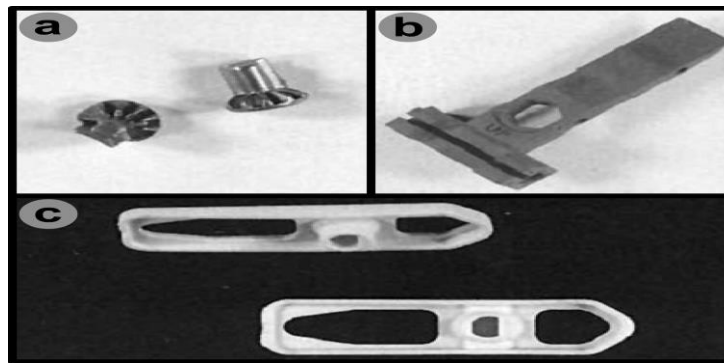
Tablo 3.2. Toz enjeksiyon kalıplama yönteminin uygulama alanları (Vervoort ve diğ., 1996)

Elektronik endüstrisi	* Soğutucular, elektronik paketler * Baskılı devreler * Elektromanyetik bileşenler
Ofis donanımı	* Yazıcı ucu * Daktilo tilt yüzüğü
Makine mühendisliği	* Dokuma makinesi bileşenleri
Eğlence endüstrisi	* Kamera bileşenleri * Saatler için kasa, kelepçe ve dişliler * Ziyet eşyası
Küçük silahlar	* Nişangâh parçaları * Şarjör kilidi
Tıp/dişçilik	* Braketler (diş teli) * İmplantlar
Otomotiv endüstrisi	* Hava yastığı bileşenleri
Takımlar	* Matkap uçları
Ev aletleri	* Elektrikli diş fırçaları için mikro
Hassas döküm	* Maçalar



Şekil 3.12. Farklı uygulama alanlarında TEK ile üretilmiş parçalar; a) Piston soğutma nozülü, b) Otomobil şanzıman parçaları, c) Otomobil kilit sistemi parçaları, d) Otomobil ve kamyonlar için bağımsız ısıtma sistemleri için yanma odası, e) Turbo yükleyici parçaları, f) Koltuk arkılığı ayarı için burç, g-h-i) Kavrama kolu parçaları, i) Turbo yükleyici ayarlama yüzüğü, j) Sensor muhafaza parçaları, k) Mekanik direksiyon ayağı ayarı için kayan blok (Whittaker 2007).

TEK ile üretilen parçalar iki kategoriye ayrılabilir. Birinci kategoride büyük miktarlarda üretilen düşük değerli (maliyet olarak) parçalar yer alır ki, üretilen parça sayısı yılda 50.000 adetten başlayıp milyonlarca adedi bulabilir. Bu parçalar genellikle paslanmaz çelik (316L, 304), karbon çelikleri (Fe_2Ni , Fe_8Ni), Al_2O_3 , ZrO_3 ve ferrit gibi normal yapı malzemelerinden üretilirler. Üretilen parçaların karmaşık geometrik şekilleri, geleneksel presleme ve sinterleme tekniklerinin uygulanmasına müsaade etmediğinden ve yüksek miktarda üretim yapılacağından geleneksel talaşlı imalat ve hassas dökümle karşılaştırıldığında %50'nin üzerinde ekonomik kazanç sağlar. Üretim, genellikle günde 1.000 ile 60.000 arasında parça imal edilmesini mümkün kılan yarı veya tam otomatik üretim hattında gerçekleştirilir. Bu gibi parçalara örnek olarak Şekil 3.12.a'da gösterilmiş olan elektrikli diş fırçaları için üretilmiş olan mikro dişli verilebilir. Geleneksel naylon dişli kabul edilebilecek sınırların üstünde aşınma sergilediğinden şekildeki dişli 17-4-PH paslanmaz çelikten üretilmiştir. Bu mikro dişlinin üretiminde günde 60.000 parça üretilmesini sağlayan 16 boşluktan ve 4 sıcak yolluktan oluşan kalıp kullanılmıştır. Bu kategorideki parçalara bir diğer örneği disk sürücüsü parçaları teşkil eder. Önceleri büyük ve 800 mg gelen bu parça TEK'in olarak tanıdığı özel tasarım sayesinde 150 mg'a düşmüştür. Sinterleme sonrası parçalar elektrolitik olarak 6-8 μm 'luk bir kaplamayla kaplanırlar. Bu kategorideki parçalara bir başka örnek, daha büyük bir parça olan Şekil 3.12.b'deki nişangâh levhasıdır. Böyle bir parçanın toplam üretim hacmi genellikle 50.000 adettir. Bu kategorideki parçalar için toleranslar genellikle %0,3 mertebelerindedir (Vervoort ve diğ., 1996).



Şekil 3.13. Toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş ürünler; a) Elektrikli diş fırçaları için mikro dişli, b) 10 g ağırlığındaki nişangâh levhası, c) Dokuma makineleri için zirkonya iplik kılavuzu (Vervoort ve diğ., 1996).

İkinci gruptaki parçalar düşük miktarlarda (toplam üretim 10.000 adet) bile ekonomik olarak üretilen yüksek katma değerli parçalardır. Bu parçalar ya SiC, BC, WC-Co gibi çok sert

malzemelerden ya da sadece T/M teknikleriyle üretilebilen malzemelerden (refrakter metaller, özel alaşımlar) üretilirler. Her iki durumda da ömrünü doldurana dek kullanılmayacak olan pahalı bir kalıp için yapılacak olan yatırım kabul edilebilir. Bu kategoriye off-shore endüstrisi için üretilen yüksek korozyon dayanımlı parça örnek olarak gösterilebilir. Önceleri biri presle diğeri ise talaşlı imalatla işlenerek hazırlanmış iki parçanın kaynakla birleştirilmesinden oluşan bu parça sonraları yeniden dizayn edilerek sadece TEK kullanılarak üretilebilmiştir. Yüksek katma değerli olmasında dolayı bu parçanın az bir miktar olan yıllık 3.000 adetlik üretimi bile kazançlı olmuştur. Bir diğeri örnek Şekil 3.12.c’de gösterilmiş olan dokuma makineleri için seramik bir iplik kılavuzudur. Bu parçanın talaşlı imalatla üretilen metal bir iplik kılavuzunun maliyetiyle rekabet edebilir olmasının yanında, aşınmaya karşı dayanıklı olması ve iplik üzerindeki yükü azaltması da gerekir. Bu beklentileri sadece TEK ile ekonomik olarak üretilebilen zirkonyadan yapılmış bir iplik kılavuzu karşılayabilir. Bu ikinci kategorideki parçalar %0,1 kadar küçük toleranslarla üretilebilirler (Vervoort ve diğ., 1996).

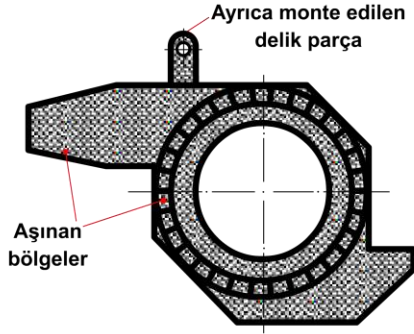
TEK yönteminin dövme ve hassas döküm yöntemlerine tercih edilmesinin nedenine yönelik olarak yapılmış olan bir incelemeye ait bulgular Tablo 2.6’da verilmiş olup, buradan TEK’in birçok malzeme özelliğinde diğeri yöntemlerden daha üstün özellikler elde edilmesini sağladığı görülmektedir.

Tablo 3.3. Şekil 3.11’de (g-h-ı) gösterilmiş olan kavrama kollarının üretimini yapan bir şirketin, TEK yönteminin talaşlı imalat ve hassas döküm yöntemlerine tercih edilmesinin nedenine yönelik yaptığı bir analizin sonucu (Whittaker 2007)

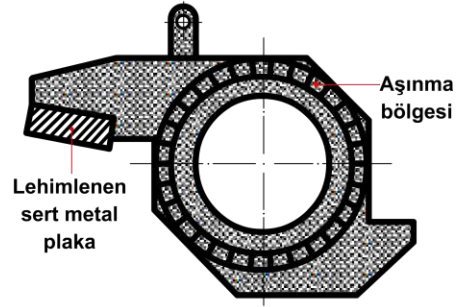
Malzeme Özellikleri	Dövme	Hassas döküm	TEK
Yoğunluk (Dövme=100)	100	100	96
Çekme mukavemeti	100	90	83
Uzama	100	75	60
Sertlik	100	98	86
Şekil Serbestliği	Düşük	–	Yüksek
Yüzey pürüzlülüğü	Pürüzlü ~50	5–20	Pürüzsüz 3–10

Minimum et kalınlığı (mm)	3	2	0,5
Minimum delik çapı (mm)	1	2	0,5
Boyutsal hassasiyet (mm)	±1,0	± 0,2	± 0,05
Silindirik kanal yüzeylerinin şekillendirilmesi	Talaşlı işlem	Talaşlı işlem	Kalıplama
Kavrama kolu maliyeti	100	50	42

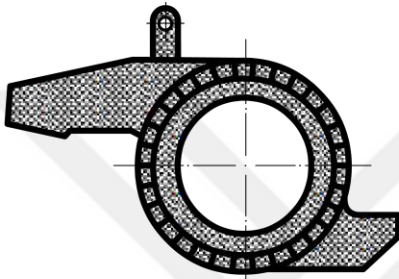
Her iki kategori için de entegre tasarım önemli bir konudur. Farklı birkaç parçanın bir araya gelmesinden oluşan bir sürü parça, TEK yöntemi ile bütün bir parça olarak üretilebilirler. Şekil 3.13'te entegre bir dizayn için tipik bir örnek gösterilmiştir. Parça, merkezindeki büyük delik etrafında dizilmiş dişler içermektedir. Tepe bölgesindeki küçük delikli kısım ayrı bir parça olup ana parçaya vida ile bağlanmıştır. Başlangıçta bu parça takım çeliğinden talaşlı imalat ile üretilmekteydi. Bu şekilde üretilmesi pahalı olmakla birlikte temas eden yüzeylerde ve dişlerde büyük ölçüde aşınmalar görülmekteydi (Şekil 3.12.a). Parça özelliklerini geliştirmek amacıyla ilk teşebbüs bir sert metal plakanın yüzeye lehimlenmesi olmuş (Şekil 3.12.b) fakat dişlerdeki aşınma devam etmiştir. Sonraki adım parçayı TEK yöntemiyle sert metalden (WC-Co) üretmek olmuştur. Bazı keskin köşelerin yuvarlatılması hariç parçanın orijinal tasarımı korunmuştur (Şekil 3.12.c). Parçaya tepedeki küçük delikli bölümün montesi için vida dişlerinin de kalıplanması gerekliliği ve et kalınlığındaki radikal farklılıklar (özellikle kam ile temas eden silindirik kısım) sinterleme sonrası problemlere yol açmıştır. Bu sorunların üstesinden gelinebilmesi için Şekil 3.13'te gösterilen dizayn geliştirilmiştir. Kalınlıktaki değişimler derece derece yapılmış ve tepedeki küçük delikli kısım entegre hale getirilmiştir. Sonuç olarak üç aşamada TEK parçası için uygun dizayn geliştirilmiştir. Bu parçanın talaşlı imalat ile üretilen parçanın yerini alması, aşınma direncini arttırmakla birlikte üretim maliyetini de düşürmüştür (Vervoort ve diğ., 1996).



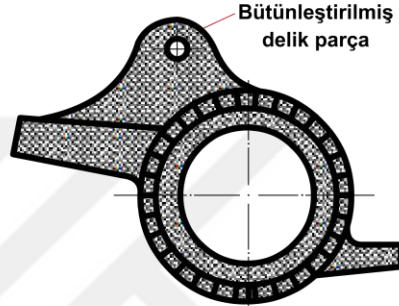
a) Takım çeliğinden talaşlı işlem ile üretilen ve yüksek miktarda aşınma sergileyen orjinal parça



b) Aşınma dayanımı sert metal plaka ile geliştirilen talaşlı imalatla üretilmiş parça



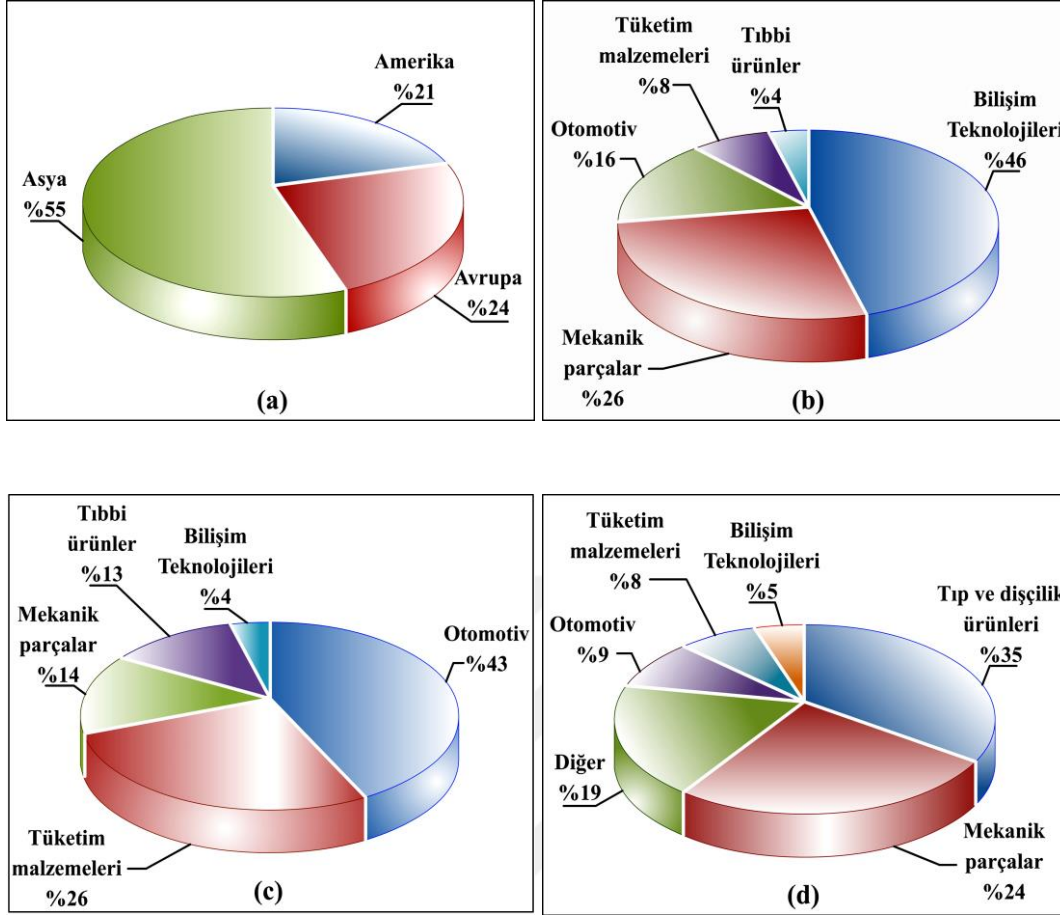
c) WC-Co'tan orjinal dizaynı neredeyse hiç değiştirilmeden toz enjeksiyon kalıplama ile üretilen parça



d) WC-Co'tan üretilen TEK parçası için, delikli parçanın entegre edilmiş olduğu final dizayn.

Şekil 3.14. Bir iplik kılavuzu parçasına uygulanan entegre dizayn örneği (Vervoort ve diğ., 1996)

Yukarıdaki açıklama ve örneklerden TEK'in çok geniş bir malzeme yelpazesinden (neredeyse tüm malzemelerden) çok geniş bir şekil yelpazesinde karmaşık şekilli parça üretimini mümkün kıldığı açıkça anlaşılmaktadır (Vervoort ve diğ., 1996). Şekil 3.14'de toz enjeksiyon kalıplama uygulamalarının bölgesel konsantrasyonları verilmiştir.



Şekil 3.15. Toz enjeksiyon kalıplama uygulamalarının bölgesel konsantrasyonları; a) Dünya (Whittaker 2007), b) Asya (2008 verilerine göre), c) Avrupa (2010 verilerine göre), d) Kuzey Amerika (2010 verilerine göre) (<http://www.piminternational.com/aboutpim>)

Tablo 3.4. Sinterleme işlemi etkileri (German, 1996).

Değişimler	Etkileri
Toz Boyutunun Düşmesi	Daha hızlı sinterleme Daha yüksek maliyet Artan zararlar
Zamandaki Artış	Daha yüksek maliyet Tane büyümesi Verimlilik azalması
Sıcaklığın Artması	Daha fazla çekme Tane büyümesi Daha yüksek maliyet Yüksek özellikler Sınırlı fırınlar ile çalışma Daha yüksek sinterleme sıcaklığı Boşlukların büyümesi
Ham Yoğunluğun artması	Daha az çekme Daha küçük boşluklar Uniform boyutlar Daha yüksek mukavemet Homojenlik problemleri
Katkıların Artması	Daha az çekme Daha küçük boşluklar Uniform boyutlar Daha yüksek mukavemet Homojenlik problemleri
Sinterleme katkılarının kullanılması	Gevreklik Daha hızlı sinterleme Çarpıklık Tane daha düşük sinterleme sıcaklığı

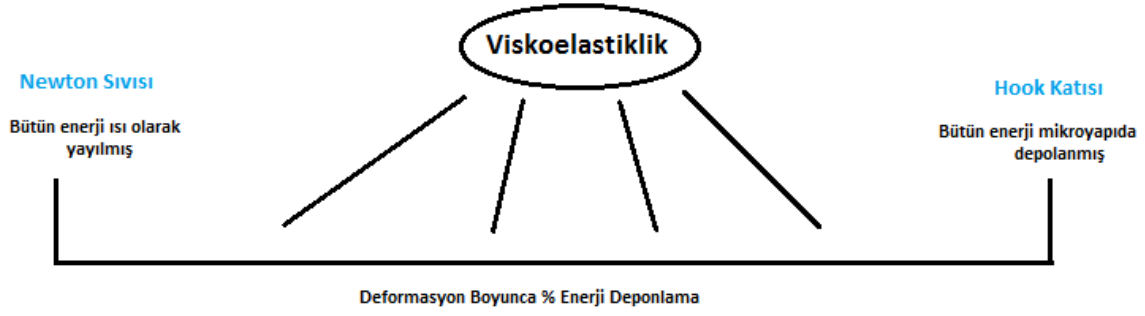
3.7. Toz-Bağlayıcı Karışımının Reolojik Özellikleri

3.7.1. Temel Reoloji

Reoloji, maddenin deformasyonunu (şekil değiştirmesini) ve akışkanlığını inceleyen bilim dalıdır 1929 yılında Amerikan Reoloji Birliği tarafından bu şekilde kabul edilmiştir. Reoloji terimi, Indiana Lafayette College profesörü Bingham tarafından oluşturulmuştur. Anlamı, maddelerin akış ve deformasyonu üzerine olan çalışmadır. Rheos (iş) ve logos (bilim) kelimelerinden oluşan reoloji terimi sıvıların akış, katıların deformasyon özelliklerini tanımlamaktadır. Gazlar ve sıvılar kuvvet uygulandığı zaman akar, katılar ise deforme olurlar. TEK'in üretim aşamasında kullanılan maddelerin karıştırılmasında ve akış özelliklerinin incelenmesinde reolojinin önemi büyüktür. Toz-bağlayıcı karışımının kalıba basılabilirliği reolojik özelliklerine bağlıdır (Uygun, 2011).

