



**TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA (TEK) İLE TİTANYUM PARÇA
ÜRETİMİNDE KULLANILACAK OPTİMUM ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet SUBAŞI

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2014

Mehmet SUBAŞI tarafından hazırlanan “TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA (TEK) İLE TİTANYUM PARÇA ÜRETİMİNDE KULLANILACAK OPTİMUM ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Çetin KARATAŞ
İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Teyfik DEMİR
Makine Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 29/12/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

Mehmet SUBAŞI
29.12.2014

TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA (TEK) İLE TİTANYUM PARÇA ÜRETİMİNDE KULLANILACAK OPTİMUM ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mehmet SUBAŞI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2014

ÖZET

Titanyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve mükemmel biyouyumluluk gibi nedenlerden dolayı endüstride birçok parçada ve biyomedikal uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), plastik enjeksiyon kalıplama ve geleneksel toz metalurjisi tekniklerinin kombinasyonundan ortaya çıkmış yeni bir yöntemdir. TEK yöntemi küçük ve karmaşık şekilli parçaların seri üretimi için birçok benzersiz avantajlar sunar. Bu çalışmada, Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşımlarından TEK ile parça üretimi için gerekli optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak polimerik esaslı bağlayıcı sistem geliştirilmiş ve bu geliştirilen bağlayıcı sistem ile hazırlanan besleme stoklarının reoloji çalışmaları yapılmıştır. Reoloji deneyleri sonrasında kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme çalışmaları ile çalışma derinleştirilmiştir. Reoloji deneyleri sonucunda Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşım tozları ile hazırlanan besleme stoklarının optimum toz yüklemesi sırasıyla hacimce %65 ve % 69 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca reoloji deneyleri sonucunda hazırlanan besleme stokları için ideal enjeksiyon sıcaklığının 140-150-160 °C olduğu belirlenmiştir. Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb ile hazırlanan besleme stoklarının optimum toz yüklemesindeki viskoziteleri sırasıyla 906,761 Pa.s (140 °C) ve 975,817 Pa.s (140 °C) olarak tespit edilmiştir. Çalışmada besleme stoklarının kimyasal bağlayıcı giderme süreci için en uygun çözücünün “heptan” olduğu görülmüştür. Kalıplama ve sinterleme parametrelerinin tespiti için Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımı sonucu Ti-6Al-4V besleme stoku için en uygun parametreler debi 20 cm³/s, enjeksiyon basıncı 1100 bar, ütüleme basıncı % 60, enjeksiyon sıcaklığı 140 °C, sinterleme sıcaklığı 1250 °C, sinterleme süresi 1 saat, sinterleme hızı 1 °C/min, gaz akış hızı 10 l/min; Ti-6Al-7Nb besleme stoku için ise debi 20 cm³/s, enjeksiyon basıncı 1300 bar, ütüleme basıncı % 60, enjeksiyon sıcaklığı 140 °C, sinterleme sıcaklığı 1250 °C, sinterleme süresi 1 saat, sinterleme hızı 1 °C/min, gaz akış hızı 5 l/min olarak tespit edilmiştir. Optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde elde edilen Ti-6Al-4V numunelerde 711,79 MPa çekme dayanımı ve %12,85 boyda çekme, Ti-6Al-7Nb numunelerde ise 631,12 MPa çekme dayanımı ve %12,69 boyda çekme elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Toz Enjeksiyon Kalıplama, Sinterleme
Sayfa Adedi : 130
Danışman : Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

THE INVESTIGATION OF OPTIMUM PARAMETERS TO BE USED IN
PRODUCTION OF TITANIUM PARTS WITH POWDER INJECTION MOLDING

(Ph. D. Thesis)

Mehmet SUBAŞI

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
December 2014

ABSTRACT

Having some properties like low density, high temperature resistance, corrosion resistance and excellent biocompatibility, has made titanium and its alloys to be used in many industrial and biomedical applications. As a new production process, Powder Injection Molding (PIM) refers to a combination of powder metallurgy and plastic injection molding technologies. PIM method offers several unique advantages in mass production of small and complex-shaped parts. In this study, the PIM optimal parameters of molding and sintering stages, for fabricating of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb alloys have been determined. Polymeric based binder system was developed as an initial step of this study. Then the rheological behavior of feedstock encompassing polymeric binder was studied. It was followed by injection, debinding and sintering stages. As a result of rheological experiments, the optimum powder loadings of feedstocks containing Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb powders, were determined to be 65% and 69% by volume, respectively. Furthermore, rheological study revealed ideal injection temperature for the prepared feedstock to be 140-150-160 °C. Also viscosity evaluation at 140°C, for Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb feedstocks with optimal powder loadings showed the amounts of 906.761 Pa s and 975.817 Pa s, respectively. Based on the kind of binder system, heptane was determined as the most suitable solvent for chemical debinding process. To realize the molding and sintering parameters, Taguchi method of experimental design has been applied. As a result, Ti-6Al-4V feedstock studies exhibited flow rate of 20 cm³/s, injection pressure of 1100 bar, holding pressure of 60%, injection temperature of 140 °C, sintering temperature of 1250 °C, sintering dwell time of 1 hour, sintering heating rate of 1 °C/ min, gas flow rate of 10 lit/min, as optimum parameters. The other feedstock comprising Ti-6Al-7Nb powders was processed with optimum parameters as follows; flow rate of 20 cm³/s, injection pressure of 1300 bar, holding pressure of 60%, injection temperature of 140 °C, sintering temperature of 1250 °C, sintering dwell time of 1 hour, the sintering heating rate of 1 °C/min, gas flow rate 5 lit/min. Under the mentioned optimum parameters the tensile strength and shrinkage of Ti-6Al-4V specimens were 711.79 MPa and 12.85%, respectively. This is while those properties of Ti-6Al-7Nb specimens were evaluated to be 631.12 MPa and 12.69%, respectively.

Science Code : 708.3.028

Key Words : Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Powder Injection Molding, Sintering

Page Number : 130

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Bu heyecan verici konu üzerinde çalışmamı sağlayan, hiçbir zaman desteğini ve rehberliğini esirgmeden motivasyonumu en üst seviyede tutan danışmanım Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel verilerin değerlendirilmesi esnasında katkıda bulunan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mehmet TÜRKER ve Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkması süresince birçok bilim insanı yardımlarını esirgememiştir. Çalışmanın ortaya çıkmasında yardımları olan Prof. Dr. Orhan ACAR, Doç. Dr. Onuralp ULUER, Doç. Dr. Servet ÇETE, Yrd. Doç. Dr. Ebru SOLAK, Dr. Asgar SAFARIAN, Dr. Ahmet MAVİ, Dr. Ugur GÖKMEN, Yüksek Teknik Öğretmen M. Sami ERGÜNEY, Makine Yüksek Mühendisi Mete BAĞDATLI'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca tezin ortaya çıkmasında,

- 07/2011-01 kodlu “Titanyum ve Titanyum Alaşımı Tozlarından Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) ile Parça Üretimi için Reolojik Çalışmaların Yapılması” konulu proje ile desteklediği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne,
- 213M557 kodlu “Toz Enjeksiyon Kalıplama İle Titanyum Alaşım Esaslı Parça Üretimi İçin Optimum Enjeksiyon Ve Sinterleme Parametrelerinin Belirlenmesi” konulu hızlı destek projesi ile TÜBİTAK'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ailemin tüm fertlerine, sabır ve desteğinden dolayı eşime ve oğullarım Cemal Emir ve Kerem'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. TİTANYUM	25
3.1. Titanyum Alaşımı Türleri	26
4. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA	29
4.1. TEK de Kullanılan Tozlar	30
4.2. TEK de Kullanılan Bağlayıcı Sistem	32
4.3. Karıştırma ve Granülleme	33
4.4. Enjeksiyon Kalıplama	34
4.5. Bağlayıcı Giderme	36
4.6. Sinterleme	37
5. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMADA BESLEME STOKLARININ GENEL REOLOJİK ÖZELLİKLERİ	39
6. MALZEME VE YÖNTEM.....	41
6.1. Malzeme.....	41
6.2. Bağlayıcı Sistem Elemanları	42
6.3. Besleme Stoklarının Hazırlanması	42

	Sayfa
6.4. Reoloji Çalışmaları	43
6.5. Toz Enjeksiyon Kalıplama	45
6.5.1. Kalıp şartlandırıcı	47
6.6. Bağlayıcı Giderme İşlemi	47
6.7. Sinterleme İşlemi.....	48
6.8. Sinterlenmiş Numunelerin Boyutsal Çekme - Yoğunluk Oranı Ölçümü	49
6.9. Çekme Deneyleri.....	50
6.10. Mikroyapı Analizleri	50
6.11. Termal Analizler (DTA-TG).....	50
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	51
7.1. Tozların Karakterizasyonu.....	51
7.2. Besleme Stokları	51
7.3. Reoloji Deneyleri	52
7.3.1. Ti-6Al-4V besleme stoklarının reoloji deneyleri	54
7.3.2. Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının reoloji deneyleri.....	59
7.3.3. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarına sıcaklığın etkisi.....	63
7.3.4. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının kalıplanabilirlik indeksi.....	67
7.3.5. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının reoloji sonuçlarının değerlendirilmesi	68
7.4. Bağlayıcı Giderme Deneyleri.....	71
7.4.1. Kimyasal bağlayıcı giderme deneyleri.....	71
7.4.2. Isıl bağlayıcı giderme deneyleri.....	73
7.5. TEK Parametreleri.....	74
7.6. Sinterleme Parametreleri.....	77

	Sayfa
7.7. Deney Tasarımı.....	80
7.8. Hacimce %65 Ti-6Al-4V + %35 Bağlayıcıdan Hazırlanan Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları.....	83
7.9. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb + %31 Bağlayıcıdan Hazırlanan Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları.....	87
7.10. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb Besleme Stoklarının Optimum Üretim Parametrelerinin Değerlendirilmesi	91
7.10.1. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum kalıplama parametrelerinin değerlendirilmesi	97
7.10.2. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum sinterleme parametrelerinin değerlendirilmesi	103
7.10.3. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb numunelerin mikroyapı değerlendirmesi	107
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	111
8.1. Sonuçlar	111
8.2. Öneriler	113
KAYNAKLAR.....	115
EKLER.....	123
Ek-1. Optimum Toz Yükleme Besleme Stokları İle Üretilmiş Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları.....	124
Ek-2. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb Numunelerin Çekme Yüzdeleri.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı bazı yerler.....	27
Çizelge 3.2. Alaşım elementlerinin titanyuma etkileri.....	28
Çizelge 4.1. Tozların özellikleri ve TEK'e etkileri	32
Çizelge 6.1. Ti-6Al-4V tozunun kimyasal özellikleri	42
Çizelge 6.2. Ti-6Al-7Nb tozunun kimyasal özellikleri	42
Çizelge 6.3. Bağlayıcı Sistem Elemanları.....	42
Çizelge 6.4. Arburg Allrounder 220S enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri	46
Çizelge 6.5. Kalıp şartlandırıcının özellikleri	47
Çizelge 7.1. Tozların genel özellikleri	51
Çizelge 7.2. Deneyler için hazırlanan besleme stokları	52
Çizelge 7.3. Kritik ve optimum toz yüklemesindeki Ti-6Al-4V besleme stoklarının “n” değerleri	57
Çizelge 7.4. Ti-6Al-4V besleme stokunun optimum ve kritik yüklemelerdeki reoloji verileri	58
Çizelge 7.5. Kritik ve optimum toz yüklemesindeki Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının “n” değerleri	61
Çizelge 7.6. Ti-6Al-7Nb besleme stokunun optimum ve kritik yüklemelerdeki reoloji verileri	62
Çizelge 7.7. Besleme stoklarının akış aktivasyon enerjileri (0,524 MPa yüklemesinde)	65
Çizelge 7.8. Besleme stoklarının kalıplanabilirlik indeksi değerleri	68
Çizelge 7.9. Toz enjeksiyon kalıplama parametreleri	81
Çizelge 7.10. Sinterleme parametreleri	82
Çizelge 7.11. Taguchi yöntemi kullanılarak hazırlanan L27 modeli	83
Çizelge 7.12. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı için parametreler.....	84