Viskozite, bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite arttıkça direnç de artar. Paralel molekül tabakalarından oluşmuş, yüzeyi 1 cm^2 ve yüksekliği 1 cm olan "blok" (bir deste kart gibi) bir sıvı düşünülüp, tabakaların en alt yüzeyinin sabit olduğunu kabul ediliirse; en üstteki sıvı tabakası sabit bir hızla (1 cm/sn) hareket ettirildiğinde, diğer bütün tabakalar, en alttaki sabit tabakaya uzaklıkları ile orantılı bir hızla hareket edecektir. Her tabakanın farklı ivmesi olacaktır. Sıvının iç sürtünmesine bağlı olarak da, kuvvetin uygulandığı tabakaya yakın olan tabakalar hızlı, uzak olanlar yavaş hareket edeceklerdir. Sıvı blogunun sabit olan alt tabakasının yerinde durabilmesi için uygulanan F kuvvetine ters yönde ve eşit değerde bir kuvvete ihtiyaç duyulacaktır. F kuvveti bir gerilim meydana getirecektir. Kuvvetin uygulandığı sıvı yüzeyinin alanı A ve hareketi baslatmak için gereken kuvvet de F ise, birim alana düşen kuvvet F/A olacaktır. Buna kayma gerilimi denir. Bu gerilim düzlemlerin yer değiştirmesine de neden olur. Bu yer değiştirmede, düzlemler arasındaki akışa dik yöndeki uzaklığa x , düzlemlerin kayma hızına da v denirse; dv/dx kayma hızı oranı veya kayma deformasyonunun değişme hızıdır. Buna biçimsel değişim çabukluğu (oranı) da denir (Uygun, 2011).

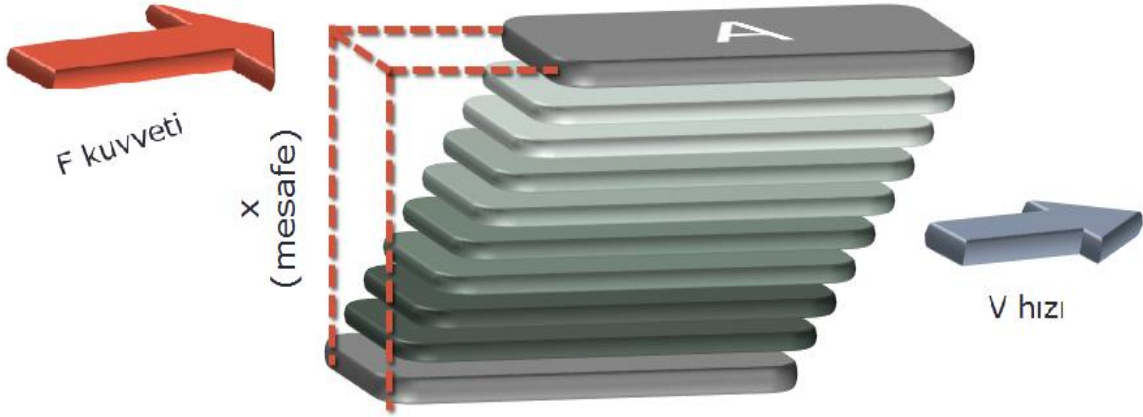
Kalıplamada en önemli özellik viskozitedir. Viskozite değerinin optimum koşulların altında ya da üzerinde olması kalıplamayı zorlaştırır. Diğer önemli bir özellik ise elastikiyettir. Katı ve sıvılar, bir kuvvet uygulandığında farklı tepkiler göstermektedirler. Katıların davranışı, 1678'de Robert Hooke'un Elastisite Teorisi ile açıklanmıştır. Bunun yanı sıra sıvıların davranışı ise 1687'de yayımlanan Isaac Newton'un Principia'sı ile öngörülmüştür. Toz ve bağlayıcı karışımı olan besleme stoklarının viskozitesi ile elastikiyet özellikleri birlikte görülür. Bu özelliğe viskoelastisite denir (Apostolidis, 2015; Barrie, 2004).



Şekil 3.16. Kayma altında malzemelerin klasik davranışları (Barrie, 2004)

Hareket halindeki bir sıvı tabakalarının birbirleri arasında akmaya karşı gösterdiği direnç “viskozite” olarak tanımlanmaktadır. Viskozite değeri arttıkça akma direnci de artmaktadır. Viskozite kavramına şu şekilde açıklık getirilebilir:

Yüzeyi birim cm^2 ve yüksekliği birim cm olan birbirine paralel molekül tabakalarından oluşmuş bir blok şeklindeki sıvı olarak düşünülebilir (Şekil 3.17). Tabakaların en alttaki yüzey hareketsiz olarak kabul edilirse, sıvı tabakasının en üst yüzeyi sabit hızla (1 cm/sn) hareket ettiği sırada aradaki tabakalar, en alt yüzeydeki hareketsiz tabakaya mesafeleri ile orantılı bir hızla birbirleri üzerinde kayarlar. Her bir tabaka farklı ivmeye sahiptir. Sıvının iç sürtünmesine bağlı olarak, kuvvetin uygulandığı yüzeye yakın olanlar hızlı, uzak olanlar ise daha yavaş hareket edeceklerdir. Sıvının sabit olan en alt yüzeyinin yerinde kalabilmesi için uygulanan F kuvvetine eşit değerde ve ters yönde bir kuvvete ihtiyaç duyulacaktır. Bu kuvvet sıvıda bir gerilme meydana getirecektir. Kuvvetin uygulandığı sıvı yüzeyinin alanı A ve hareketi başlatmak için gereken kuvvet F ise, birim alana düşen kuvvet F/A şeklinde olacaktır. Düzlemlerin yer değiştirmesine neden olacak bu gerilme 'kayma gerilmesi (shearing stress)' olarak adlandırılır. Düzlemler arasındaki akışa dik yöndeki uzaklığa x , düzlemlerin kayma hızına da v denilirse dv/dx kayma hızı (shear rate) meydana gelecektir (Çelik, 2009; Walters, 1993).



Şekil 3.17. Birbirine paralel molekül tabakalarından oluşmuş bir sıvı bloğu (viskozluk modeli)

Her bir tabakanın ayrı ayrı olarak birbirlerine göre hareketlerini durduran kuvvete 'sıvıların iç sürtünmesi (mutlak viskozite, dinamik viskozite)' denilmektedir. Farklı türdeki sıvıların viskozitesi bu sıvıların iç sürtünme kuvvetlerinin bir ifadesi olarak tanımlanmaktadır. Isaac Newton, sıvıların akış özelliklerini

- Newtonian akış gösterenler
- Newtonian olmayan akış gösterenler, olmak üzere iki sınıfa ayırmıştır.

3.7.2. Newtonian Akış Davranışı

Newtonian akış gösteren sistemlerde viskoz akış, kayma gerilmesi (shear stress) (Denklem 1) ve kayma hızına (shear rate) (Denklem 2) bağlıdır. Kayma hızı ($\dot{\gamma}$), kayma gerilmesi (τ) ile orantılı olarak artmaktadır. Bu orantının sabiti ise viskozite (η) (Denklem 3) katsayısını gösterir (Çelik, 2009; Walters, 1993).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

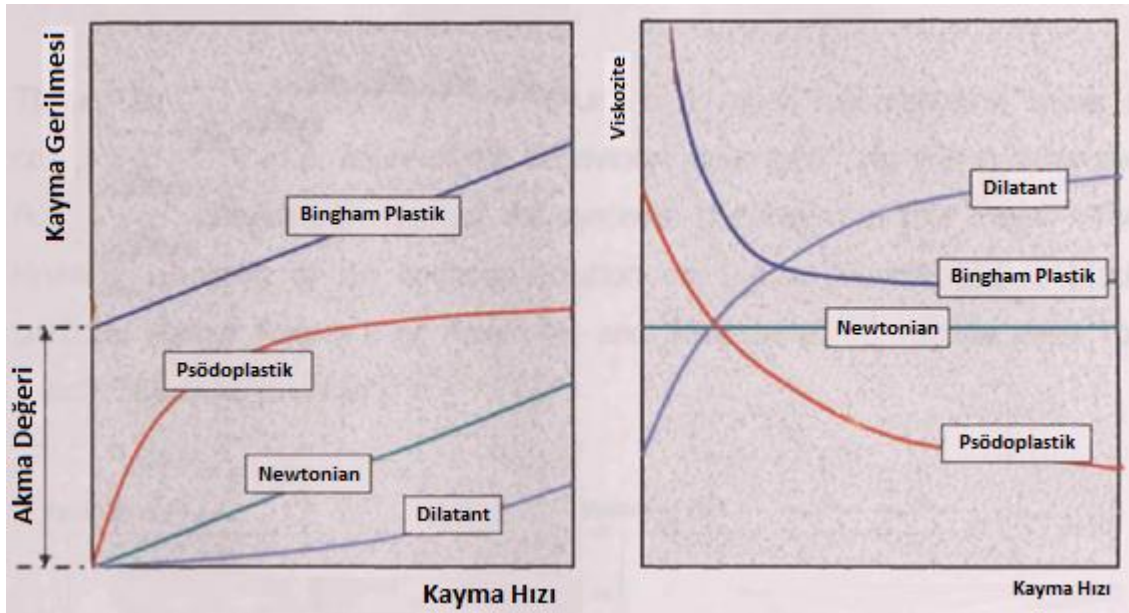
$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

Viskozitenin birimi santimetre-gram-saniye sisteminde poise (P) (g/cm.sn)'dir. Çoğunlukla santipoise (cP) kullanılmaktadır. Uluslararası birim sisteminde (SI) ise pascalsaniye (Pa.s) (N/m²)'dir ve daha çok binde biri olan milipascalsaniye (mPa.s) kullanılmaktadır. Bazı yaygın olarak bilinen malzemelerin oda sıcaklığındaki yaklaşık viskozite değerleri Tablo 3.5'de gösterildiği gibidir (Çelik, 2009; Walters, 1993).

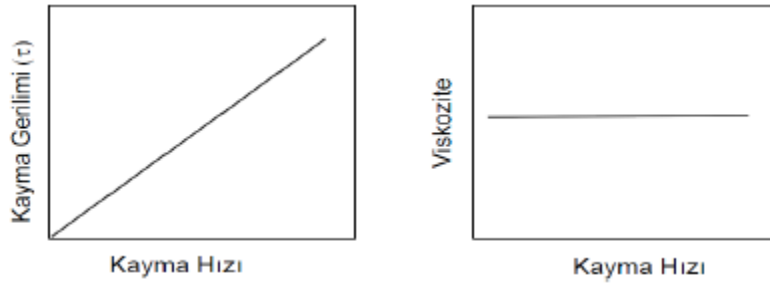
Tablo 3.5. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin viskozite değerleri (Barrie, 2004)

Malzeme	Viskozite Değeri (Pa.s)
Hava	10 ⁻⁵
Su	10 ⁻³
Zeytin Yağı	10 ⁻¹
Gliserol	10 ⁺⁰
Eriyik Polimer	10 ⁺³
Asfalt	10 ⁺⁸

Kayma gerilmesine (τ) karşı kayma hızı ($\dot{\gamma}$) grafiğe geçirilerek “reogram” adı verilen akış eğrisi elde edilir. Şekil 3.16’de reogramda Newtonian ve Newtonian olmayan sistemlere ait akış eğrileri gösterilmektedir. Newtonian akışkanlar reogramda orijinden geçen bir doğru sergiler. Birçok polimer ve besleme stokları karmaşık davranış gösterdiğinden dolayı TEK sistemleri için Newton akış kavramı uygun değildir (Barrie, 2004; Çelik, 2009; Walters, 1993).



Şekil 3.18. Akış davranış türlerinin akış eğrileri (Barrie, 2004)



Şekil 3.19. Newtoniyen Davranışa Ait; (a) Akış Eğrisi, (b) Viskozite Eğrisi (Uygun, 2011)

3.7.3. Newtonian Olmayan Akış Davranışı

Newtonian akış göstermeyen sistemler, diğer akış tipi olan Newtonian akış eşitliğine uymazlar ve kayma gerilimi kayma hızının üstel değeri ile değişir. Bundan dolayı viskozite değerleri de kayma hızına bağlıdır. Süspansiyonlar, polimerler, emülsiyonlar, merhemler, losyonlar vb. malzemeler bu tür sistemlere örnek malzemelerdir. Newtonian olmayan sıvıların akış davranışları geniş bir yelpaze aralığında bulunabilir ve en temel akış eğrileri şu şekilde üç sınıfa ayrılır:

- Plastik akış
- Psödoplastik akış
- Dilatant akış

Besleme stoklarının enjeksiyon kalıplama koşulları altındaki davranışlarını incelemek için, akış davranış indeksi (n)'nin hesaplanması gerekmektedir. Denklem 4'deki eşitlikte $\dot{\gamma}$ kayma hızı, τ kayma gerilmesi, n akış davranış indeksi ve K sabittir. “n” değeri, kayma hızına göre viskozitenin hassasiyetini gösterir.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

n >1 ise dilatant akış, n<1 ise psödoplastik akış ve n=1 ise Newtonian akış davranışı sergilemektedir (Çelik, 2009; Walters, 1993; Bilketaş, 2017).

3.7.3.1. Plastik Akış (Bingham Akış)

Birçok polimer ve TEK karışımları düşük sıcaklıklarda bir çekme noktası gösterir. Kesme kuvvetinin, viskoz akışı başlatabilmesi için çekme kuvvetini aşması gerekir. Bu tür sistemler Plastik Akış (Bingham akış) olarak adlandırılır. Kayma gerilmesi, belli bir eşik değerine (yield value) ulaştığında akma gerçekleşir. Eşik değerine geldiğinde molekülerleri Van der

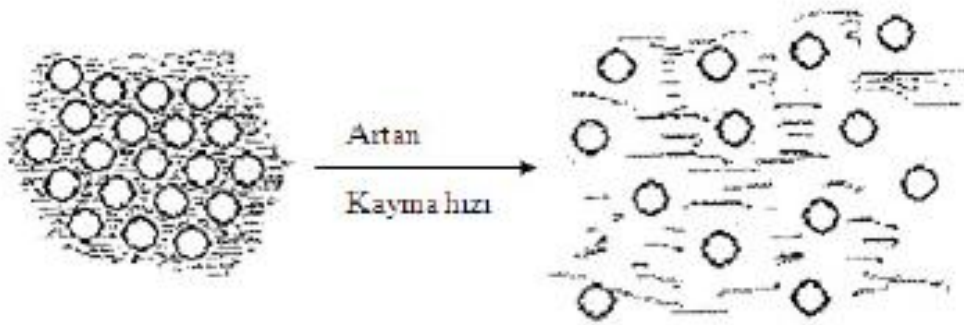
Waals bağları kopar. Plastik akış eğrisi orijinden geçmez ve önce eğri, daha sonra doğru şeklindedir (Şekil 3.17). Bu akış türü, eşik değeri altındaki gerilmelerde elastik bir madde gibi davranış sergiler ve bu değeri geçtikten sonra kayma gerilmesindeki artma, kayma hızı ile orantılı olarak artış gösterir. Bu eşik değerini geçtikten sonra akış, Newtonian akış türü gibi davranış gösterirler (Barrie, 2004; Çelik, 2009; Walters, 1993; Bilketay, 2017).

3.7.3.2. Psödoplastik Akış (Yalancı Plastik Akış)

Psödoplastik akış, Bingham akışın aksine eşik değerine sahip değildir. Psödoplastik bir malzemenin viskozitesi tek bir nokta ile ifade edilemez ve viskozitesi kayma hızı arttıkça azalmaktadır. Kalıplama esnasında toz-bağlayıcı ayrışması (sedimentasyon) olağan olduğundan TEK'de bu durum arzu edilmez. Bu akışın reogram eğrisi orijinden başlar. Psödoplastik akış Denklem 4'de tanımlanan eşitlikte n akış indeksi 1'den az ise malzeme incelme (shear thinning) göstererek psödoplastik özellik sergiler (Barrie, 2004; Çelik, 2009; Walters, 1993; Bilketay, 2017).

3.7.3.3. Dilatant Akış

Dilatant akış, psödoplastik akışın aksi bir davranış sergilemektedir. Artan kayma gerilmesi ile viskozitede artmaktadır. (Şekil 3.19). Ortamın karıştırılması ile hız gradyanı artar ve akışa karşı dirençte beraberinde artarak ortam koyulaşır. Denklem 4'deki eşitlikte n değeri her zaman 1'den büyüktür (Barrie, 2004; Çelik, 2009; Walters, 1993; Bilketay, 2017).



Şekil 3.20. Dilatant akış mekanizmasının sekilsel gösterimi (Çelebi, 2007).

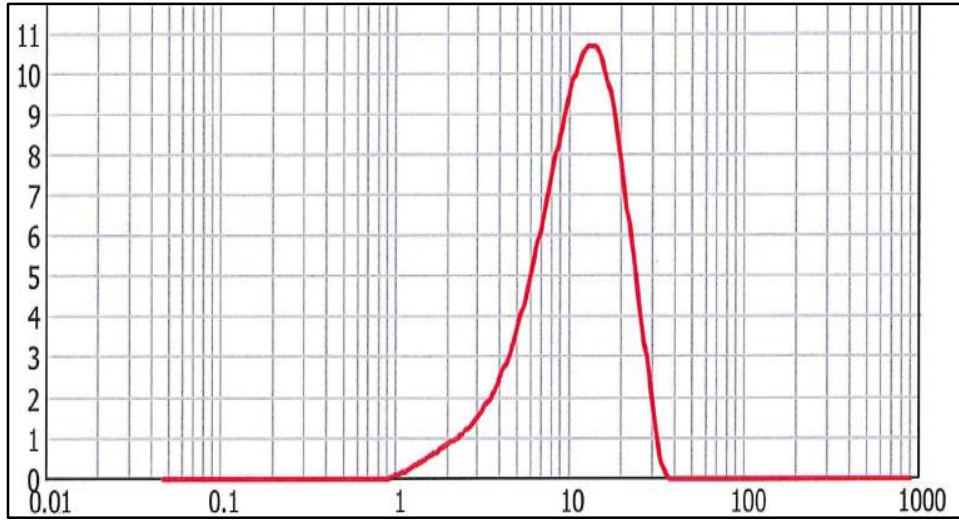
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

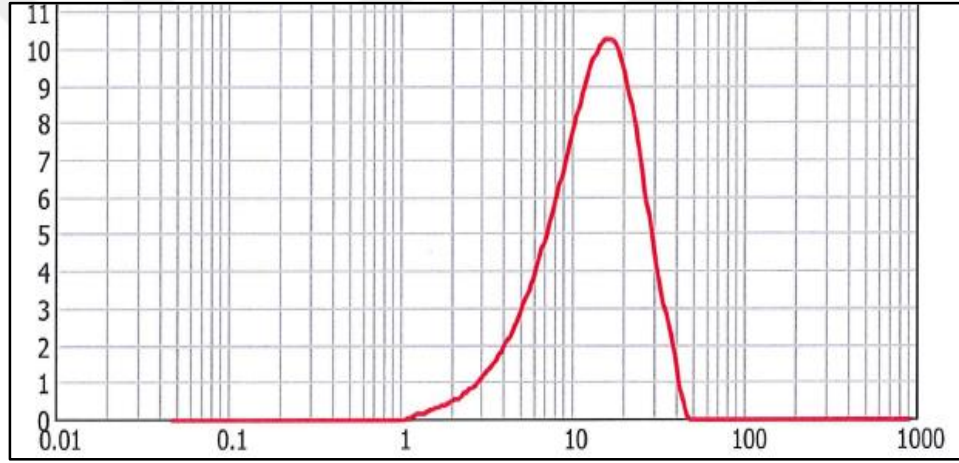
Bu çalışmada TEK’de, kalıplama, bağlayıcı giderme gibi durumlarda oluşan sorunların kaynağı olan toz-bağlayıcı karışımlarının reolojik davranışı incelenmiştir. Toz ve bağlayıcılar temin edilmiş, laboratuvar imkânları kullanılmıştır. Kobalt tozları ve bağlayıcı olarak parafin mumu, carnauba mumu, polipropilen ve stearik asit kullanılmıştır.

4.2. Malzeme

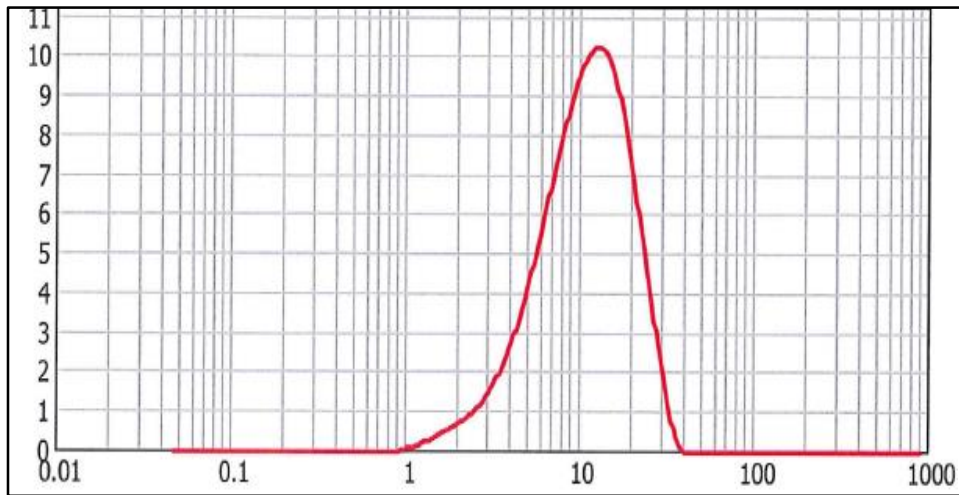
Bu tez çalışmasında, kobalt esaslı tozlardan Stellite-6, Co-212-C ve Fe50Co0,2Si tozları Sandvik Co. firmasından temin edilmiş ve kullanılmıştır. Ölçümler Malvern Mastersizer ile yapılmıştır ve sonuçlar Sandvik firmasından temin edilmiştir. Tozların D₅₀ ortalama boyutları sırası ile 13,7, 11,5 ve 11,1 µm dur. Şekil 4.1 de deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı toza ait partikül doyut dağılım grafiği verilmiştir. Tozların ortalama boyut dışındaki diğer spesifik özellikleri Tablo 4.1. de verilmiştir.



(a)



(b)



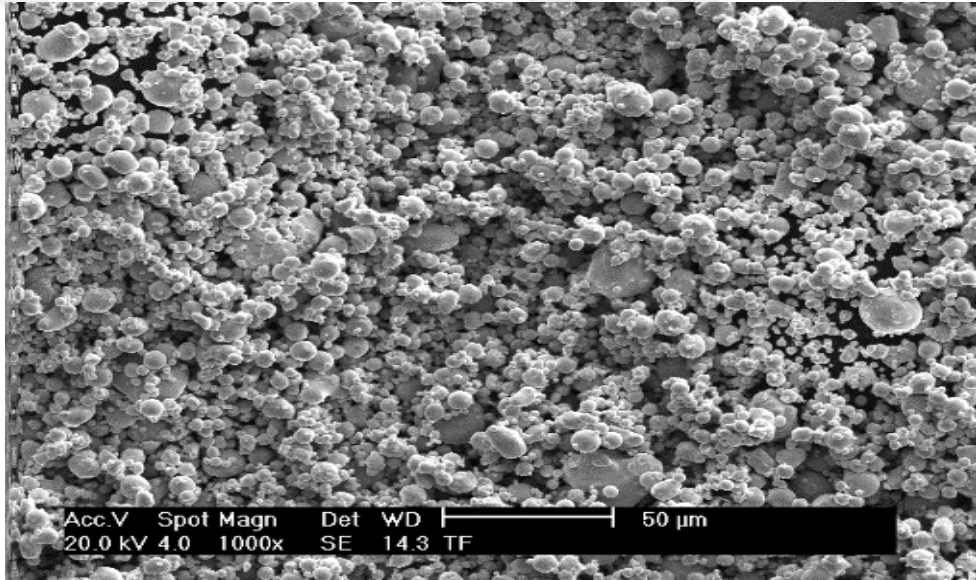
(c)

Şekil 4.1 Ortalama tane boyut dağılımları, a) Co- 212-C, b) Stellite 6, c) Fe50Co0.2Si

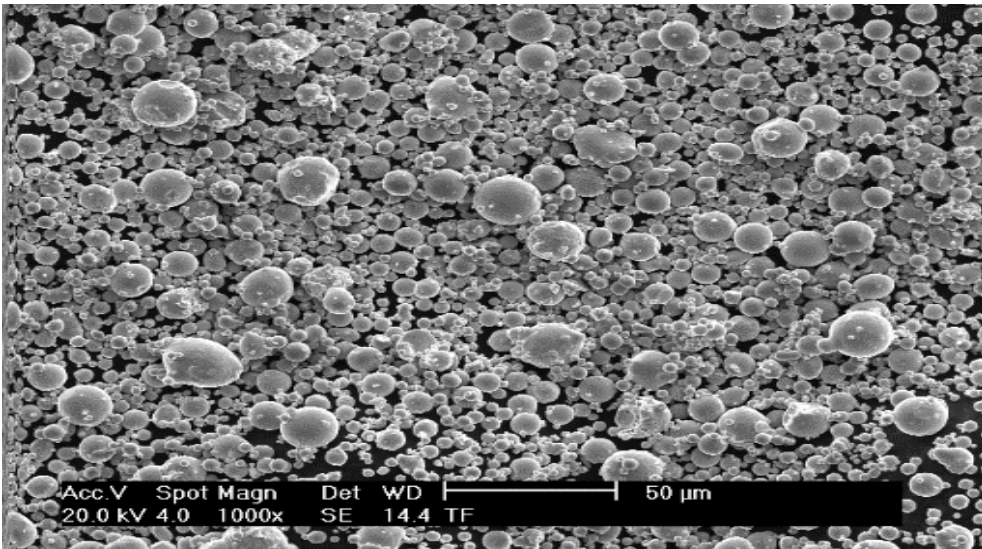
Tablo 4.1. Tozların genel özellikleri.

Tozlar	D₁₀ (μm)	D₅₀ (μm)	D₉₀ (μm)	Spesifik Yüzey Alanı (m^2/g)
Stellite 6	5,2	13,7	26,9	0,599
Co-212-C	4,4	11,5	21,7	0,724
Fe50Co0.2Si	4,5	11,1	21,8	0,719

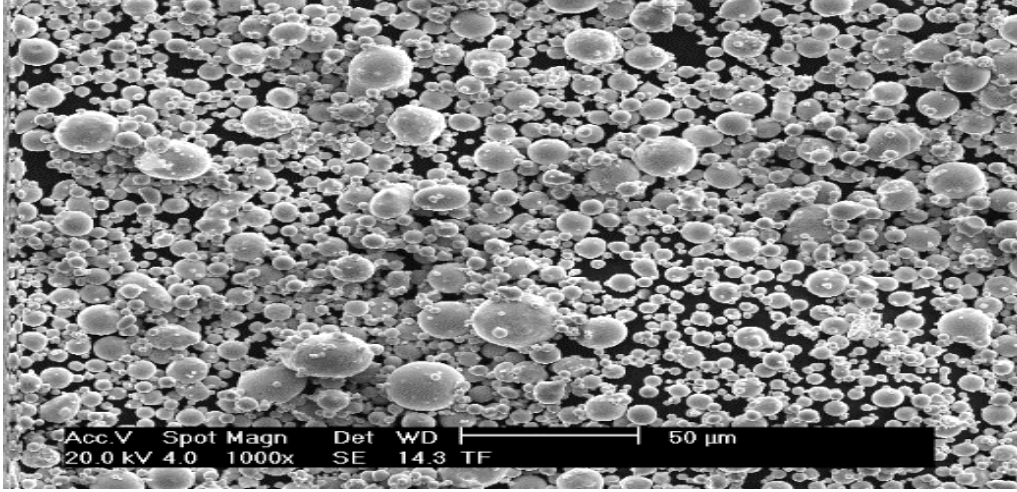
Tozların SEM görüntüleri firmadan sağlanmış olup, üç toz türünde yuvarlak bir yapı gözlenmiştir. Tozların SEM görüntüleri Şekil 4.2. de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2. Kobalt süperalaşım tozlarının SEM görüntüleri a) Fe₅₀Co_{0.2}Si, b) Co-212-C, c) Stellite 6

Bağlayıcı olarak parafin, carnauba mumu (PM ve CM), polipropilen (PP) ve stearik asit (SA) tercih edilmiştir. Bu bağlayıcılar daha önceki çalışmalarda ve literatürde reolojik çalışmalar için uygun olarak saptanmış ve bağlayıcı giderme prosesinde olumlu sonuç vermiştir. Polipropilen ise prosesin başından sonuna kadar (Karıştırma aşamasından sinterlemenin sonuna kadar) bütün karışımı bir arada tutacak olan maddedir. PM ve CM tipi bağlayıcılar, karıştırma ve kalıplama işlemleri sırasında toz kütlelerini bir arada tutacak ve aynı zamanda uygun viskozite değerlerinin eldesi için kullanılmıştır. PM ve CM tipi bağlayıcılar solvent bağlayıcı giderme aşamasında yapıdan uzaklaştırılmıştır. SA tozların yüzeylerinin aktif hale getirilmesi amacı ile yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcılar ve teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir. (Bilketay, 2017).

Tablo 4.2. Bağlayıcı ve yüzey aktifleyicilere ait teknik özellikleri

Bağlayıcı Türü	Firma	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Molekül ağırlığı (g/mol)	Şekil
Parafin mumu	MERC	0,90	60	350-420	Tane
Carnauba mumu	MERC	0,97	82	1300-1500	Pul
Polipropilen	PETKİM	0,89	161	43000	Tane
Stearik asit	MERC	0,85	73	285	Pul

4.3. Cihaz ve Ekipmanlar

Tozlarının tanecik boyut dağılımını tespit etmek için Malvern Master Sizer cihazı kullanılmıştır. Besleme stoğu hazırlamak için kullanılan toz ve bağlayıcı sistemlerinin ağırlık tartımları Precisa marka XB620C model hassas terazi ile ölçümleri yapılmıştır. Cihaz, Şekil 4.3’de görüldüğü üzere, maksimum 620 g tartım ağırlığı ve 0,01’lik ölçüm hassasiyetindedir.



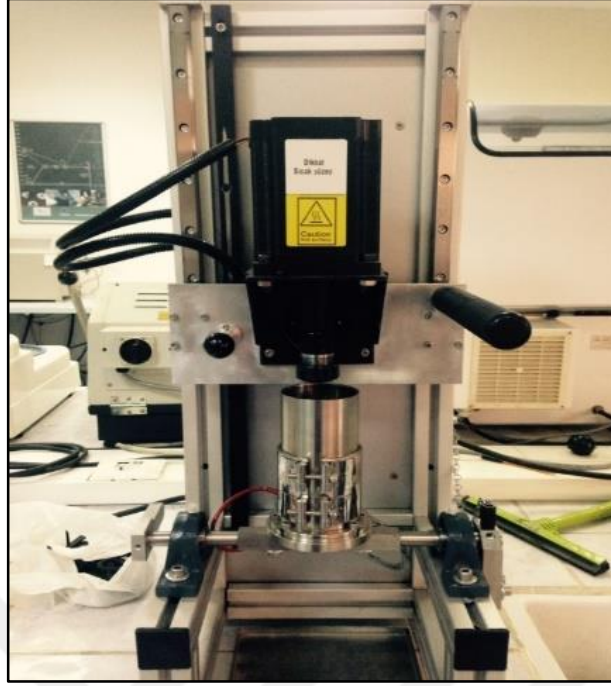
Şekil 4.3. Precisa hassas terazi

TEK’de kullanılacak besleme stoğu, kalıplama öncesinde homojen olarak karıştırılması ilk aşama olup, önemlidir. Bu işlemin doğru ve yeterince yapılması sonraki adımları kolaylaştırmaktadır. Bunun için T/M tekniklerinde homojenliği sağlamak adına son zamanlarda sıklıkla kullanılan Turbula 3 Boyutlu Karıştırıcı kullanılmaktadır. Turbula Karıştırıcı Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Turbula 3 boyutlu karıştırıcı

Toz ve bağlayıcıların karıştırılması için tez çalışması kapsamında tek paletli karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma işlemi esnasında oluşabilecek hava baloncuklarını önlemek için vakum altında karıştırma yapabilen karıştırıcıda, istenilen sıcaklığa ve karıştırma hızlarına çıkılabilmektedir. Karıştırma işlemi sırasında karışımın kirlenmemesi ve karıştırma haznesinin kolay boşaltılabilmesi için karıştırma haznesi geniş ağızlı ve korozyona dirençli paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve haznenin temizliği çok önemlidir. Kullanılan tozların diğer tozların kalıntıları ile karışmaması gerekir. Karışım torkunun ölçülebilmesi için karıştırıcı motorundan alınan çıkışlar bir kaydediciye bağlanarak karıştırma esnasındaki tork değişimleri sabit devirde ölçülebilmektedir. Bu ölçüm sayesinde toz-bağlayıcı karışımlarının homejenitesi hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Cihaz ile ilgili teknik bilgi ve cihazın genel görüntüsü Şekil 4.5’da verilmiştir.



Şekil 4.5. Toz-bağlayıcı karıştırma cihazının genel görünüşü.

Tablo 4.3. Toz-bağlayıcı karıştırma cihazının teknik özellikleri

Karıştırıcı haznesi	500 cc
Karıştırma sıcaklık aralığı	50-300 °C
Karıştırma hızı	30-200 dev/dak.
Maksimum vakum seviyesi	10^{-1} mbar

Düzgün bir kalıplama işlemi yapılabilmesi için toz-bağlayıcı sisteminin viskozitesi belirlenmelidir. Bununla birlikte optimum sıcaklık ve kalıplama hızının seçilmesi gerekir. Kayma gerilmesi ve kayma oranına bağlı viskozitenin belirlenmesinde Şekil 4.6.a'da gösterilen Anton Paar MCR51 serisi rotasyonel reometre kullanılmıştır. Reometre, 4 kanatçıklı bir karıştırıcı (stirer), ölçüm kabı (disposable cup), -30 ile 200 °C'de arasında çalışabilen bir peltier sistemi, bu peltier sisteminin ısı değerini sabit tutmak için bir sıcak su banyosu ve ölçümlerin anlık çıktılarının alındığı bir bilgisayardan oluşmaktadır. Reometrenin teknik özellikleri Şekil 4.6.b'de verilmiştir.



(a)

Marka	Anton Paar
Model	MCR51
Peltier Sistemi Çalışma Sıcaklığı	(-30) - 200 °C
Sıcak Su Banyosu Sıcaklığı	50-60 °C
Sıcak Su Banyosu Azami Sıcaklığı	70 °C
Maksimum Kayma Oranı	3000 1/s
Maksimum Kayma Gerilmesi	11731,3 Pa
Sistem	Rotasyonel

(b)

Şekil 4.6. Anton Paar Reometre a) ekipmanları b) teknik özellikleri

Bir çözünenin (solvent) içerisinde bağlayıcının giderilmesinde kullanılan cihaz Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Su ile çevrili, çözünen sıvının bulunduğu kap istenilen sıcaklık değerinde tutulabilmektedir. Cihaz su banyosunun bulunduğu hazne, numunelerin çözünen içinde bulunduğu bir kap ve sıcaklık ayarlarının yapıldığı kontrol ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 4.7. Sıcak su banyosu

Toz yapısını, kalıplanmış ve bağlayıcı giderilmiş numunelerin görüntüleri Şekil 4.8’de gösterilen SEM ile görüntüleri alınmıştır.

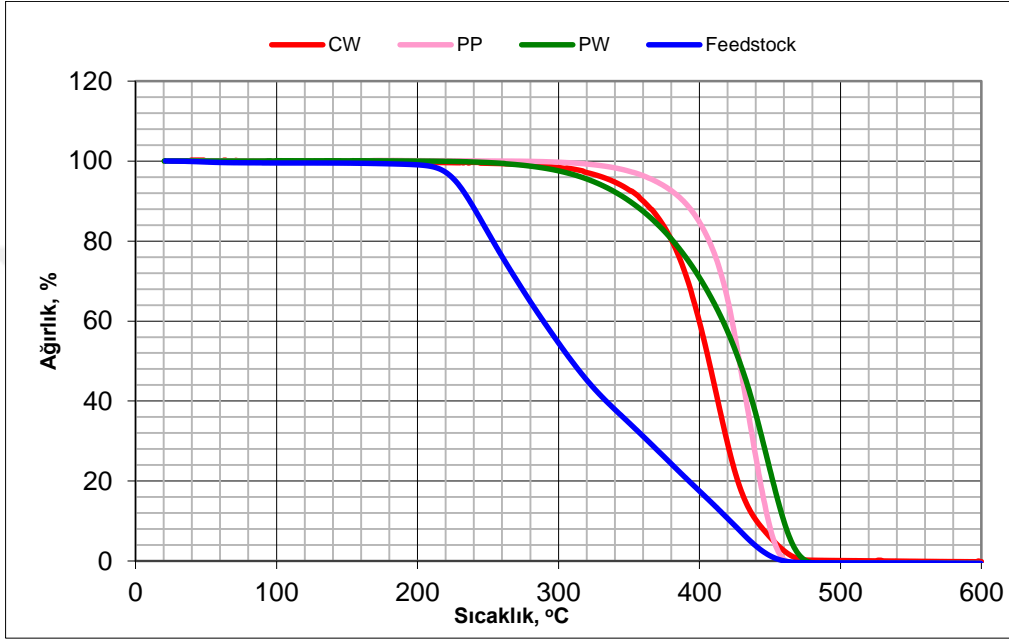
4.3.1. Toz ve Bağlayıcıların Şekil ve Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan üç tozda kobalt tozu olarak sınıflandırılrsa da kendi içinde 3’e ayrılmaktadır. Manyetik alaşımlı toz, kobalt alaşımlı ve karbit matrisli olmak üzere. Fe50Co0.2Si tozu demir içerdiği için manyetik alaşımlı toz olarak sınıflandırılmaktadır. Co 212-C tozu kobalt alaşımlı toz olarak sınıflandırılır. Stellite 6 tozu ise karbit matrisli olarak sınıflandırılır. Bütün tozlar gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiştir ve tozların tümü küresel yapıdadır (Sandvik, 2015).

Tablo 4.4. Tozların içerikleri (% bazında).