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.13. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı için parametreler	85
Çizelge 7.14. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri	86
Çizelge 7.15. Ti-6Al-4V besleme stokundan hazırlanan numunelerin ANOVA analizi	86
Çizelge 7.16. Ti-6Al-4V numuneler için deney girdilerinin etki sıralaması	87
Çizelge 7.17. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı için parametreler	88
Çizelge 7.18. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı	88
Çizelge 7.19. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri	90
Çizelge 7.20. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan hazırlanan numunelerin ANOVA analizi	90
Çizelge 7.21. Ti-6Al-7Nb numuneler için deney girdilerinin etki sıralaması	91
Çizelge 7.22. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb alaşım tozları ile hazırlanmış besleme stoklarının optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri	91
Çizelge 7.23. Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	93
Çizelge 7.24. Ti-6Al-4V numunelerin MPIF 35 standardındaki özellikleri	97
Çizelge 7.25. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum kalıplama parametreleri	98
Çizelge 7.26. Besleme stoklarının enjeksiyon basıncı değerleri	99
Çizelge 7.27. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stokları için optimum sinterleme parametreleri.....	103

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Isıl bağlayıcı giderme aşamaları	11
Şekil 2.2. Isıl bağlayıcı giderme aşamaları	19
Şekil 4.1. Toz şeklinin yoğunluğa etkisi.	31
Şekil 4.2. Kalıp ve enjeksiyon silindirin kesit görünüşü	34
Şekil 4.3. Kalıp dolum şeklinin görünüşü	35
Şekil 4.4. Enjeksiyon kalıplama işlemi aşamaları	35
Şekil 4.5. Boyun Oluşumundaki Sinterleme Mekanizması.....	38
Şekil 6.1. 5 °C/min ısıtma hız ile yapılan ısıl bağlayıcı giderme aşamaları	48
Şekil 6.2. Sinterleme aşaması	48
Şekil 7.1. Bağlayıcı sistemin termogravimetrik analizi	53
Şekil 7.2. Bağlayıcı sisteminin sıcaklık - görünür viskozite grafiği	54
Şekil 7.3. Hacimce %57 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık - viskozite grafiği.....	55
Şekil 7.4. Hacimce %57 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı - viskozite grafiği.....	55
Şekil 7.5. Hacimce %65 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık - viskozite grafiği	56
Şekil 7.6. Hacimce %65 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı - viskozite grafiği.....	56
Şekil 7.7. Toz Yükleme oranının viskoziteye etkisi	57
Şekil 7.8. Ti-6Al-4V + Bağlayıcı (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) besleme stokunun optimum toz yükleme oranı.....	58
Şekil 7.9. Hacimce % 57 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık-viskozite grafiği	59
Şekil 7.10. Hacimce % 57 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı-viskozite grafiği.....	59

Şekil	Sayfa
Şekil 7.11. Hacimce % 69 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık-viskozite grafiği.....	60
Şekil 7.12. Hacimce % 69 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı-viskozite grafiği.....	60
Şekil 7.13. Toz yükleme oranının viskoziteye etkisi.....	61
Şekil 7.14. Ti-6Al-7Nb+ Bağlayıcı (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) besleme stokunun optimum toz yükleme oranı.....	62
Şekil 7.15. Farklı toz oranına sahip Ti-6Al-4V besleme stokunun ln görünür viskozite - 1/T grafiği (0,524 MPa yüklemede)	64
Şekil 7.16. Farklı toz oranına sahip Ti-6Al-7Nb besleme stokunun ln görünür viskozite - 1/T grafiği (0,524 MPa yüklemede).....	64
Şekil 7.17. İki farklı çözücüde kaldırılan bağlayıcı miktarları.....	72
Şekil 7.18. Heptanda kaldırılan bağlayıcı miktarları.....	72
Şekil 7.19. Ti-6Al-7Nb besleme stokunun TGA analizi	73
Şekil 7.20. Ti-6Al-7Nb / Ti-6Al-4V besleme stoklarının 5 °C/min ısıtma hızındaki ısıl bağlayıcı giderme aşamaları	74
Şekil 7.21. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı	84
Şekil 7.22. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı	84
Şekil 7.23. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı	87
Şekil 7.24. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı	88
Şekil 7.25. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde üretilmiş numunenin çekme dayanımı	92
Şekil 7.26. Ti-6Al-4V besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde üretilmiş numunenin çekme dayanımı	92