%	Co	C	Cr	Mo	Ni	W	Mn	Si	Fe	
Co-212-C	Temel	Eser	28.5	6	0.1	---	0.7	0.7	0.75	
		miktarda								
	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Co	Ni
Fe50Co0.2Si	Temel	---	0.25	0.25	0.7	---	---	---	50.0	0.7
	Co	Cr	W	C						
Stellite 6	Temel	27 - 32	4 - 6	0.9-1.4						

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan bağlayıcıların, ısıl bozunma sıcaklıklarının tespiti için her bir bağlayıcı ayrı ayrı Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı kullanılarak test edilmiş ve tüm bağlayıcıların ısıl bozunma sıcaklık aralıkları tespit edilmiştir. Farklı sıcaklık aralıklarında bozunma gösteren bağlayıcılar yaklaşık olarak 500°C'ye ulaşmadan bozunmaktadır. Şekil 4.9'da bağlayıcılara ait TGA eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.8. Bağlayıcılara ait TGA grafiği (Bilketay, 2017)

4.3.2. Besleme Stoğunun Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan tozlar üretici firmadan temin edilmiştir. kobalt tozları ile uygun besleme stoğu hazırlanabilmesi için ortalama toz boyutlarının 10-25 µm aralığında olması hedeflenmiştir. Bu aralıkların dışındaki toz tane boyutlarında, besleme stoğunun hazırlanması ve hazırlanan besleme stoğunun kalıplanabilirliği güçleşecektir. Tane boyutu değerlerinden bütün tozların besleme stoğu hazırlamak için uygun olduğu anlaşılmıştır.

Bağlayıcı malzeme olarak parafin mumu, carnauba mumu, polipropilen ve stearik asit tercih edilmiştir. Bu tip bağlayıcılar, daha önceki çalışmalarda başarı ile kullanılmış ve gerek kalıplama gerekse bağlayıcı giderme aşamalarında başarı elde edilmiştir. Bağlayıcılar ve tozların % ağırlık miktarları 0,01 g hassasiyetindeki dijital terazide tartılmıştır. Toz oranları hacmen % 57,5-60-62,5-65 olmak üzere 4 ayrı şekilde hesaplanmış ve hazırlanmıştır. Bağlayıcılar ise % 42,5-40-37,5-35 olacak şekilde hesaplanıp hazırlanmıştır. Hesaplamalar için tozların özkütleleri kullanılmış, karışımların toz-bağlayıcı karışımı olacak şekilde gramajları Tablo 4.8.de verilmiştir.

Tablo 4.5. Toz-bağlayıcı karışımının reçetesi

Tozlar				Bağlayıcılar			
Fe50Co0.2Si							
Toplam (%)		Toplam (g)		Toplam (g)			
Toz	Bağlayıcı	Toz	Bağlayıcı	PW	PP	CW	SA
57,5	42,5	238,9	50,8	34,5	10	5	0,50
60	40	249,3	47,5	32,75	9,5	4,75	0,48
62,5	37,5	259,6	45,8	31,05	9	4,50	0,45
65	35	270	42,5	29,33	8,5	4,25	0,43
Co 212-C							
Toplam (%)		Toplam (g)		Toplam (g)			
Toz	Bağlayıcı	Toz	Bağlayıcı	PW	PP	CW	SA
57,5	42,5	243,2	50,8	34,5	10	5	0,50
60	40	253,8	47,5	32,75	9,5	4,75	0,48
62,5	37,5	264,3	45,8	31,05	9	4,50	0,45
65	35	274,9	42,5	29,33	8,5	4,25	0,43
Stellite 6							
Toplam (%)		Toplam (g)		Toplam (g)			
Toz	Bağlayıcı	Toz	Bağlayıcı	PW	PP	CW	SA
57,5	42,5	250,4	50,8	34,5	10	5	0,50
60	40	261,3	47,5	32,75	9,5	4,75	0,48
62,5	37,5	272,2	45,8	31,05	9	4,50	0,45
65	35	283,0	42,5	29,33	8,5	4,25	0,43

Tartılan kobalt tozları ve Stearik asit hacim oranlarına göre farklı kaplara konularak, her biri önce elle, daha sonra Turbula karıştırıcı ile 1 saat karıştırılmıştır. SA, tozların yüzeylerinin aktif hale getirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Homojen bir şekilde belirlenen oranlarda besleme stoğu hazırlamanın iki yolu vardır. Birincisi besleme stoğunda kullanılan malzemeleri toz haline getirerek, kuru haldeyken karışmaktır. İkincisi malzemeleri eriterek karıştırmaktır. Bu çalışmada ikinci yol izlenmiştir. Çünkü malzemeleri eriterek daha homojen bir karışım elde edildiği gözlemlenmektedir.

PM, CM ve PP sırasıyla, Şekil 4.5’da gösterilen termal karıştırıcı haznesine konularak 200 °C’de eritilmiştir. Turbula karıştırıcıda karıştırılan tozlar ile SA, termal karıştırıcı haznesinde bulunan ergiyik haldeki bağlayıcılara katılarak 45 dakika boyunca karışma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada ısının ve polimerlerin ortamdaki uzaklaşmasını engellemek için hazne ağzı kapatılmıştır. Homojen bir karışım elde edildikten sonra sıvı haldeki besleme stoğu tepsiye dökülerek soğumaya bırakılmıştır. Her bir hacimdeki numune karışımları için bu işlemler yapılmıştır. Soğutulan besleme stokları granül hale getirilerek hava geçirmez torbalara ayrı ayrı konularak deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere saklanmıştır.

4.3.3. Besleme Stoklarının Rotasyonel Reometre ile Viskozitelerinin Ölçülmesi

Hazırlanan besleme stoklarının, uygun değerlerde kalıplanabilmesi için viskozite değerlerini Anton Paar Rotasyonel Reometre ile ölçümleri yapılmıştır. Besleme stoklarının viskozite ölçümlerini yapmadan önce daha hassas ölçüm için reometre cihazının ölçümleme (kalibrasyon) işlemi yapıldı. Oda sıcaklığında yapılan bu işlem ile ölçümler sırasında motordan veya sistemden gelebilecek etkileri sıfırlamak adına yapılmaktadır. Ölçümleme işleminden sonra su banyosu 50 °C’ye getirilerek peltier sistemindeki ısı fazlasını atmak ve sıcaklığın devamlılığını sağlamak için devamlı olarak saf su ile devirdaim yapılmaktadır. Ölçüm sıcaklığına bağlı olarak su banyosu 50 ile 60 °C arasında ayarlanabilir.

Malzemelerin viskozite ölçümleri için cihaz ile uyumlu olarak çalışan RheoPlus programı kullanılmıştır. Bu program ile ölçümleme, sıcaklık, kayma hızı, kayma gerilmesi gibi parametrelerin girdileri, viskozite eğri grafikleri vb. birçok işlem yapılabilmektedir. Bu çalışmada aşağıda belirtilen özelliklerin ölçümleri yapılmıştır:

- Kayma hızı değeri girilerek kayma gerilmesi ve viskozite değeri (Şekil 4.10.a)
- Sabit kayma oranında sıcaklığın azalmasıyla katılma (Şekil 4.10.b)

Set Variable: <input type="text" value="γ Shear Rate"/>	Set Variable: <input type="text" value="T Temperature"/>
Unit: <input type="text" value="1/s"/>	Unit: <input type="text" value="°C"/>
<input type="text" value="Ramp lin"/>	<input type="text" value="Heating Rate"/>
Initial: <input type="text" value="1"/> 1/s	Initial: <input type="text" value="180"/> °C
Final: <input type="text" value="1.000"/> 1/s	Final: <input type="text" value="100"/> °C
	Rate: <input type="text" value="2"/> °C / min
(a)	(b)

Şekil 4.9. Viskozite ölçüm girdileri a) kayma hızı girdileri b) sıcaklık girdileri

%57,5-60-62,5-65 katı hacim oranlarında hazırlanmış besleme stoklarının viskozitesi her biri ayrı ayrı olarak ölçümlere tabi tutulmuştur. Seramik ve Metalik malzemelerin kayma oranları enjeksiyon kalıplama boyunca 1000 s^{-1} az, viskozite değerleri ise 1000 Pa.s 'den az olması istenmektedir. Bu nedenle besleme stoklarının kalıplanabilirliği akışkanlığı ile orantılı olduğundan bu değerler göz önüne alınmıştır (Resende, 2001).

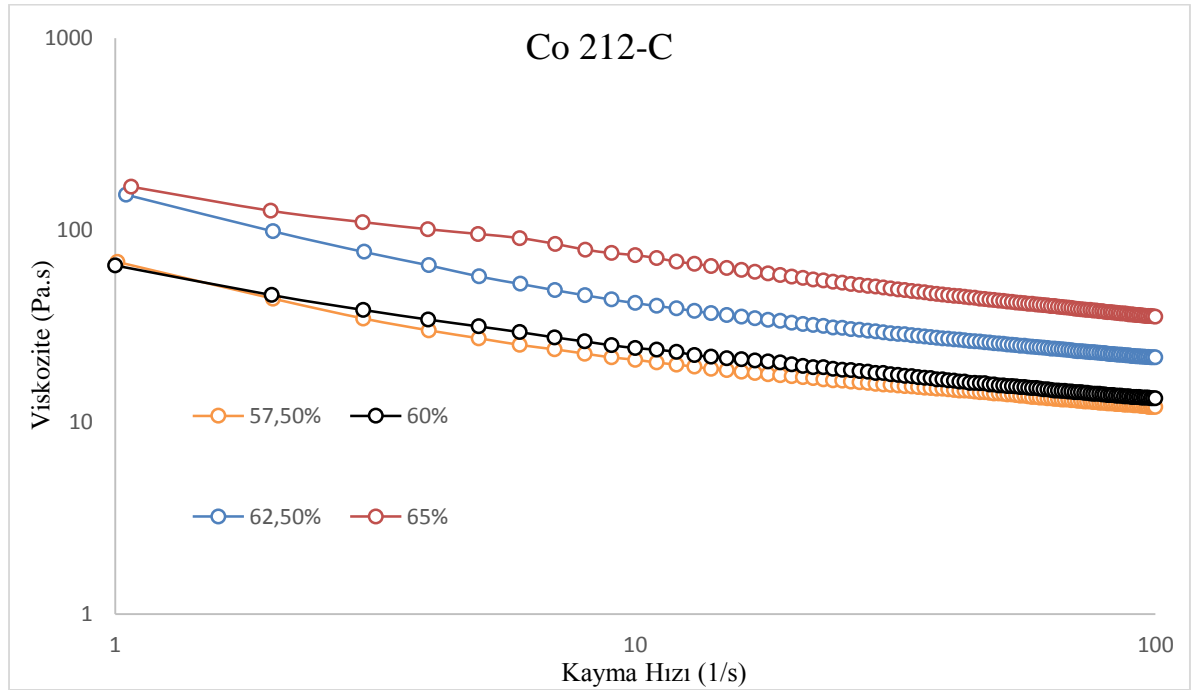
İlk olarak ölçüm öncesi tüm besleme stokları ön karıştırmaya tabi tutularak, yapıdaki sıcaklıkla hapsolmuş gaz kabarcıklarını ve toz-bağlayıcı ayrışımını (sedimentasyon) engellenmiştir. Bu sayede homojen bir yapı oluşturularak hassas ve doğru bir ölçüm sağlanmıştır. Farklı katı hacim oranlarında hazırlanan besleme stokları, 130 ile 160 °C sıcaklık aralığında (5 °C 'lik artışla) malzemelerin enjeksiyon kalıplamadaki uygun kayma oran aralık değeri temel alınarak 1 ile 100 s^{-1} lineer bir artış rampası ile kayma hızları girilmiştir (Şekil 4.10.a). Kayma hızı değerleri belli, buna karşın kayma gerilmesi ve viskozite değerleri gözlemlenmiştir. Enjeksiyon kalıplamadaki minimum sıcaklığı belirlemek için yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklıklara doğru soğutma işlemi yapılarak malzemenin katılma sıcaklığı belirlenmek istemiştir (Şekil 4.10.b). Ayrıca sıcaklığa bağlı olarak viskozitedeki değişimlerde gözlemlenmiştir. 160 °C 'den başlanarak düşük ve sabit bir kayma oranında 130 °C 'ye kadar malzeme soğutularak işlem gerçekleştirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Sıcaklıkla viskozite değişimi

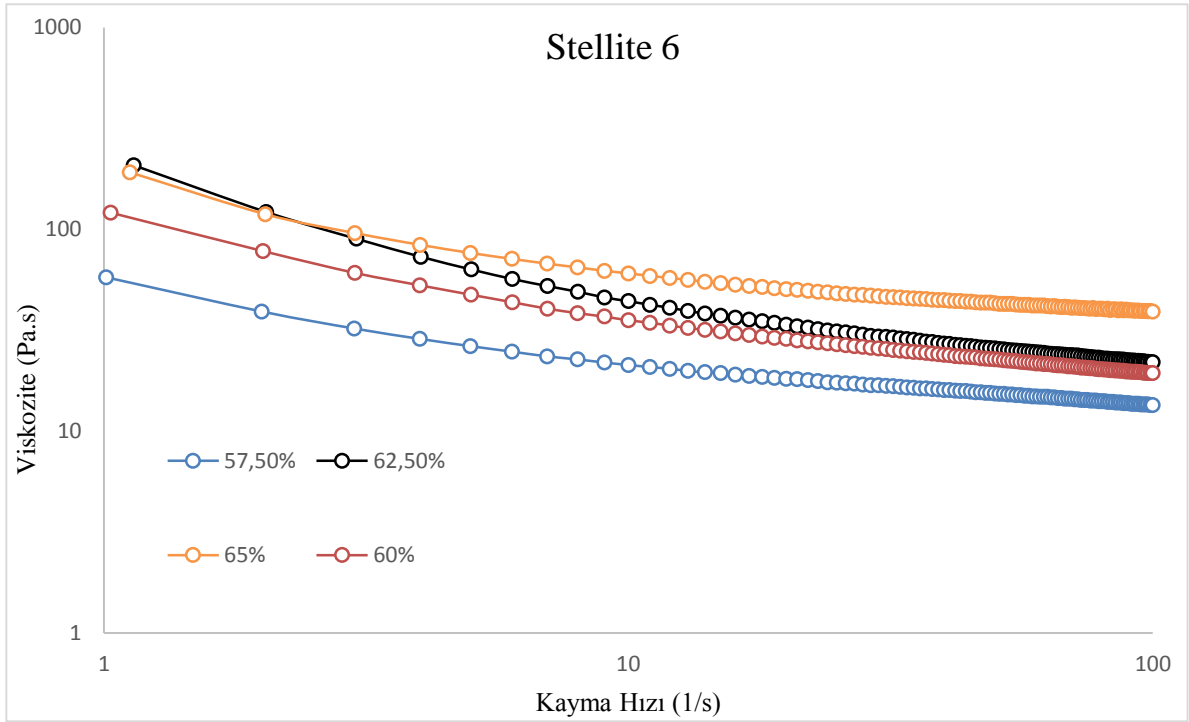
5.1.1 160 °C’de yapılan deneylere ait sonuçlar

Kobalt esaslı süper alaşım tozlarının sıcaklıkla viskozite ve kayma hızı değişiklikleri aşağıda sıcaklıkları sıralayarak verilmiştir. 160°C’de yapılan çalışmalarda %57.5-60-62.5-65 toz hacimlerinde hazırlanmış besleme stoğuna ait logaritmik ölçekli viskozite-kayma hızı grafiği Şekil 5.1’de verilmiştir.

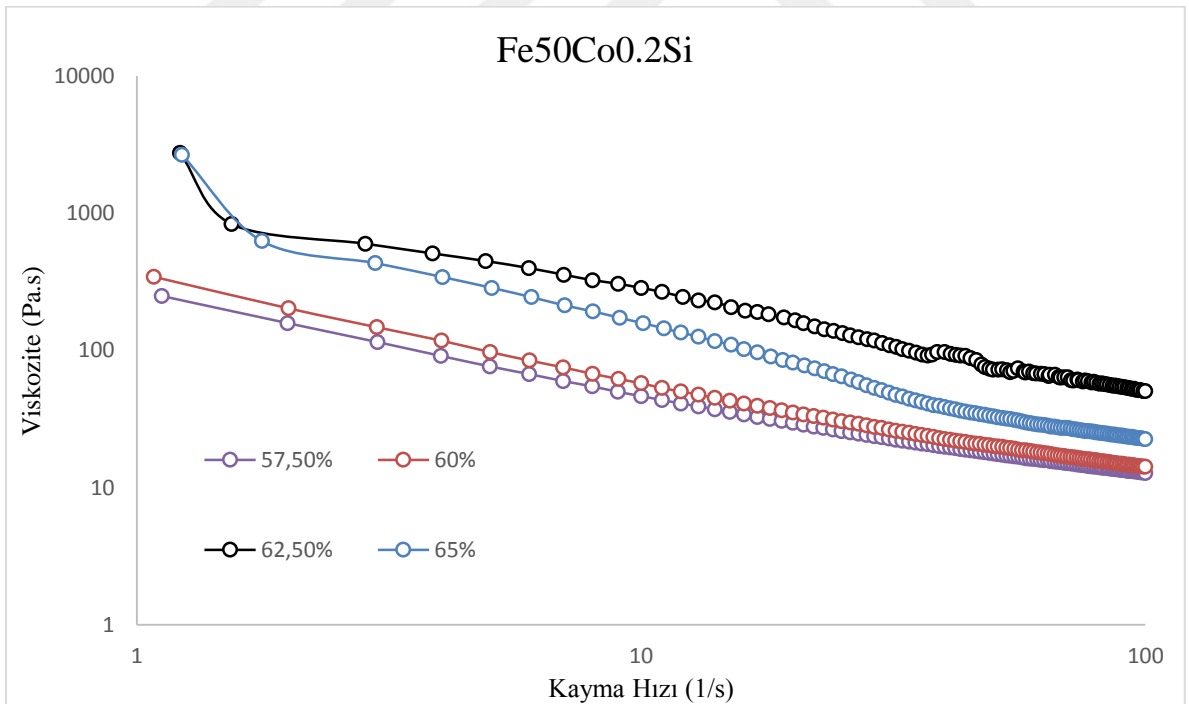


(a)

Viskozite, toz oranı arttıkça bütün tozlar için azalmaktadır ve eğriler birbirlerine yaklaşmaktadır. Genel olarak 160°C’de % 60’ın altındaki toz hacimleri 1000 Pa.s’nin altında olduğu için enjeksiyon kalıplama için uygundur.



(b)



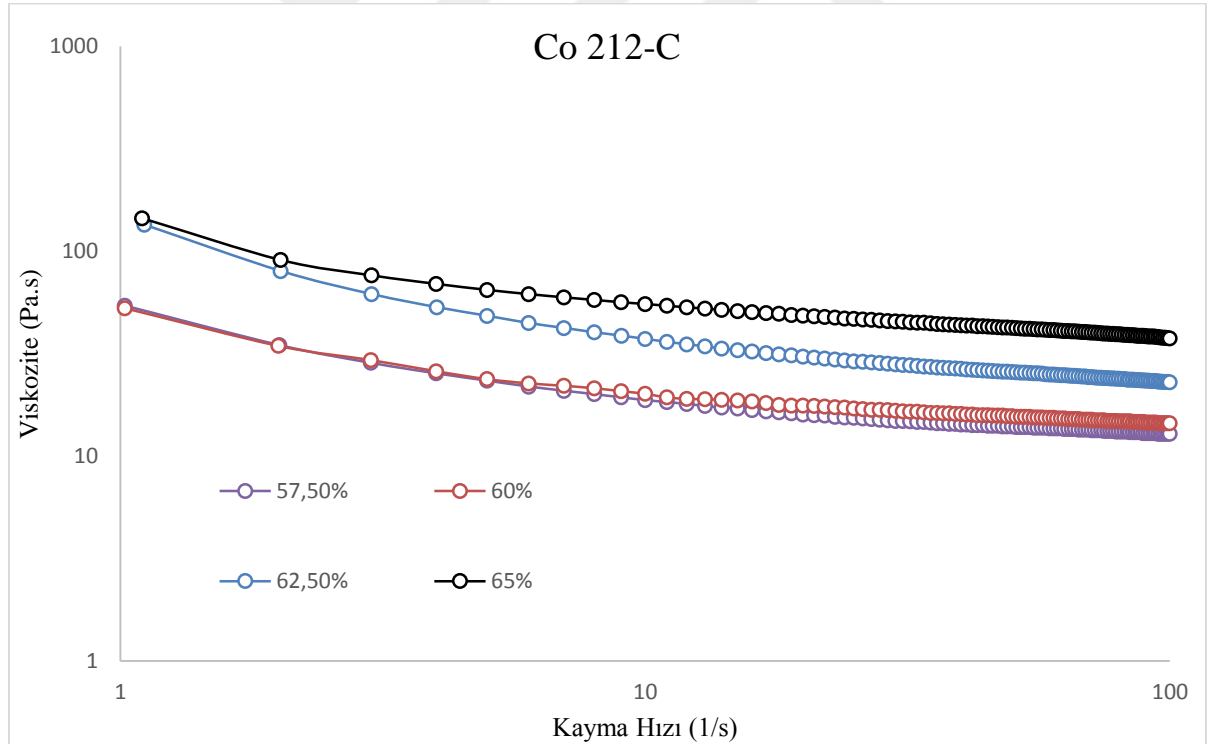
(c)

Şekil 5.1. 160 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

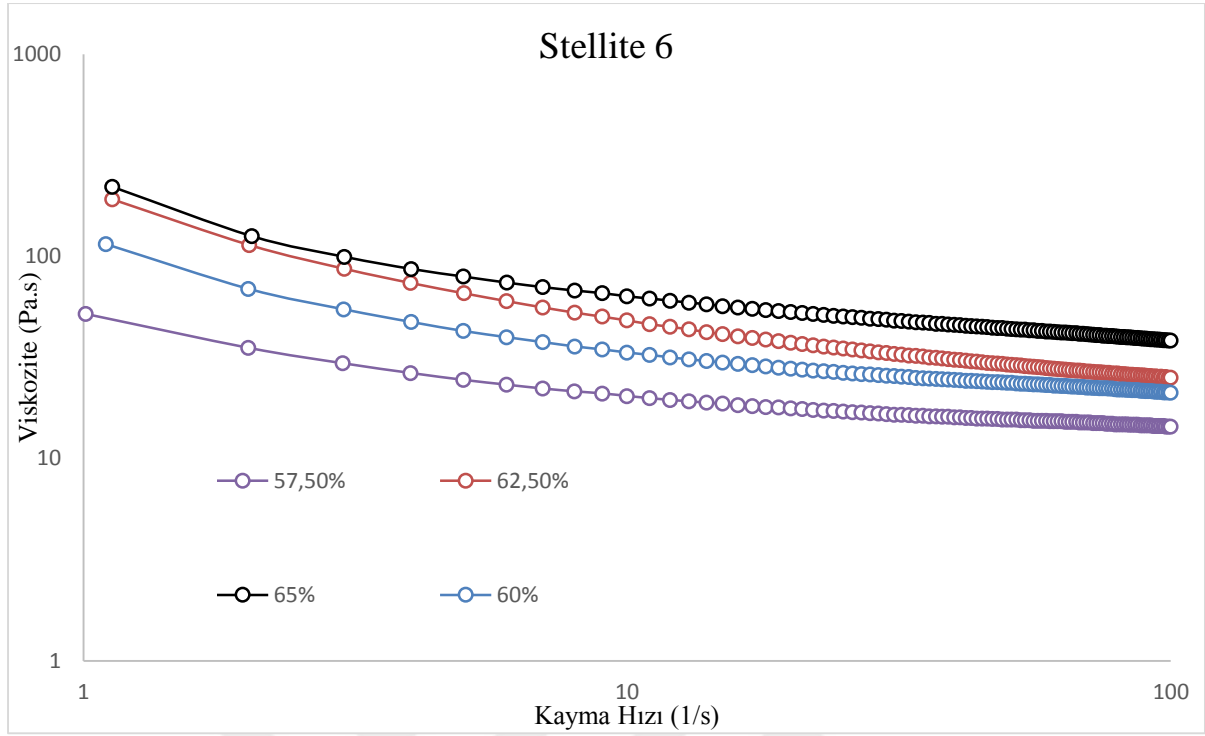
Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Grafikte görüldüğü üzere, malzeme dilatant akış davranışı sergilemektedir. Daha yüksek kayma hızlarına çıkıldığında ise tekrardan psödoplastik akış davranışı sergilemektedir.

5.1.2. 155 °C’de yapılan deneylere ait sonuçlar

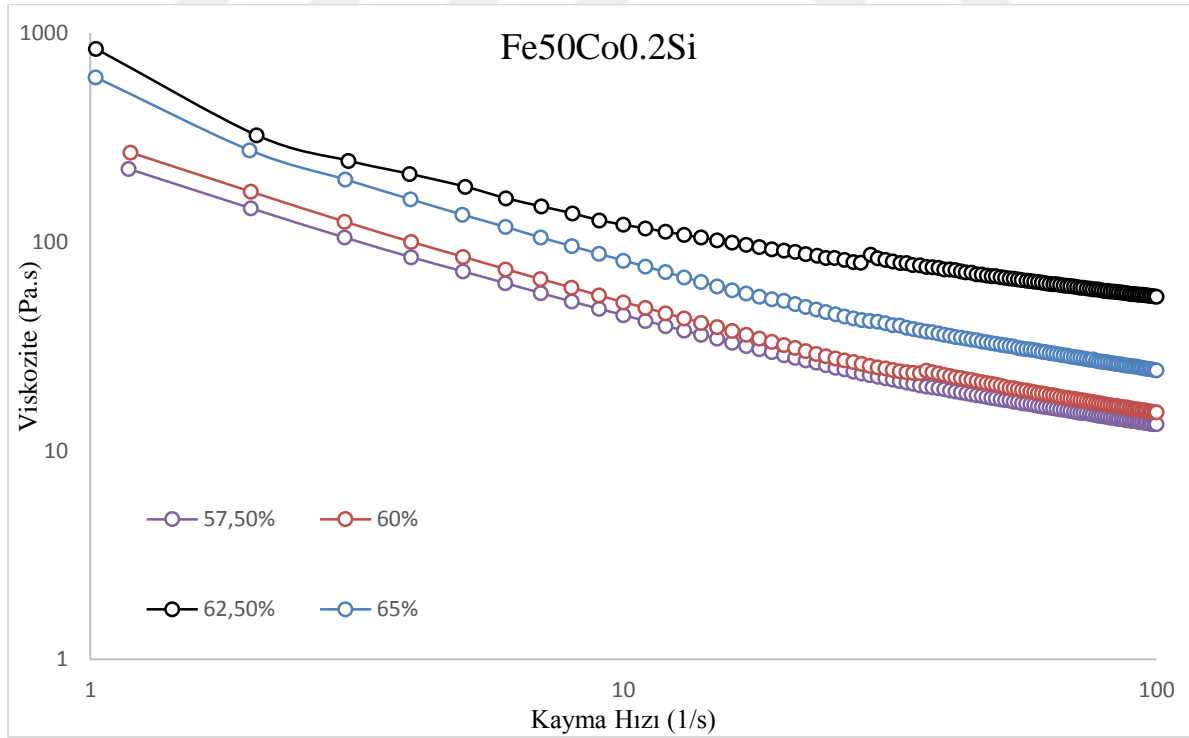
155°C’de yapılan çalışmalarda %57.5-60-62.5-65 toz hacimlerinde hazırlanmış besleme stoğuna ait logaritmik ölçekli viskozite-kayma hızı grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir. Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir.



(a)



(b)

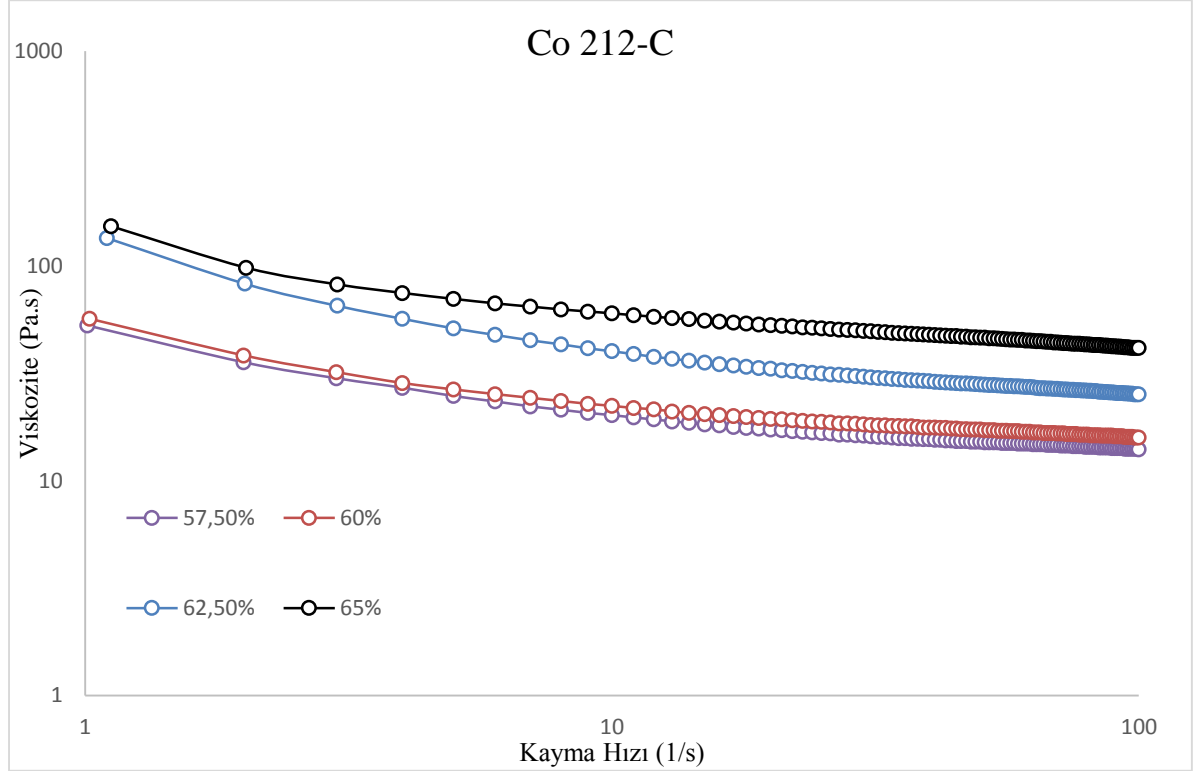


(c)

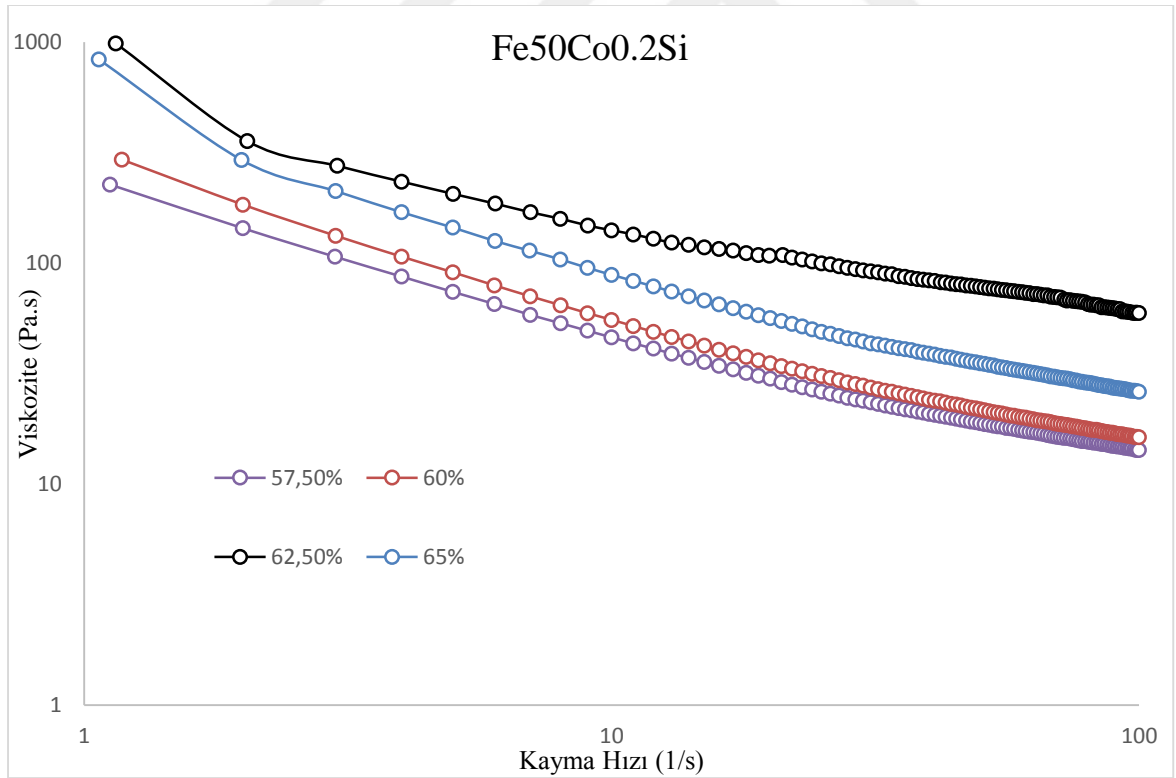
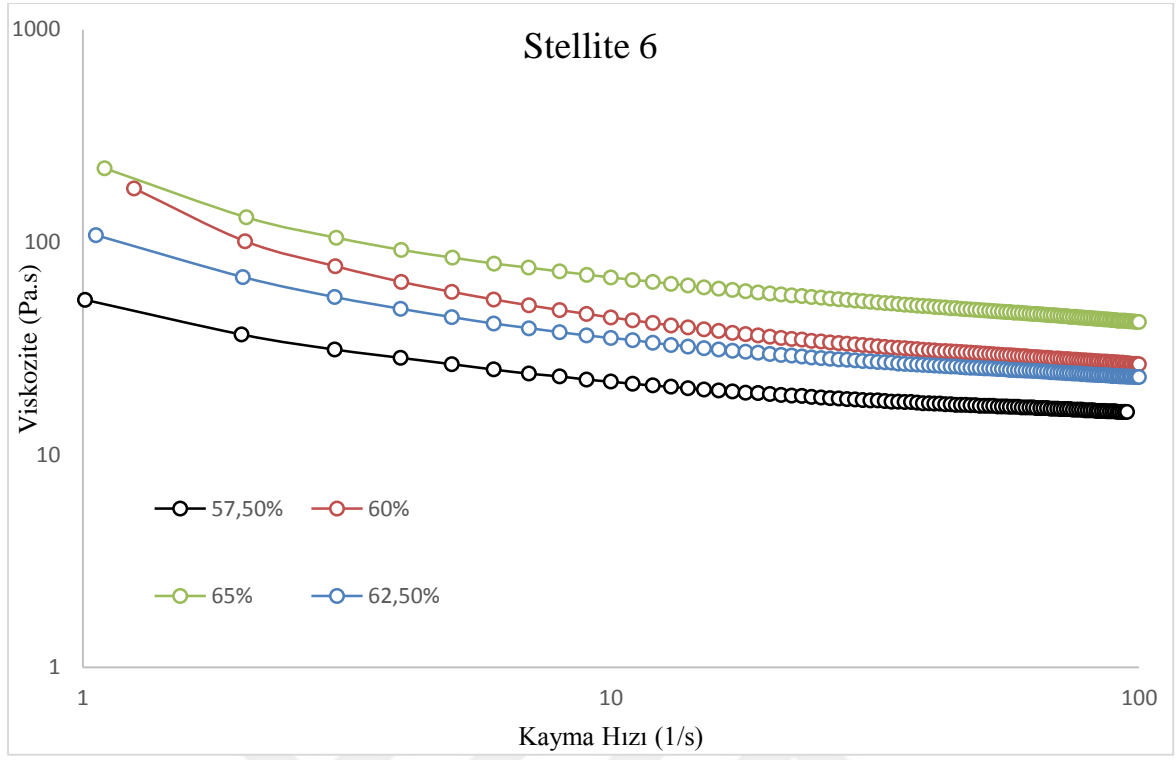
Şekil 5.2. 155 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 60 toz oranının altında kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

5.1.3. 150 °C'de yapılan deneylere ait sonuçlar



(a)

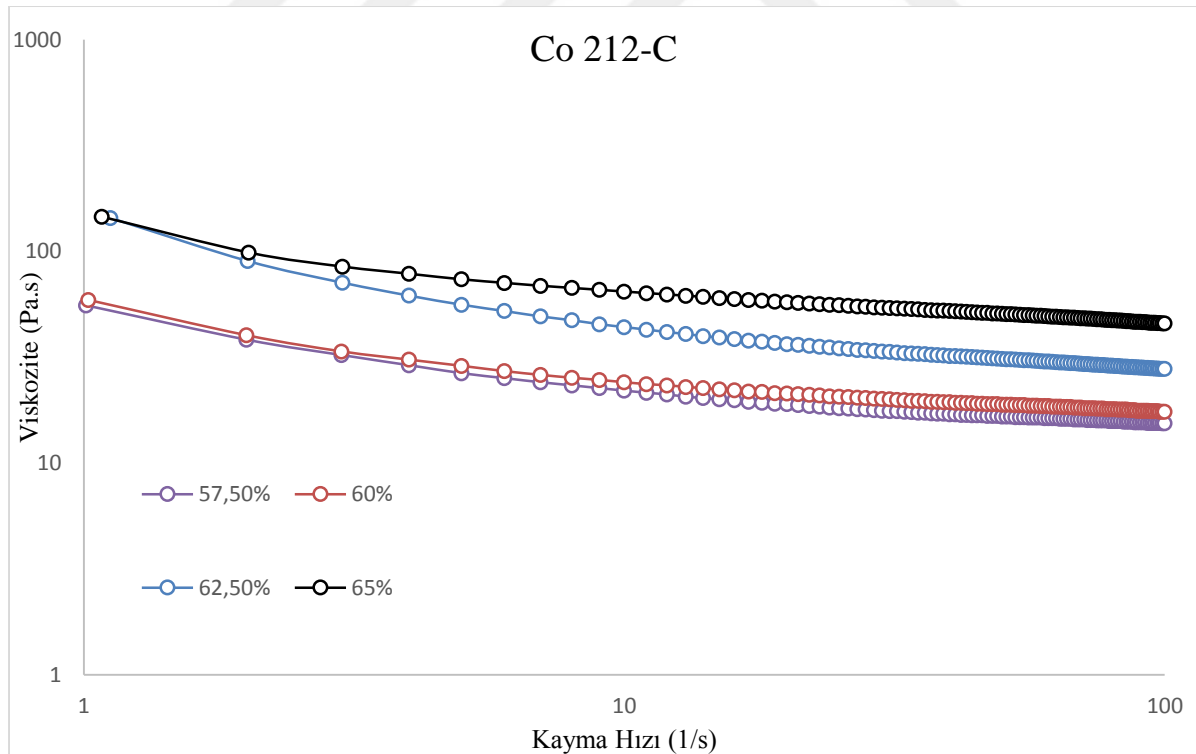


Şekil 5.3. 150 °C’de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

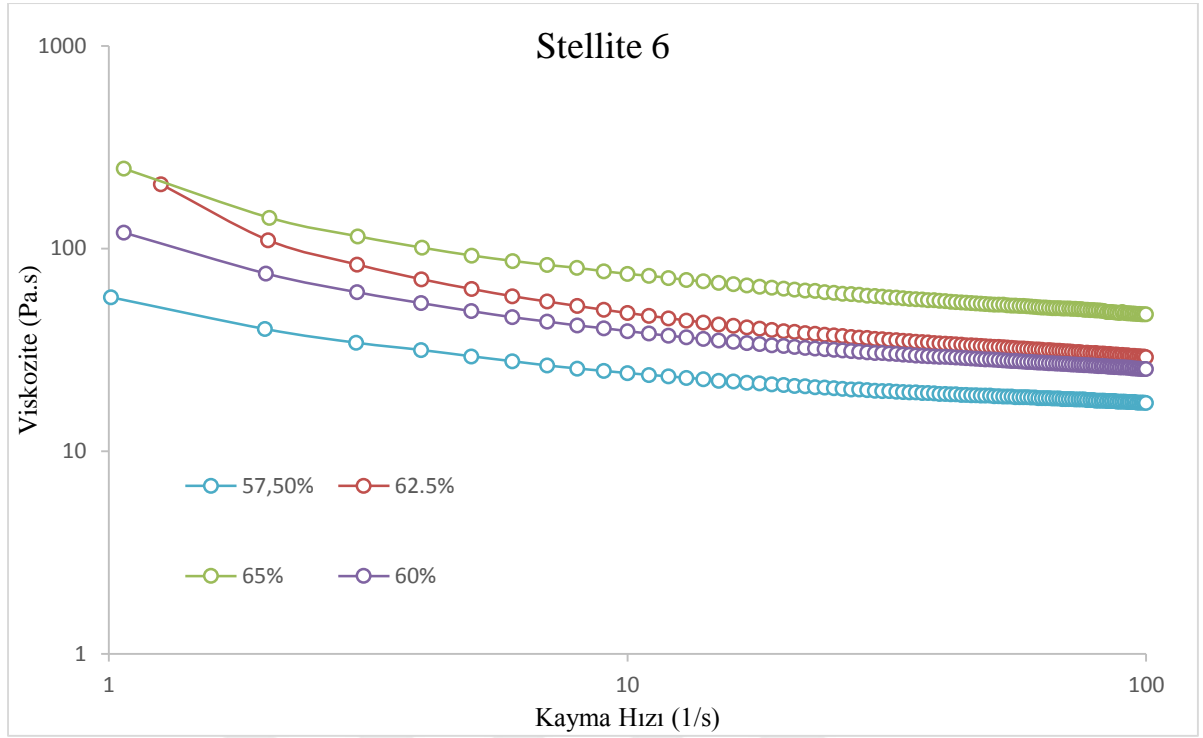
Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 57.5 toz oranına kadar kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