Şekil	Sayfa
Şekil 7.27. % 69 Ti-6Al-7Nb toz yüklemeli besleme stokundan hazırlanmış numunelerin, a) Bağlayıcı giderme işleminden sonraki boyda çekme değerleri, b) Sinterleme işleminden sonraki boyda çekme değerleri	100
Şekil 7.28. Ti-6Al-4V besleme stokundan 20 cm ³ /s / 1100 bar / % 50 / 140 °C kalıplama şartlarında üretilen parçaya kalıp sıcaklığının etkisi	102
Şekil 7.29. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan 20 cm ³ /s / 1100 bar / % 50 / 140 °C kalıplama şartlarında üretilen parçaya kalıp sıcaklığının etkisi	102
Şekil 7.30. Ti-6Al-4V numunelerin çekme dayanımları	105
Şekil 7.31. Ti-6Al-7Nb numunelerin çekme dayanımları	105

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Bir jet motorunun kesit görüntüsü	26
Resim 4.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama Aşamaları	29
Resim 6.1. Ti-6Al-4V tozunun SEM görüntüsü	41
Resim 6.2. Ti-6Al-7Nb tozunun SEM görüntüsü	41
Resim 6.3. Sıcak karışım yapılmış %50 Ti-6Al-7Nb + %50 B besleme stoku optik mikroskop görüntüsü	43
Resim 6.4. Çekme dayanımı test numunesi kalıbı	46
Resim 7.1. Çekme dayanımı test numunesi Mouldflow Insight dolum analizi..	75
Resim 7.2. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri 140 °C – 600 bar - 10 cm ³ /s (%65 Ti-6Al-4V))	76
Resim 7.3. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri 140 °C – 900 bar - 10 cm ³ /s (%65 Ti-6Al-4V))	76
Resim 7.4. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri 140 °C – 1000 bar - 10 cm ³ /s (%65 Ti-6Al-4V))	76
Resim 7.5. Kalıp üzerinde tam dolum (enjeksiyon parametreleri 140 °C - 1100bar - 20 cm ³ /s (%65 Ti-6Al-4V))	77
Resim 7.6. Küçük parçaların üretildiği kalıp.....	77
Resim 7.7. 1300 °C’de 1 saat sinterlenmiş Ti-6Al-4V numune.....	78
Resim 7.8. 1300 °C’de sinterlenmiş Ti-6Al-4V’den kalıplanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	78
Resim 7.9. 1300 °C’de sinterlenmiş Ti-6Al-7Nb’den kalıplanmış numunenin SEM görüntüsü	79
Resim 7.10. %65 (H)Ti-6Al-4V + %35 Bag besleme stokundan üretilen numune	79
Resim 7.11. 1250 °C’de 2 saat, 5 °C/min artış hızında sinterlenmiş Ti-6Al-4V numune (a: Üst Görünüş, b: Yan Görünüş)	80
Resim 7.12. Hacimce % 65 Ti-6Al-4V toz yüklemeli besleme stokundan kalıplanan numunelerin deney girdilerinin çekme dayanımına etkileri	85

Resim	Sayfa
Resim 7.13. Hacimce % 69 Ti-6Al-7Nb toz yüklemeli besleme stokundan kalıplanan numunelerin deney girdilerinin çekme dayanımına etkileri	89
Resim 7.14. Ti-6Al-4V numunelerin SEM görüntüleri, a) Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş numune (711,79 MPa), b) En düşük çekme dayanımın elde edildiği numune (134 MPa).....	107
Resim 7.15. Optimum parametrelerde Ti-6Al-4V besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (711,79 MPa) kırık yüzey görüntüsü.....	108
Resim 7.16. Ti-6Al-7Nb numunelerin optik mikroskop görüntüleri, a) Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş numune (631,12 MPa), b) En düşük çekme dayanımının elde edildiği numune (210 MPa).....	108
Resim 7.17. Optimum parametrelerde Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (631,12 MPa) SEM görüntüsü	109
Resim 7.18. Optimum parametrelerde Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (631,12 MPa) kırık yüzey görüntüsü.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

n	Akış Davranış İndeksi
η	Viskozite
τ	Kayma Gerilmesi
$\dot{\gamma}$	Kayma Hızı

Kısaltmalar

Açıklamalar

EVA	Etilen Vinil Asetat
GA	Gaz Atomize
MPIF	Metal Powder Industries Federation
PEG	Polietilen Glikol
ppm	Milyonda Bir Birim
PW	Parafin Mum
SA	Stearik Asit
SIP	Sıcak İzostatik Presleme
TEK	Toz Enjeksiyon Kalıplama
TGA	Termogravimetrik Analiz
TiH ₂	Titanyum Hidrür
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

1. GİRİŞ

Enjeksiyon kalıplama teknolojisi önemi gittikçe artan üretim tekniklerinden biridir. Geçmişte enjeksiyon kalıplama teknolojisi sadece ısıtıldığında kolayca eriyebilen polimerler ile sınırlıydı. Son zamanlarda enjeksiyon tekniği ile üretilen malzemelerin mekanik, manyetik ve termal kapasite gibi mühendislik özelliklerinde müşteri talepleri doğrultusunda iyileştirme yapılmaya başlanmıştır. Bu talepler doğrultusunda daha yüksek basınca sahip, yüksek sıcaklıklarda çalışabilen ve hassas kontrol ünitesi olan enjeksiyon kalıplama tezgahları geliştirilmiştir. Tüm bu gelişmeler daha önce polimerler ile sınırlı olan enjeksiyon teknolojisinin yerine metal ve seramik tozlara da uygulanabilen Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) olarak isimlendirilen yeni bir teknolojinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. TEK yöntemi, plastik enjeksiyon kalıplamadaki karmaşık şekilli parçaları yapabilme yeteneği ile hassas döküm ve toz metalürjisinin malzeme seçimi esnekliğini birleştiren kombine bir üretim tekniğidir.