5.1.4. 145 °C’de yapılan deneylere ait sonuçlar

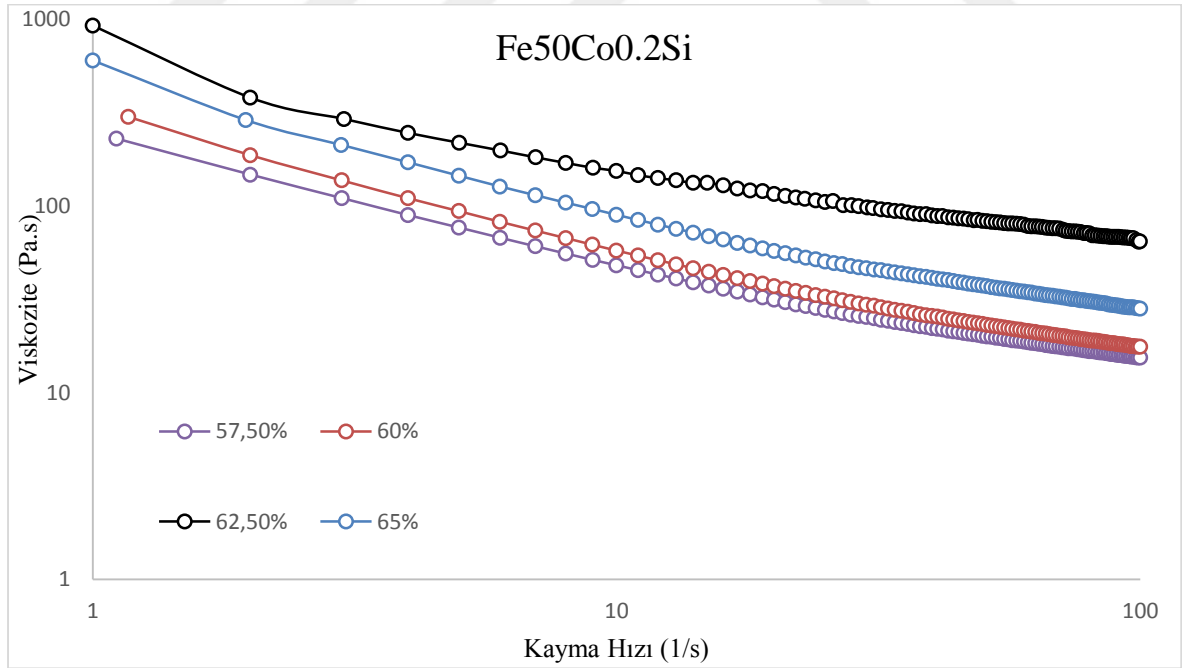
Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir.



(a)



(b)

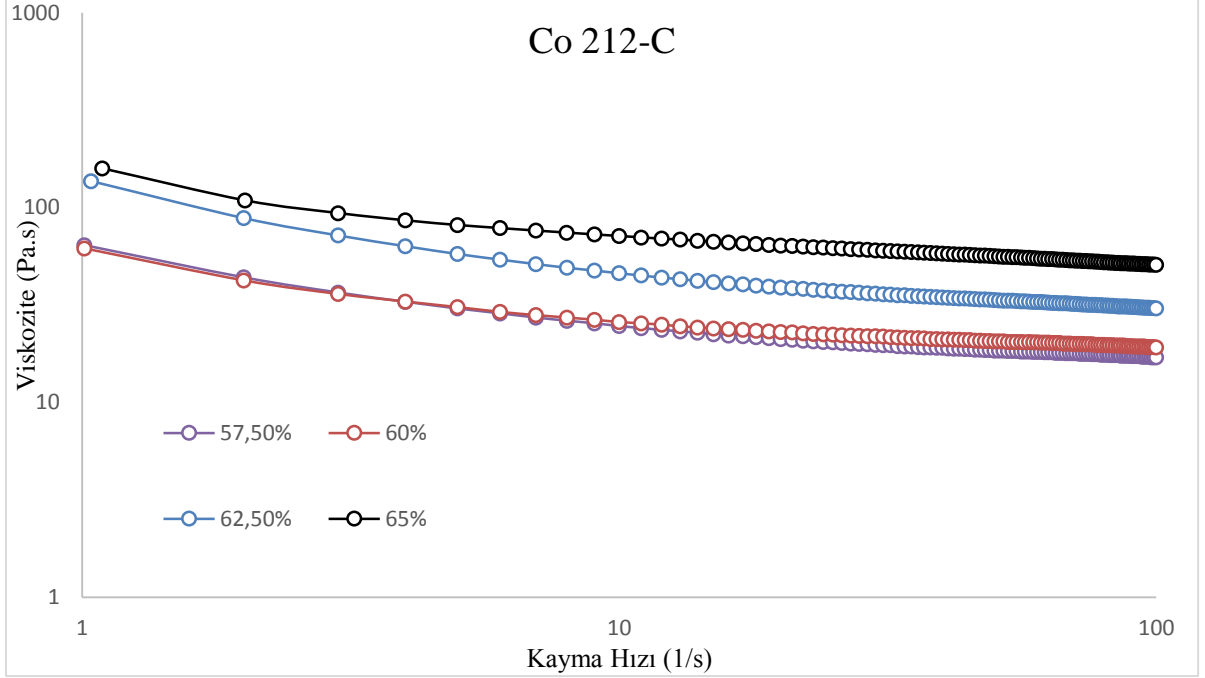


(c)

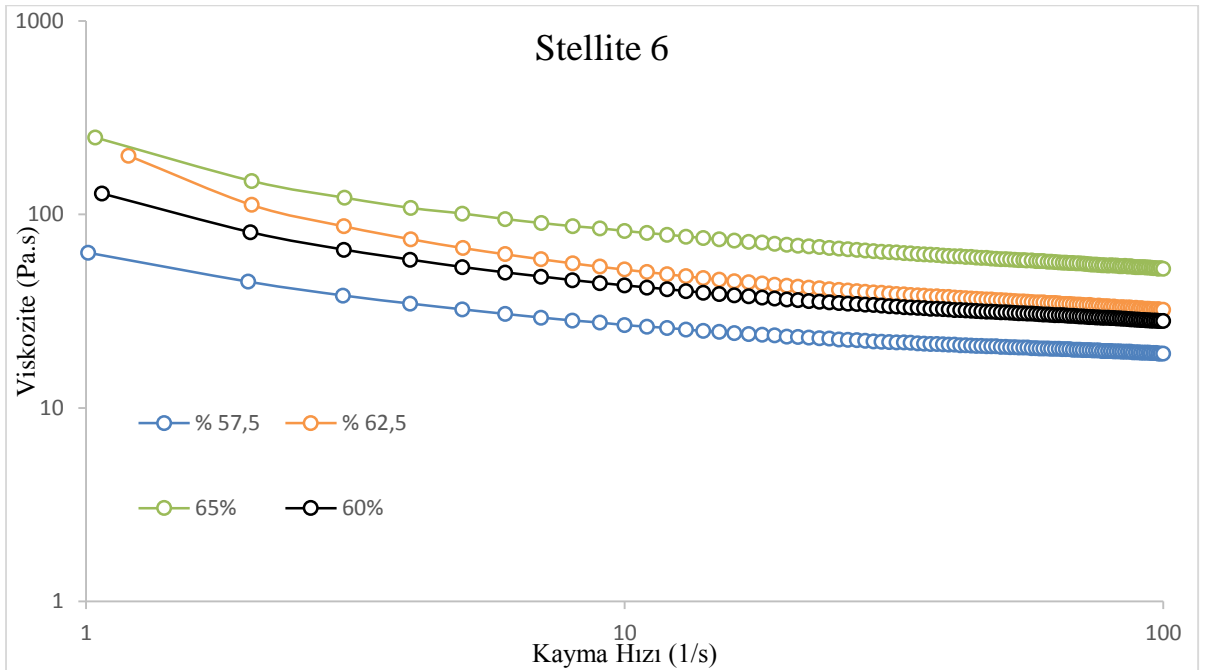
Şekil 5.4. 145 °C’de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 60 toz oranına kadar kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

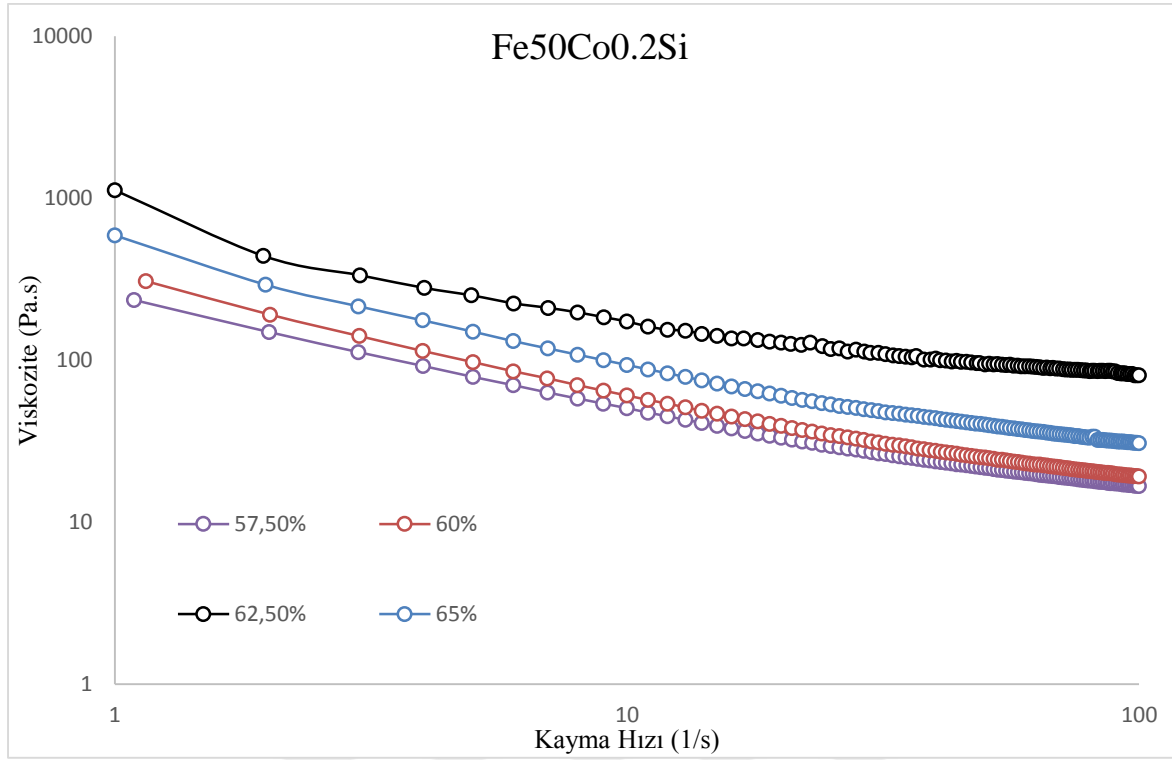
5.1.5. 140 °C'de yapılan deneylere ait sonuçlar



(a)



(b)

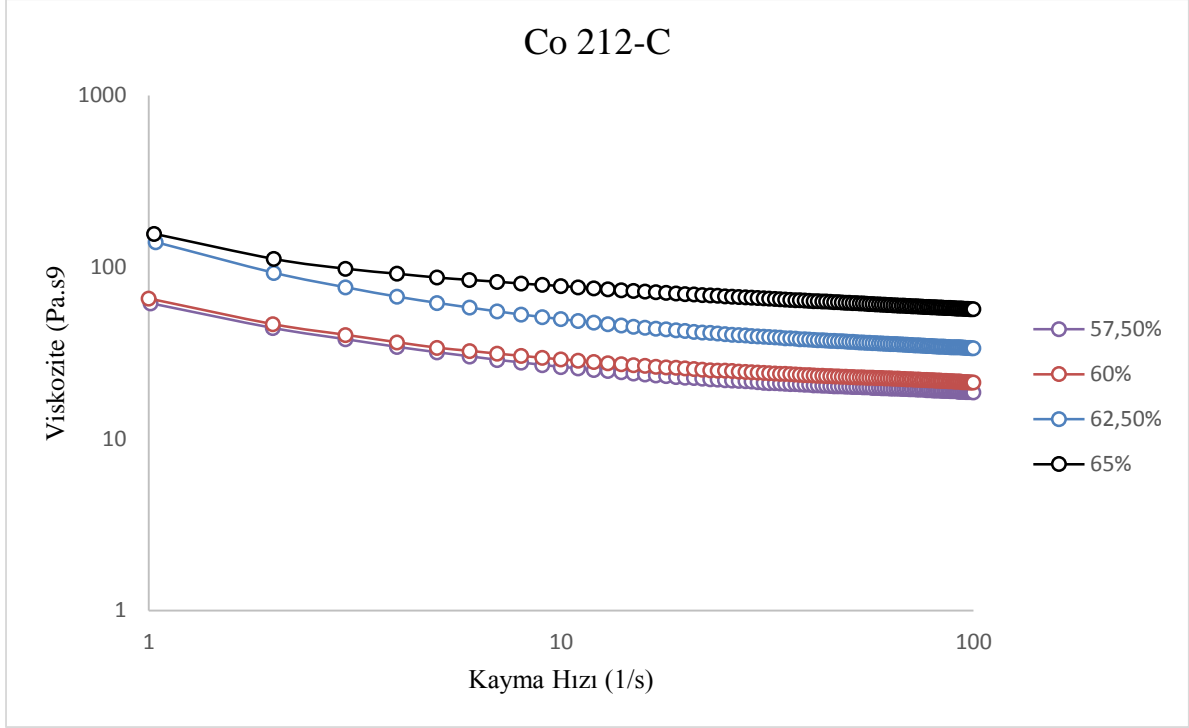


(c)

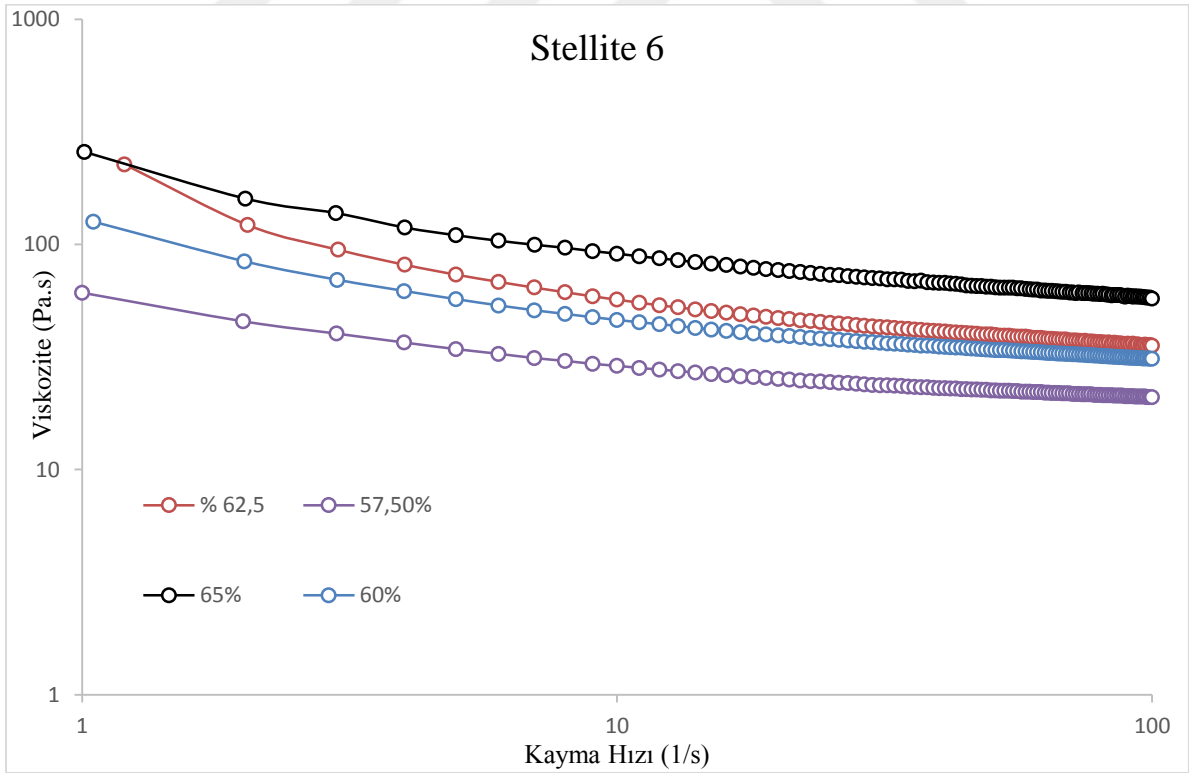
Şekil 5.5. 140 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 60 toz oranına kadar kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