Günümüzde, medikal implantlar, otomobil parçaları ve uçak parçalarını içeren uygulamaların üretiminde, kendine özgü yüksek dayanım, yüksek korozyon direnci ve çok iyi biyouyumluluk gibi mükemmel özellikleri olan titanyum alaşımının kullanımı gittikçe artmaktadır (Froes ve diğerleri 2002). Ancak hassas döküm ve toz metalürjisi gibi yöntemlerdeki geometrik tasarımla ilgili kısıtlamalar, çok adımlı üretim süreçleri ve hammadde ile ilgili yüksek maliyetten dolayı bu alaşımın kullanımı sınırlıdır. TEK, bahsedilen bu engelleri aşmak için (geometrik tasarım, çok adımlı üretim süreci vb.) kullanılabilecek bir üretim yöntemidir (Obasi ve diğerleri 2010).

TEK’de doldurma aşamasında besleme stokunun akabilmesi için enjeksiyon basıncı itici güçtür. TEK’in besleme stokunun viskozitesi akış davranışı için çok önemli bir özelliktir. Buna ilaveten TEK’de kullanılan besleme stokunun ısı iletkenlik ve ısı kapasitesi özellikleri, kalıplama esnasında hızlı ısı transferi olmasından dolayı çok önemlidir (Ahn ve diğerleri 2008). TEK’in besleme stokunun ısı kararlılık ve reolojik davranışını anlamak başarılı TEK üretimi için önemli bir parametredir (Ahn ve diğerleri 2009). TEK’in besleme stokunun ısı ve reolojik

özellikleri hakkında birçok deneysel veri (Karataş ve Sarıtaş 2001, Karataş ve Türker 2004, Liu ve diğerleri 2003, Huang ve diğerleri 2003, Huang 1999, Reddy ve diğerleri 2000) ve ayrıca titanyum alaşımlarından farklı kalıplama teknikleri ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine birçok çalışma teknik literatürde bulunmaktadır (Obasi ve diğerleri 2010, Yalçın ve Varol 2009). Ancak enjeksiyon parametrelerinin nihai ürüne etkisine yönelik çalışmalara literatürde çok fazla rastlanmamaktadır. Ayrıca TEK’de çelik malzemelerin üretimi başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Günümüzde, MIM 2700 düşük alaşımlı çelik, MIM-316L östenitik paslanmaz çelik ve MIM 17-4PH sertleşebilen paslanmaz çelik gibi çok yaygın demir alaşımları için maksimum mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyon seviyeleri (ASTM B883-05) ASTM standartlarında bulunmaktadır (Ferri 2010). Ancak TEK yöntemi ile üretilen titanyum alaşımları için yeterli miktarda standart henüz bulunmamaktadır. Bu çalışmadaki bilgiler TEK’de kullanılan titanyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve/veya mekanik özellikleri hakkındaki ihtiyaç olan eksik bilgilere katkıda bulunacaktır.

Çalışma kapsamında, implant malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilen, Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşımları kullanılacaktır. Bu malzemelerden Ti-6Al-4V alaşımı ortopedik implant üretiminde kullanılmaktadır. Ti-6Al-7Nb alaşımı ise, vanadyumun vücut içindeki olumsuz etkisini elemine etmek amacıyla Ti-6Al-4V alaşımı yerine geliştirilmiş yeni bir alaşımdır.

Bu çalışmanın amacı, dental ya da ortopedik amaçlı implant malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan titanyum alaşımlarından TEK ile parça üretimi sırasında kalıplama parametrelerinin kalıplanan parçadaki etkilerinin tespit edilmesi ve bu bulgular ışığında endüstriyel üretim için ekonomik üretim (enjeksiyon ve sinterleme gibi) parametrelerinin belirlenmesidir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Titanyum ve alaşımları aşağıdaki özelliklerinden dolayı implantlar ve tıbbi teknoloji için ideal bir malzemedir. Bunlardan bazıları:

- Toksik etkisi yoktur
- Vücut tarafından ret edilmez
- Alerjik reaksiyonlara neden olmaz
- Kemik dokusu titanyum üzerinde direkt gelişir
- Titanyum malzemelerin elastikiyeti özel çeliklerin elastikiyetinden daha çok kemiklerinkine benzer
- Titanyum özel çeliklerin sadece yarısı kadar ağırlığa sahiptir
- Titanyumun korozyona karşı direnci yüksektir
- Titanyum malzemeler mıknatıslanmaz ve bu nedenden dolayı MRI (magnetic resonance imaging) görüntülemeye sorunsuzdurlar.

Ayrıca titanyum ve alaşımlarının düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı özelliklerinden dolayı uçakların ve otomobillerin iskelet ve motor parçalarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımları için özel bir uzmanlık bilgisi ve yaygın bir ekipman gerektirmesinden dolayı teknik literatürde yapılan çalışmalar artan bir ivme ile devam etmektedir.