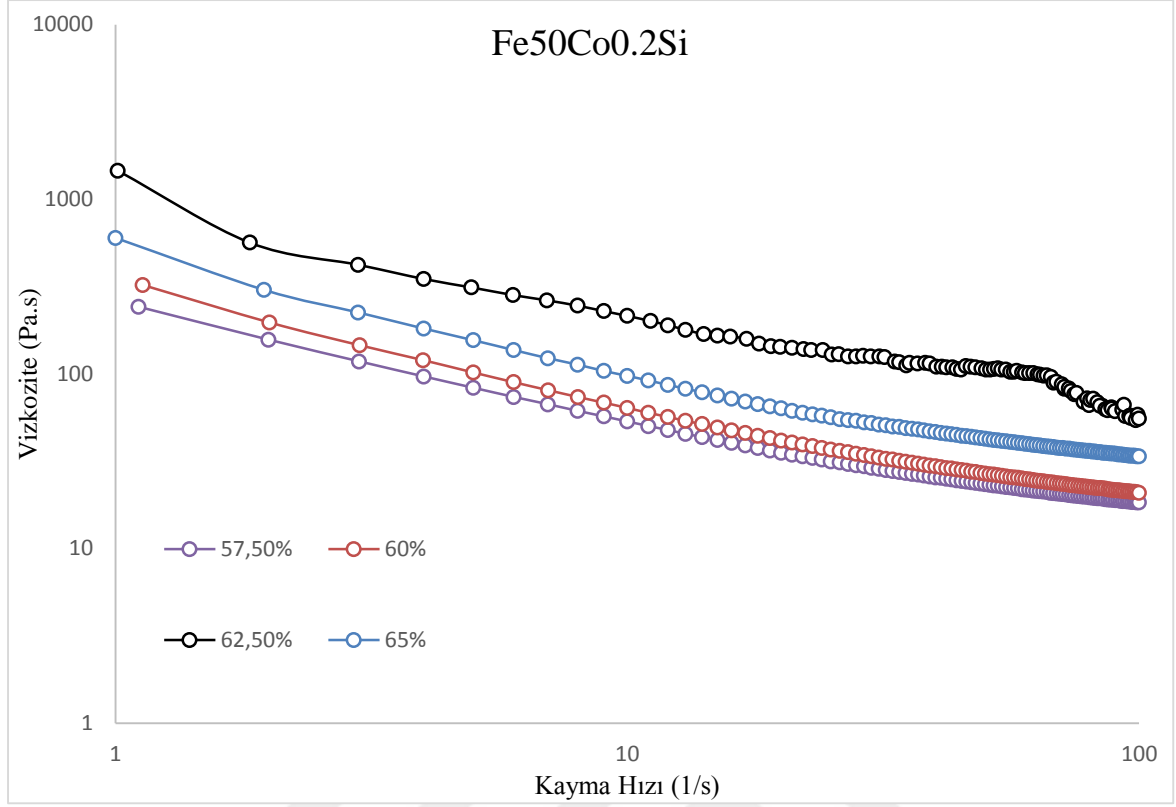
5.1.6. 135 °C’de yapılan deneylere ait sonuçlar



(a)



(b)

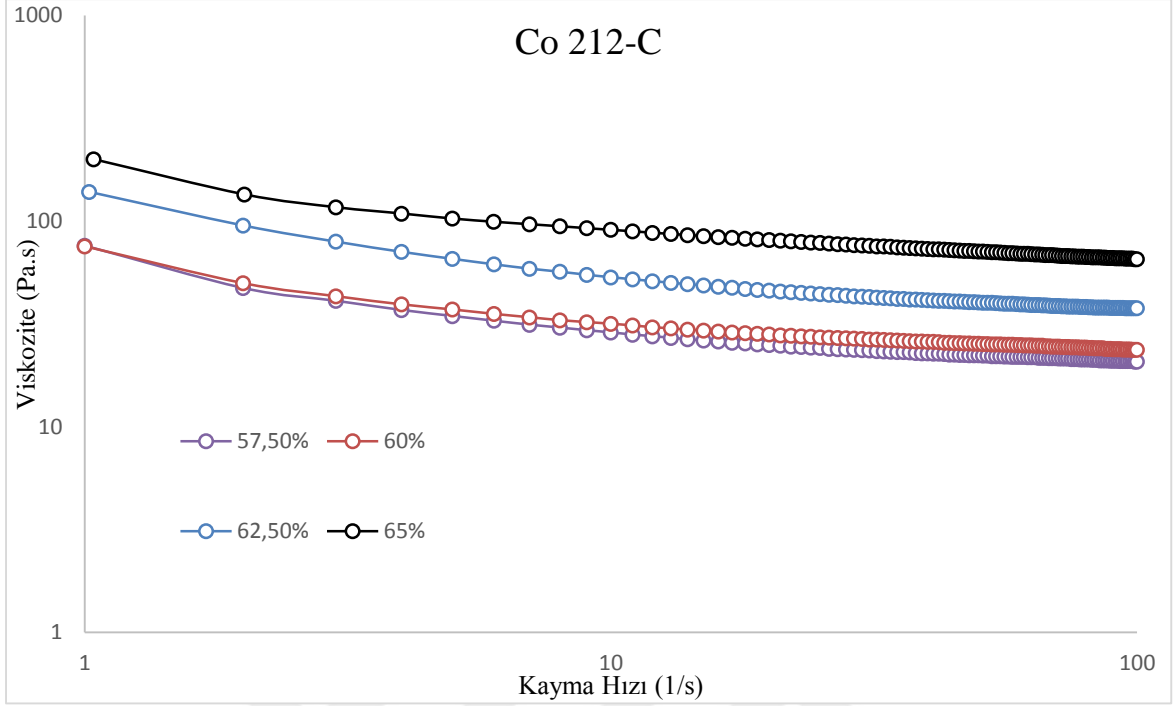


(c)

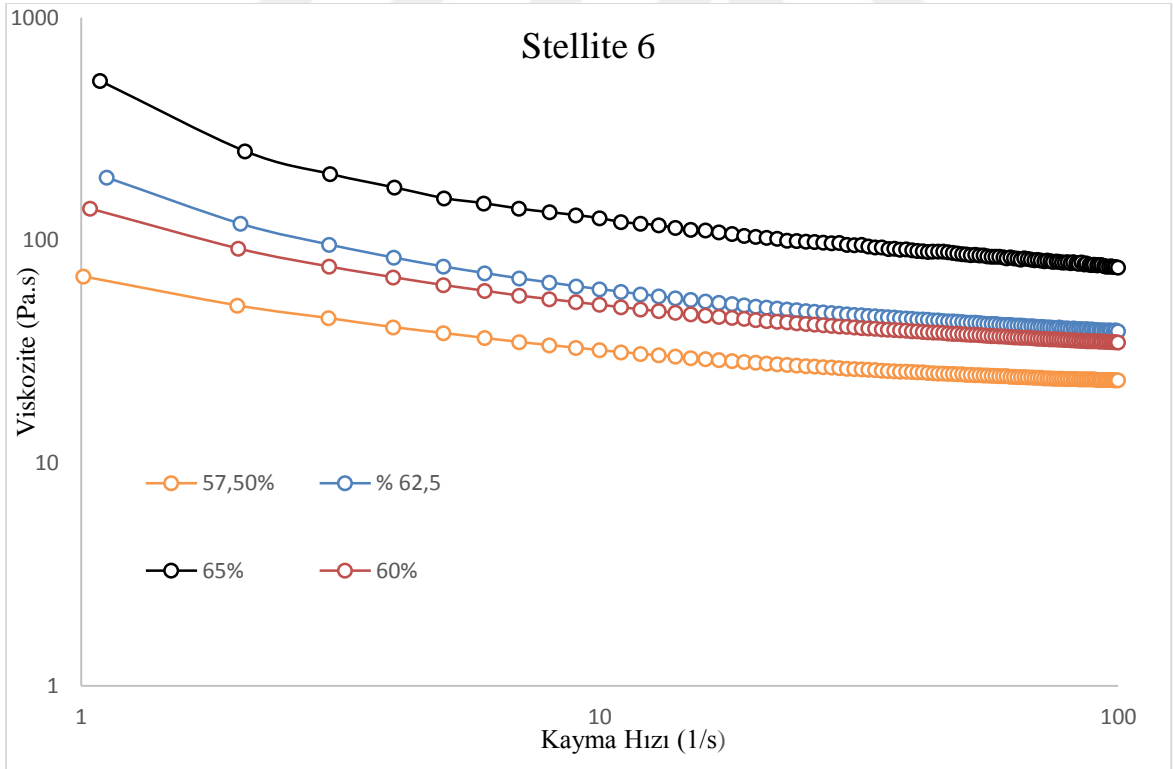
Şekil 5.6. 135 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 60 toz oranına kadar kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

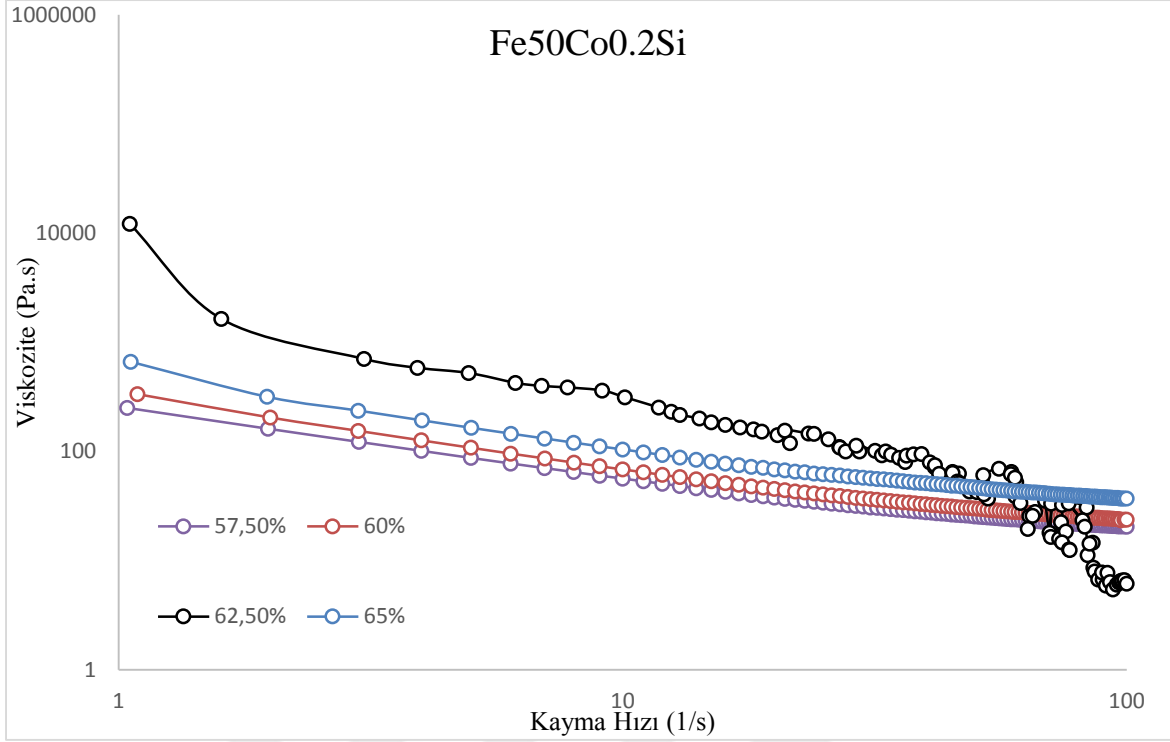
5.1.7. 130 °C’de yapılan deneylere ait sonuçlar



(a)



(b)



Şekil 5.7. 130 °C'de yapılan çalışmalar a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

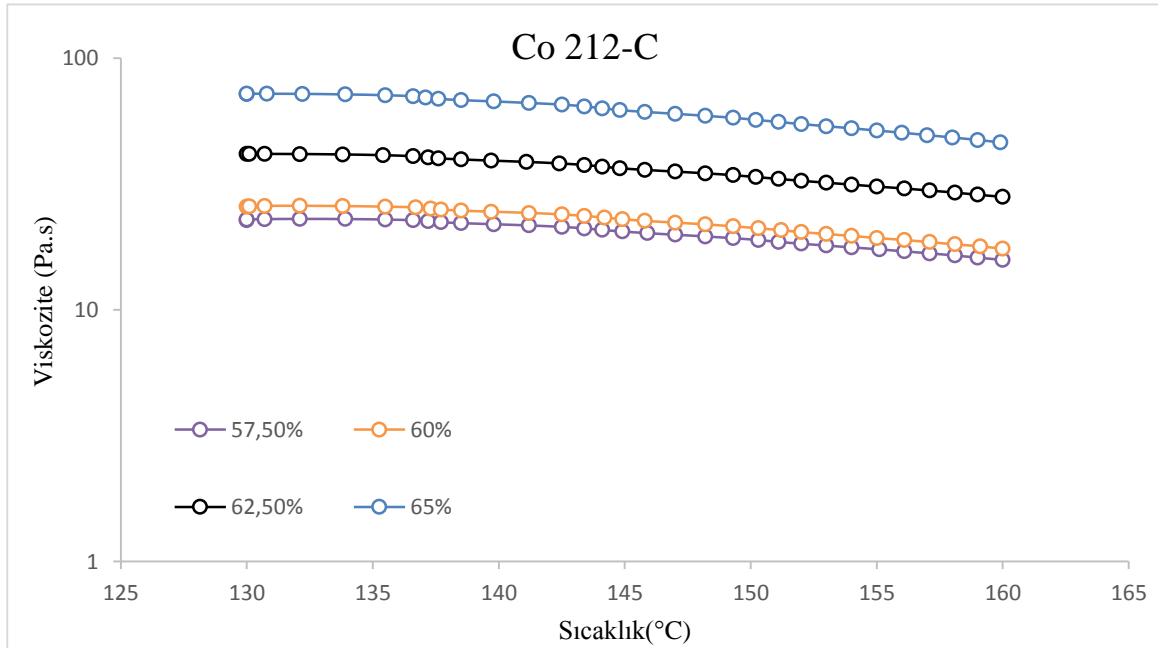
Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile azalmaktadır. Artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma besleme stoğu içerisindeki parçacıkların (ya da bağlayıcı moleküllerinin) oryantasyonunu ve akışla hizaya girdiğini göstermektedir. Bu sayede malzeme katmanları arasında homojenlik sağlanarak, birbiri üzerinde rahat bir kayma sağlanmaktadır. Bu nedenle psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Co 212-C ve Stellite 6 tozları % 60 toz oranına kadar kullanışlı olup bu sıcaklıkta hiçbir katı oranında Fe50Co0.2Si tozu kalıplama için uygun değildir, viskozite değerleri yüksek seviyededir.

Düşük sıcaklıklarda viskozitede artış olduğundan akış sağlanamamış ve yüksek sıcaklıklarda ise viskozitede azalma olduğundan kalıplamaya uygun akış sağlanamamıştır. Besleme stoğundaki tozun fazla, bağlayıcının az bulunması halinde viskozitede artış olmakta ve kalıplamada zorluklar yaşanmaktadır. Bağlayıcı oranının fazla olması durumunda ise kalıplamada bağlayıcı ayrışması, bağlayıcı gidermede çökme, çatlamların yaşanması ve sinterleme sırasında istenilenden fazla boyutsal daralmalara neden olmaktadır (German, 1990).

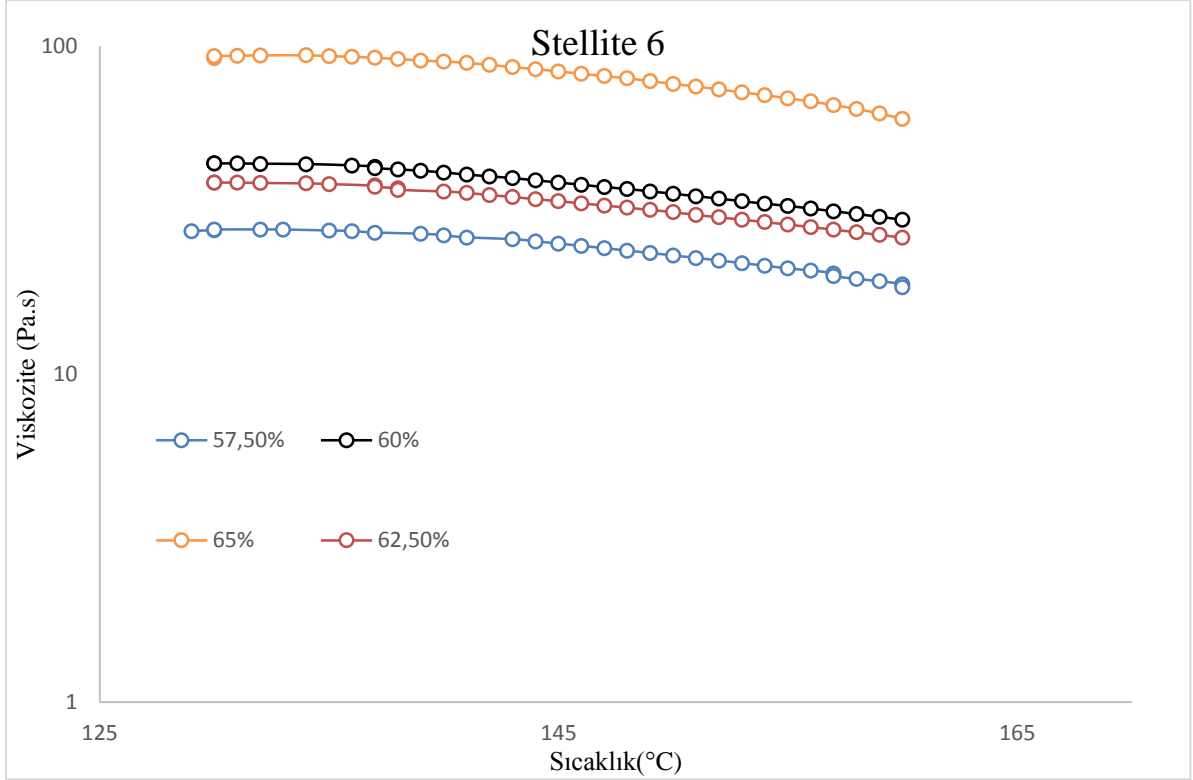
Enjeksiyon kalıplama işlemi sırasında kayma hızının 100 ile 1000 s⁻¹ aralığında olması ve buna bağlı olarak da düzgün bir kalıplama yapılabilmesi için viskozitenin 1000 Pa.s 'nin alt değerlerinde olması gerekmektedir. İyi bir karışımın karakterizasyonu, 100 s⁻¹'deki akışkanlığı belirlemektedir (Resende, 2001). Enjeksiyon kalıplamada besleme stoğunun viskozitesi, enjeksiyon sırasında artan kayma hızıyla hızlı bir şekilde azalma göstermesi arzu edilmektedir. Çünkü kalıplama boyunca toz ve bağlayıcının birbirinden ayrılma olasılığı söz konusudur. Bundan dolayı hazırlanan besleme stoklarının genellikle psödoplastik akış davranışı sergilemesi istenmektedir. Bu durum parçacık ya da bağlayıcı moleküllerinin akışla beraber yönlenmeleri ve hizaya girmesi ile malzemede incelleme oluşmasına bağlıdır. Bu yüksek kayma hassasiyeti, TEK endüstrisinde üretilen karışık ve hassas ürünler için özellikle önem arz etmektedir (Huang ve Qu, 1999; Khakbiz ve ark., 2005).