Aggarwal, Park ve Smid (2006) saf niyobyum (Nb7) tozunun ($D_{50} \approx 7\mu\text{m}$) toz enjeksiyon yöntemi ile kalıplanması için gerekli reolojik özellikleri araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma ile saf niyobyum (Nb7) tozunun reolojik özelliklerine bağlı olarak kritik ve optimum toz yükleme değerlerini belirlemişlerdir. Reoloji deneylerini 140,150 ve 160 °C sıcaklıklarda ve hacimce %53, 55, 57 ve 59 toz yüklemelerinde yapmışlardır. Aggarwal ve diğerleri yaptıkları reolojik çalışmalar sonucunda besleme stokunda toz yükleme yüzdesi arttıkça toz-bağlayıcı ayrışmasının fazlaştığını ve homojen olmayan bir karışım meydana geldiğini belirlemişlerdir. Bunun sonucu olarak, toz yüklemesi yüksek olan besleme stoklarından üretilen ham parçalarda tozlar arasında boşluklar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda hacimsel olarak %57 toz yüklenmiş besleme stokunun en

iyi reolojik özellikleri gösterdiği ve enjeksiyon kalıplama için en uygun yükleme olduğu sonucuna varmışlardır.

Loh, Tor, Tay, Murakoshi ve Maeda (2007), mikro TEK yöntemi ile mikro dişli imalatını incelemişlerdir. Çalışmalarında karmaşık şekilli 316L paslanmaz çelik tozu kullanmışlardır. Bağlayıcı sistemi, ağırlıkça %50 polietilen ve %50 PAN250S'den hazırlamışlardır. Çalışmada sadece hacimce %60 toz yüklemeli besleme stoku kullanmışlardır. Hazırlanan besleme stokunun termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarına göre bozulma 178 °C'de başlamış ve 527 °C'de sonlanmıştır. Bozulma sıcaklıklarının başlangıçları 390 °C, 425 °C ve 475 °C'dir. Kullanılan bağlayıcı sistem, birçok bileşenden meydana geldiği için farklı bozulma sıcaklıkları elde etmişlerdir. Bu sonuçlara göre tüm bağlayıcı bileşenlerini ayrıştırmak için gerekli olan son sıcaklığın 527 °C'den yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Bağlayıcı sistemin en yüksek erime sıcaklığı 126 °C ve bozulmaya başladığı sıcaklık 178 °C olduğu için reoloji deneylerinin sıcaklıkları 126 °C ile 178 °C arasından seçilmiştir. Reoloji deneyleri belirtilen aralıkta olan 140-150-160 °C lerde yapılmıştır. Reoloji deneyleri sonuçlarına göre kayma hızı arttıkça viskozite azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda dilatant akış görülmemiştir. Deneyler sonucunda besleme stokunun 10^3 Pa.s'dan daha az viskoziteye sahip olduğu ve en ideal kalıplama sıcaklığının 160 °C olduğunun sonucuna varılmıştır.

Shibo, Xuanhui, Xinbo, Ting ve Bohua (2006) Ti-6Al-4V alaşımın Toz Enjeksiyonla Kalıplanması isimli çalışmalarında ön alaşımlanmış toz karışımı kullanılmıştır. Çalışmada kullandıkları besleme stoku içinde %90 ön alaşımlı gaz atomize (GA Ti-6Al-4V) (Shanxi Bangzhen Co. Ltd.) tozu ile %10 ön alaşımlı hydride-dehydride (HDH Ti-6Al-4V) (HebeiWuyi Co. Ltd.) tozu bulunmaktadır. Besleme stokunda kullandıkları bağlayıcı sistem ise parafin mum, PEG 20,000, düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen ve stearik asit kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda hazırlanan mum bazlı çoklu bileşene sahip bir bağlayıcının %90 GA Ti-6Al-4V + %10 HDH Ti-6Al-4V tozu ile iyi uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir. Reoloji çalışmaları sonucunda da hacimsel olarak %70 toz yüklemeli besleme stokunun psedo-plastik akış davranışı gösterdiği ve akış davranış indeksinin (n) 0,528 ve aktivasyon enerjisinin (E) 27,15 kJ mol⁻¹ olduğu tespit

edilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlendiği deneyler sonucunda 835 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir.