5.1.8. Artan sıcaklıklar ile yapılan deneylere ait sonuçlar

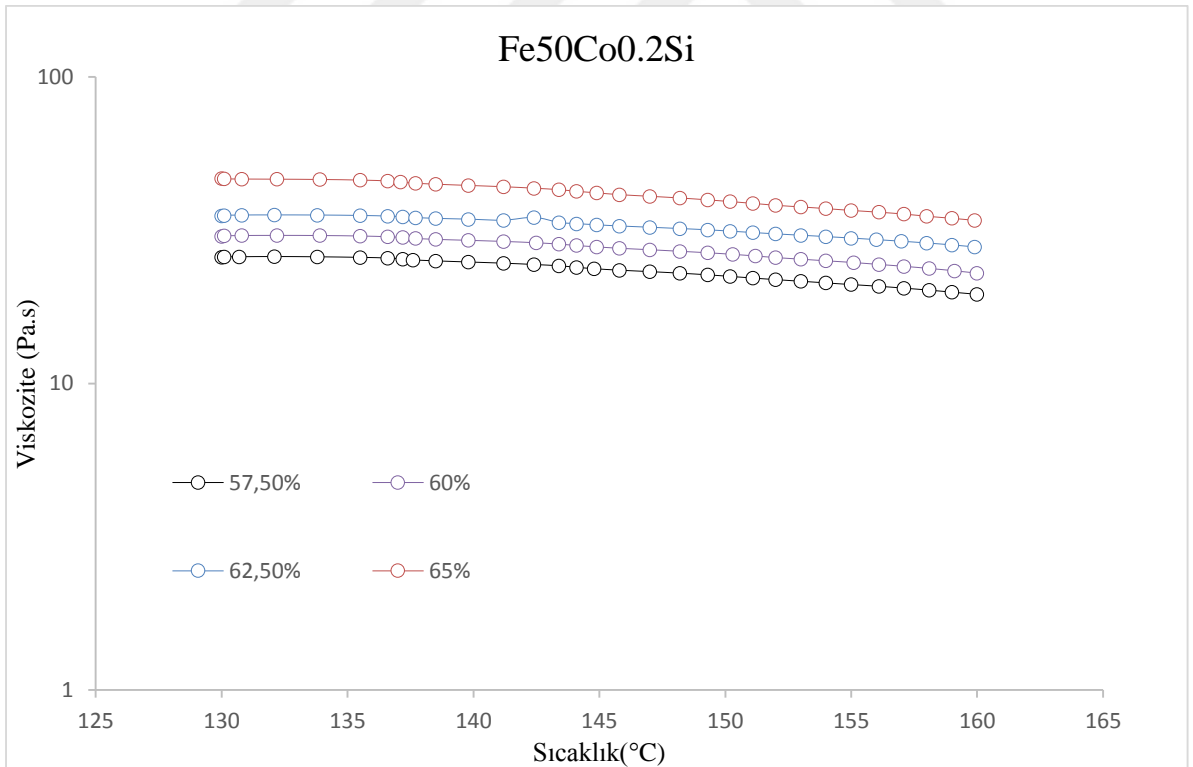
Şekil 5.8'de sabit kayma hızında, besleme stoklarının sıcaklığa bağlı olarak viskozitelerindeki değişimin grafiği gösterilmektedir. Tüm % hacimce toz oranlı besleme stoklarının viskoziteleri sıcaklığın artışıyla azalma göstererek psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Bu davranış, sıvı bağlayıcının serbest bırakılmasıyla parçacık yığınlarının kırılmasından kaynaklanıyor olabilir (German ve Bose, 1997).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.8. Sabit kayma hızında artan sıcaklıkla viskozite değişimi çalışmaları

a) Co 212-C b) Stellite 6 c) Fe50Co0.2Si

Şekil 5.8’de sabit kayma hızında, besleme stoklarının sıcaklığa bağlı olarak viskozitelerindeki değişimin grafiği gösterilmektedir. Tüm % hacimce toz oranlı besleme stoklarının viskoziteleri sıcaklığın artışıyla azalma göstererek psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Bu davranış, sıvı bağlayıcının serbest bırakılmasıyla parçacık yığınlarının kırılmasından kaynaklanıyor olabilir (German ve Bose, 1997). Artan toz yüklemesi ile de hem viskozite değerlerinde hem de sabit bir viskozite değerindeki gerekli olan sıcaklıklarda da artma olmaktadır. Ayrıca besleme stoklarının katılaşma sıcaklıkları minimum toz yükleme oranından daha yükseğe çıkıldıkça yükselme gerçekleşmektedir. Edirisinghe ve arkadaşlarının deneysel çalışmalarına göre sıcaklık değişiminin besleme stoklarının viskozitesine etkisi, besleme stoklarının kalıplanabilirliğini belirleyen önemli değişkenlerden biri olduğu tespit edilmiştir. Artan sıcaklıkla viskozitede azalma olduğu görülmüştür. Toz enjeksiyon kalıplama işleminde viskozitenin sıcaklığa bağlı değişiminin gayet önemli olduğunun üzerinde durulmuştur. Eğer besleme stoğunun viskozitesi sıcaklık değişimine çok duyarlı ise kalıplama işlemi esnasında herhangi bir küçük sıcaklık değişiminde viskoziteyi etkileyeceği, bu etkilenme sonucu ile de kalıplanmış parça içerisinde konsantrasyon gerilmesine sebebiyet verecektir. Ayrıca numunede çatlama ve bozulmalar da olacaktır. Sıcaklığın artmasıyla besleme stoklarının viskoziteleri azalmaktadır. Bu durum temel olarak iki olguya bağlanmaktadır (Bilketay, 2017).

- (a) Isı uygulandığında, bağlayıcının daha büyük ölçüde genişlemesinden kaynaklanan toz hacminde bir azalma
- (b) Rastgele dağılmış moleküler yapıyı dağıtmak için daha fazla ısı verildiğinde molekül zincirinin çözülmesi

6. SONUÇ

Kobalt esaslı tozlar ileri teknoloji süperalaşım aralarında önemli bir yere sahip olup, yüksek sıcaklık ve mukavemet gerekli ortamlarda kullanılır. Havacılık, otomotiv, bilgisayar gibi sektörlerde kullanılır ve iyi performans sergileyen ürünlerdir. Karmaşık şekilli malzemelerin üretiminde Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) tekniği, endüstriyel açıdan oldukça avantajlı bir yöntemidir. İyi bir karışımın karakterizasyonu, 100 s^{-1} 'deki akışkanlığı belirlemektedir. Enjeksiyon kalıplamada besleme stoğunun viskozitesi, enjeksiyon sırasında artan kayma hızıyla hızlı bir şekilde azalma göstermesi arzu edilmektedir. Çünkü kalıplama boyunca toz ve bağlayıcının birbirinden ayrılma olasılığı söz konusudur. Bundan dolayı hazırlanan besleme stoklarının genellikle psödoplastik akış davranışı sergilemesi istenmektedir. Bu durum parçacık ya da bağlayıcı moleküllerinin akışla beraber yönlendirmeleri ve hizaya girmesi ile malzemede incelmeye oluşmasına bağlıdır. Bu yüksek kayma hassasiyeti, TEK endüstrisinde üretilen karışık ve hassas ürünler için özellikle önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, kobalt esaslı süperalaşım ve çeşitli polimer bağlayıcılar besleme stoğu hazırlamak için kullanılmıştır. Tozun morfolojisi SEM ile analiz edilmiştir. Literatüre uygun olarak hacimce %57.5-65 oranında değişen toz ilaveleri ile polimer bağlayıcılarla karıştırılarak besleme stokları elde edilmiştir. Besleme stoklarının reolojik özellikleri reometre cihazı kullanılarak farklı sıcaklıklarda ölçümleri yapılmıştır. Besleme stokları, TEK için temel gereksinimlerden biri olan psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Besleme stoğu ayrıca yüksek toz ilavelerinde sıcaklığa yüksek hassasiyet göstermektedir. Reometre ile besleme stoğunun reolojik özellikleri araştırılmıştır. Viskozite, tüm çalışma sıcaklıkları için kayma hızı ile çoğunlukla azalmakta ve kısmi olarak psödoplastik akış davranışı sergilemektedir. Erime Akış İndeks verilerinden yola çıkılarak çoğunlukla $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ideal akış sıcaklığı olarak belirlenmiştir. % 62.5 ve % 65 toz hacimce besleme stokları için tam bir akışın sağlanabilmesi için daha yüksek sıcaklıklara gereksinim duyulmaktadır. Fakat hem sıcaklığın artması hem de toz oranlarının artması ile istenilen akış sürekliliği sağlanamamıştır. %57.5 toz hacimce oranında maksimum düzgün akış sağlanmış ve toz oranı arttıkça sürekliliğini kaybetmiştir.

Reometrik ölçümlerde de aynı durum söz konusudur. 140 °C sabit bir sıcaklıkta katı oranı arttıkça viskozitede yükselme olmaktadır. Bu durum malzemelerdeki bağlayıcı sisteminin azalmasına ve toz oranının artmasıyla oluşan sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Fakat kritik toz yüklemesi olan %55 oranından sonra akış düzeni bozulmakta ve gözle görülür bir şekilde sapmalar meydana gelmektedir. Süperalaşım tozları üzerine çalışılması gereken bir çalışma alanıdır. TEK yöntemi ile uygun şekilde üretimler yapılabilir.



7. KAYNAKÇA

1. **Angermann, H., Yang, F.K., Biest, V.D.** (1992) Removal of Low Molecular Weight Components During Thermal Debinding of Powder Compacts. *Journal of Materials Science*, 27 (9), 2534-2538.
2. **Apostolidis, A. J.** (2015) Modeling of Non-Newtonian Blood Rheology with Appliatins to Arterial Flow Simulations. University of Delaware, Newark, ABD.
3. **Barrie, C. L.** (2004) The Rheology of Carbon Black Dispersions. Doktora Tezi, Cardiff Üniversitesi, Cardiff, Wales, Birleşik Krallık.
4. **Betteridge, W.,** (1959) The Nimonic Alloys. Edward Arnold (publishers) Ltd., London.
5. **Bradley, E.F.,** (1979) Source book on materials for elevated-temperature applications: a comprehensive collection of outstanding articles from the periodical and reference literature. Elihu F. Bradley (Ed.), American Society for Metals.
6. **Chandler, H.E., Baxter Jr, D.F.,** (1978), *Met.Prog.* Vol: 113(1) pp.41.
7. **Çakar, Y.,**(2006) Toz Enjeksiyon Kalıplama İle Üretilmiş Ti-6Al-4V Parçalarda İşlem, Yapı ve Özellik İlişkileri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
8. **Çay, V.V., Ozan, S.,** (2005) Süperalaşımalar ve Uygulama Alanları. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 178-188.
9. **Çelebi, N.,** (2007): Reoloji, Modern Farmasötik Teknoloji, s. 391.
10. **Çelik, N.** (2009) Modern Farmasötik Teknoloji: Reoloji.
11. **Çelik, N.,** (2009) Modern Farmasötik Teknoloji: Reoloji.
12. **Dalkılıç, M.** (2001) Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilmiş 17-4 Çökeltiyle Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelik Gaz ve Su Atomize Toz Parçalarının Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
13. **Dalkılıç, M.,** (2001) Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilmiş 17-4 Çökeltiyle Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelik Gaz ve Su Atomize Toz Parçalarının Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, FBE, Ankara.
14. **Davis, J.R.,** (2000) Metallographic and Microstructures of Heat Resistant Alloys. In *ASM Specialty Handbook: Nickel Cobalt, and Their Alloys*, 298-330.

15. **Donachie, M.J., Donachie, S.J.**, (2002 a) Superalloys: A Technical Guide. ASM International, Materials Park, OH.,.
16. **Donachie, M.J., Donachie, S.J.**, (2002 b) Selection of Superalloys for Design. In Handbook of Material Selection, Myer KUTZ (ed.), John Wiley & Sons, Inc., 10: 293-334.
17. **Ersümer, A.**, (1993) "Toz metalürjisi sert metal sinterleme", İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul, 30-40 (1993).
18. **Ersümer, A.**, 1970, Toz metalürjisi sert metal sinterleme, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
19. **Froes, FHS., Hebesien, J.**, (1998) Advances in Powder Metallurgy Applications. In ASM Handbook: Powder Metal Technologies and Applications, 7:43-63.
20. **Garimella, L., Liaw PK., Klarstrom, DL.**, (1997) Fatigue Behavior in Nickel-Based Superalloys: A Literature Review. JOM, 67–71.
21. **German, R. M.** (2007) Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri (Çeviri), Türk Toz Metalürjisi Derneği, Ankara, Türkiye.
22. **German, R. M.** (2014) Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları (Çeviri), Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
23. **German, R. M.**, (1990) "Powder Injection Molding", Metal Powder Industries Federation, USA, 1990, s. 219–276.
24. **German, R. M.**, (1990) Supersolidus liquid phase sintering: Part I Process review. International Journal of Powder Metallurgy, 26(1): 23–34.
25. **German, R. M.**, (1996) Sintering Theory and Practice. Wiley-Interscience, New York.
26. **German, R. M.**, (1997 a) Powder injection moulding of metal and ceramics. Metal Powder Industry Federation, Princeton, New Jersey.
27. **German, R. M.**, (1997 b) Bose, A., Injection Molding of Metals and Ceramics. Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 99–132, 148–174.
28. **German, R. M.**, (1998) Powder Injection Molding. In ASM Handbook: Powder Metal Technologies and Applications, 7: 831–851.
29. **Gülsoy, H.Ö.**, (2003) Toz Enjeksiyon Kalıplama Metodu İle Üretilmiş 17-4 PH Paslanmaz Çelik Parçalara Yapılan İki Tip Bor İlavesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Marmara Üni. FBE.
30. **Hagel, WC., SIMS, CT.**, (1972) The Superalloys, Wiley-Interscience.

31. **Hausnerova, B., Marcanikova, L., Filip, P., Saha, P.** (2011) Rheological Characterization of Powder Injection Moulding Using Feedstock Based on Aluminium Oxide and Multicomponent Water-Soluble Polymer Binder. *Recent Advances in Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer*, 245-250.
32. **Hausnerova, B., Sanetrnik, D.** (2013) Moldability of Highly Filled Polymers. *Chemické Listy*, 107, 81-82. <http://www.steelforge.com/metaltidbits/nimonic.htm> (erişim tarihi: 30.06.2011)
33. **James, BA.**, Liquid Phase Sintering in Ferrous Powder Metallurgy. *Powder Metallurgy* 1985, 28(3): 121-130.
34. **Karatas, Ç., Santas, S.**, (1998) "Toz enjeksiyonla kalıplama: Bir ileri teknoloji imalat metodu", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13 (2):193-228.
35. **Khakbiz, M., Simchi, A., Bagheri, R.** (2005) "Investigation of Rheological Behaviour of 316L Stainless Steel-3 wt-%TiC Powder Injection Moulding Feedstock. *Powder Metallurgy*, 48 (2), 144-150.
36. **Li, Y., Qu, X., Huang, B.** (1999) Viscosity and Melt Rheology of Metal Injection Moulding Feedstocks. *Powder Metallurgy*, 42 (1), 86-90.
37. **Lin, S.T., German, R.M.** (1994) The Influence of Powder Loading and Binder Additive on the Properties of Alumina Injection-moulding Blends. *Journal of Materials Science*, 29 (20), 5367-5373.
38. **Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B., Khor, K.A.** (2003) Characterization of Powder Injection Molding Feedstock. *Materials Characterization. Materials Characterization*, 49, 313-320.
39. **Mankins, WL., Lamb, S.**, (1990) Nickel and Nickel Alloys. In *ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 2: 1363-1404.
40. **Mutsuddy, B., C, Ford, R., G.**, (1995) "Ceramic injection molding", *Chapman&Hall, U.S.A.*, 291-351.
41. **Özgün, Ö.** (2012) Nikel Esaslı Süperalaşım Malzemelerin Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.*

42. **Pollock, T.M.**, Tin, S., Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal of Propulsion and Power* March-April 2006, 22(2): 361–374.
43. **Powder Industries Federation**, (1997), Princeton, NJ, USA, 08540-6692.
44. **Resende, L.M., Klein, A. N., Prata, A. T.** (2001) Rheological Properties of Granulometric Mixtures for Powder Injection Molding. *Key Engineering Materials*, 189-191, 598-603.
45. **Shah, S. J.** (1988) Injection Molding and Rheology of Powder Metal-Filled Compounds for Metal Injection Molding, University of Lowell, Lowell, ABD.
46. **Shah, S.J.** (1987) Injection Molding and Rheology of Powder Metal Filled Compounds for Metal Injection Molding, University of Lowelli Lowell, USA.
47. **Sims, C.T., Stoloff, N.S., Hagel W.C.**, (1987) Superalloys II, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons.
48. **Stoloff, NS.**, (2005) Wrought and Powder Metallurgy (P/M) Superalloys. In *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, 1: 1478–1527.
49. **Suri. P., Atre, S.V., German, R.M., de Souza, J.H.** (2003) Effect of Mixing on the Rheology and Particle Characteristics of Tungsten-Based Powder Injection Molding Feedstock. *Materials Science and Engineering A*, 356, 337-344.
50. **Thian, E.S., Loh, N.H., Khor, K.A., Tor, S.B.** (2002) Ti-6Al-4V/HA Composite Feedstock for Injection Molding. *Materials Letters*, 56 (4), 522-532.
51. **Thümmler, F., Oberacker, R.**, (1993) Introduction to Powder Metallurgy. Institute of Materials, London.
52. **Topbaş, MA.**, (1993) Endüstri Malzemeleri 2. Cilt, Prestij, İstanbul.
53. **Vervoort, P.J., Vetter, R., Duszczyk, J.**, (1996) Overview of Powder Injection Molding. *Advanced Performance Materials* 3: 121–151.
54. **Walters, K.** (1993) An Introduction To Rheology, Elsevier Science.
55. **Walters, K.**, (1993) An Introduction To Rheology, Elsevier Science.
56. **Wang, C., Lu, Z., Zhang, K.** (2012) Microstructure, Mechanical Properties and Sintering Model of B4C Nozzle with Micro Holes by Powder Injection Molding. *Powder Technology*, 228, 334-338.

57. **Wang, J., Shi, Q., Wu, C., Xi, J.** (2013) Rheological Characteristics of Injection Molded Titanium Alloys Powder. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23 (9), 2605-2610.
58. **Whittaker, D.,** (2007) Powder injection moulding looks to automotive applications for growth and stability. PIM International June 2007, 1(2): 1753-1497.
59. **Wilyman, PR.,** n.d. Sintering with Nitrogen Based Atmospheres. Powder Metallurgy 1985, 28(2): 85-89.
60. **Young, R. S.,** (1960), Cobalt, American Chemical Monograph Series, American Chemical Society, Rhinehold, No:149, New York.
61. **Yücel, İ.** (2007) Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Alüminanın Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Adı Soyadı

Eren GAYRETLİ

Doğum Yeri ve Tarihi

13 Aralık 1991, İstanbul

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Eğitim

İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya & Cevher Haz. Mühendisliği 2010-2016

Ümraniye Merkez Anadolu Lisesi 2010

Projeler**Tubitak Projeleri**

- Effect of NaPAA as a dispersant agent in paint raw materials

June 2015-January 2016

NaPAA which is a dispersant for paint. Main purpose of this project determine a new dispersant agent and determine dosage of this dispersant by investigated effect on viscosity, zeta potential, sedimentation and adsorption.

- Production of New Materials for paint using Sol-Gel method

June 2015-January 2016

- Production of new, cheapest and more effective raw material instead of solid particle in paint.
- Effect of particle morphology on flotation

September 2015-February 2016

- Investigate surface characteristic of particles for suitable flotation

Yayınlar

- 269th International Conferences on Metallurgy Technology and Materials (ICMTM)

Bucharest, Romania 24th-25th October, 2017

“Investigation of Rheological Properties of Cobalt Based Superalloy Powder PIM

Feedstock” Authors: Eren Gayretli ¹ and H.Ozkan Gulsoy ²