Supati, Loh, Khor ve Tor (2000), TEK'de kullanılan besleme stoklarının karıştırma karakterizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında ortalama boyutu 11 μm olan 316L paslanmaz çelik tozu ile boyutu 2 μm olan titanyum karbür (TiC) tozunu kullanmışlardır. Çalışmada ADEKA Fine Chemical firmasının patentli bağlayıcısı kullanılmıştır. Bağlayıcının erime noktası yaklaşık 90 °C'dir. Karıştırmadan önce 316L paslanmaz çelik tozu ile titanyum karbür (TiC) tozu 80 °C'de 12 saat vakumlu fırında kurutularak nemleri alınmıştır. Daha sonra ağırlıkça %97 316L paslanmaz çelik tozu, ağırlıkça %3 titanyum karbür tozu 15 dakika turbulo mikserde karıştırılmıştır. Hazırlanan bu ön karışıma ağırlıkça %9-10-11 bağlayıcı ilave edilerek besleme stokları hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada kayma hızının 10^4 s^{-1} den yüksek olması ve toz yüklemenin artması ile viskozitenin artması besleme stokunun psedo-plastik davranış içinde olduğunu göstermiştir. Toz yükleme oranı ağırlıkça % 91 olan için, tüm karıştırma şartlarında 1000 Pa.s'nin üzerinde viskozite tespit edilmiştir. Böylece ağırlıkça % 91 toz yüklenerek hazırlanan besleme stoklarının enjeksiyon kalıplama için uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Thian, Loh, Khor ve Tor (2002) enjeksiyon kalıplama için Ti-6Al-4V/HA kompozit besleme stoku isimli çalışmalarında hacimsel olarak % 55 – 60 - 65 toz yüklemesine sahip besleme stoklarının reoloji verilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Titanyum alaşım – hidroxyapatite (Ti-6Al-4V/HA) tozu ile çoklu elemandan oluşan PAN-250S isimli bağlayıcıyı kullanmışlardır. PAN-250S isimli bağlayıcı natural wax, fatty acid wax, stearik asit, poly-oxi-alkylen ve olefin-hydrocarbons gibi bileşenlerden meydana getirilmiştir. Bağlayıcının yoğunluğu $1,03 \text{ g/cm}^3$ dür. Bağlayıcının termogravimetrik (TGA) analizi sonucunda 150 °C'nin üzerinde bozulmaya başladığı ve 500 °C civarında tamamen bozulduğu tespit edilmiştir. Reoloji testleri 90 – 100 - 110 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Hacimce %55 ve 60 toz yüklemesi yapılmış besleme stoklarının viskoziteleri 1000 Pa.s den az olmasından dolayı kalıplama için uygun olduğu belirlenmiştir.

Thavanayagam, Pickering, Swan ve Cao (2015) suda çözünebilir bağlayıcı sistem ile hazırladıkları titanyum besleme stokunun reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında hydride-dehydride Ti-6Al-4V alaşım tozunu PEG 8000, PVB (polyvinyl butyryl) ve stearik asitten (SA) meydana gelen bağlayıcı sistem ile karıştırarak besleme stoklarını hazırlamışlardır. Deneylerde hacimce % 75 PEG 8000- %20 PVB- %5 SA ve hacimce % 80 PEG 8000- %15 PVB- %5 SA olmak üzere iki farklı bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Kullandıkları besleme stokları hacimce % 55 ve % 60 toz oranlarına sahiptir. Reoloji deneylerini 125 °C - 140 °C - 165 °C'ler de ve 20 N - 40 N - 60 N - 100 N - 160 N yükleme değerlerinde yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda hacimce % 80 PEG 8000- %15 PVB- %5 SA içeren bağlayıcı sistem kullanılarak hazırlanmış hacimce %60 toz yüklemesini TEK için optimum değer olarak tespit etmişlerdir.

Wei, Xinbo, Ruijie, Shidi ve Xuanhui (2014) TEK sırasında toz ve bağlayıcı ayrışmasını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kalıp sıcaklığının artması ile besleme stoku için sıcaklık değerindeki değişimin azaldığını tespit etmişlerdir. Sıcaklık değerindeki azalma besleme stokunun reolojik özellikleri açısından olumlu etki yaptığını fakat kalıp soğuma süresinin artmasına sebep olduğunu belirlemişlerdir. Kalıp dolumunun ilk aşamasında, besleme stokunun viskozitesinin çok düşmesi sonucu girişin etrafındaki bölgede kayma gerilmesi hızının yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bu da toz ve bağlayıcı arasındaki sürtünme kuvveti azaldıkça besleme stoku içerisindeki tozun bağlayıcıdan daha hızlı hareket etmesinden kaynaklandığını belirlemişlerdir.

Wang, Shi, WU ve Xi (2013) Ti-6Al-4V alaşım tozu ile hazırladıkları besleme stoklarının reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında ağırlıkça % 60 parafin, % 35 düşük yoğunluklu polietilen ve %5 stearik asitten oluşan bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Wang ve diğerleri hazırladıkları besleme stoklarının içerisindeki Ti-6Al-4V alaşım tozunun öğütme süresinin, toz miktarının ve deney sıcaklığının reolojik etkilerini incelemişlerdir. Reoloji deneylerini 140-150-160 °C sıcaklıklarda yapmışlardır. Deneyler sonucunda hazırlanan besleme stoklarında pseudo-plastik akış davranışı görülmüştür. Sıcaklık ve kayma hızının artması ile viskozitenin düştüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca kayma hızının artması ile kayma gerilmesinin üstel olarak büyüdüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda

öğütme süresinin artması ile akış davranış indeksi (n) değerinin azaldığını viskozitenin ise arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca besleme stokundaki toz yüklemesinin artması ile viskozite değerinin de arttığını ve besleme stoklarının kayma hızının artması ile akış aktivasyon enerjisinin azaldığını belirlemişlerdir.

Thian, Loh, Khor ve Tor (2001) TEK ile üretilmiş Ti-6Al-4V/HA kompozit parçaların bağlayıcı giderme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında PAN-250S isimli bağlayıcı sistem ile hazırlanmış hacimce %60 toz yüklemesine sahip besleme stokları kullanmışlardır. Thian ve diğerleri hatasız parça üretimi için ısıl bağlayıcı giderme aşamasındaki gaz akış hızı ve sıcaklık hızının etkileri ile birlikte kaldırılan bağlayıcı miktarı ve artık karbon seviyesini incelemişlerdir. Isıl bağlayıcı giderme aşamasının başında düşük molekül ağırlığına sahip kimyasallar uzaklaşmaya çalışırlar. Fakat bu aşamada parçada az sayıda boşluk bulunur ve yanan kimyasallar bu boşluklardan çıkmaya çalışır. Bu yüzden bu aşamaya dikkat edilmez ise parçada şişmeler ve çatlaklar oluşabilir. Çalışmaları sonucunda minimum karbon seviyesi ile hatasız parça üretmek için bağlayıcı giderme işleminin başlangıç aşamasında yavaş sıcaklık hızı (20 °C/h) ve hızlı gaz akış hızı (250 cm³/min) kullanılması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Chen, Cao, Wen ve Edmonds (2013) Ti-6Al-4V (HDH) alaşım tozu ve PEG esaslı bağlayıcı sistem kullanarak hazırladıkları besleme stoklarından ürettikleri numunelere farklı şartlarda bağlayıcı giderme işlemi uygulayarak parça yapısını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada 6 mm kalınlığındaki numuneleri 20 dakika, 2 saat ve 30 saat saf suda 60 °C sıcaklıkta bağlayıcı giderme işlemine tabi tutmuşlardır. 20 dakika yapılan deneyler sonucunda numuneden %28 bağlayıcı uzaklaştığını fakat uzaklaşan bağlayıcının sadece numunenin yüzeyinden olduğunu belirlemişlerdir. 20 dakika yapılan deney sonucunda PEG molekülleri ile suyun etkileşime geçmediğini görmüşlerdir. Bağlayıcı giderme süresinin artması ile parça yüzeyinde farklı boyutlarda boşluklar oluşmaya başladığını tespit etmişlerdir. 2 saat bağlayıcı giderme işleminden sonra parçanın merkezinde de boşluklar oluştuğunu belirlemişlerdir. 30 saat bağlayıcı giderme işleminden sonra ise %98,4 bağlayıcının parçadan uzaklaştığını bununda büyük bir kısmının PEG olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca parçadaki boşlukların artık birbirleri ile birleşmeye başladığını görmüşlerdir.

Li, Chou ve Yu (2006) TiH_2 tozu ile 6Al–4V tozunu karıştırarak hazırladıkları Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK yöntemi ile parça üretmişlerdir. Çalışmalarında toz enjeksiyon yöntemi ile ürettikleri numunelerin bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri sonucunda parçanın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre 300 °C de hidrojenin çözündüğünü belirlemişlerdir. Bağlayıcı gidermenin düşük sıcaklık aşamasında parçalarda boşluklar oluştuğunu bununda hidrojenin parçadan uzaklaşması için yararlı olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmalarında vakumla yapılan bağlayıcı giderme sonucunda hidrojenin parçadan tamamen uzaklaştırılabildiğini görmüşlerdir. Li ve diğerleri TEK ile ürettikleri parçaları 1250 °C 3 saat 10^{-3} Pa vakum altında sinterlemişlerdir. Sinterleme işlemi sonucu parçalarda yapraksı mikroyapı elde etmişlerdir. Numuneleri vakum altında bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemine tabi tutmaları sonucunda kalıntı hidrojen ve karbon miktarları istenilen seviyede olduğunu görmüşlerdir. Fakat oksijen seviyesinde artış olduğunu belirlemişlerdir. Bunun sebebi olarak da titanyumun yüksek sıcaklıklarda oksijeni ile daha çok birleşme eğiliminde olmasını göstermişlerdir. Sinterlenmiş numunelerde 701-753-854 MPa olmak üzere farklı çekme dayanımı değerleri elde etmişlerdir.

Fu, Loh, Tor, Murakoshi ve Maeda (2005) mikro boyuttaki parçaların üretiminde TEK parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda geleneksel TEK parametrelerinden daha fazla enjeksiyon ve ütüleme basınçlarına gereksinim olduğunu ayrıca kalıp sıcaklığının da yüksek olması gerektiğini belirlemişlerdir. Çalışmalarında kalıp sıcaklığı arttıkça parça ağırlığının da fazlaştığını tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak besleme stokunun erken donmasının engellenmesinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca düşük kalıp sıcaklıklarında ergimiş besleme stokunun soğuk kalıp duvarları ile teması sonucu çok çabuk donduğu ve bunun sonucunda kalıp boşluklarının tam olarak dolmadığını belirlemişlerdir.

Ahn, Park, Lee, Atre ve German (2009) TEK yöntemiyle paslanmaz çelik ve demir tozlarından üretilen parçaların özellikleri ve kalıplama parametrelerine, toz ile bağlayıcıların etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında bir toz cinsi ile farklı bağlayıcı kombinasyonlarından ve bir bağlayıcı sistem ile farklı tozlardan elde edilen besleme stoklarının üzerine simülasyon çalışmaları yapmışlardır.

Çalışmalarında beş farklı toz (Iron, Carbonyl Iron, 316 L SS (PF-15), 430 L SS, 17-4 PH SS) ve beş farklı bağlayıcı sistem (dört tane mum bazlı bir tane su bazlı) kullanmışlardır. Çalışma sonucunda;

- Besleme stokunun ısı kapasitesi ve termal iletkenliğinin belirlenmesinde hem tozun hem de bağlayıcının aynı etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.
- Sıcaklıkla ilgili çıktı sonuçlarına göre; seçilen bağlayıcı sistemlerin hem ergime sıcaklıklarının kontrolünde hem de soğuma süresinde çok önemli olduğunu tespit etmişlerdir.

Lee, Ahn, Whang, Park, Atre, Kim ve German (2011) plastik, metal ve seramik enjeksiyon işleminde kalıplama parametrelerinin etkilerini belirlemişlerdir. Çalışmalarında enjeksiyon kalıplama çevriminde kalıbın dolumu esnasında ki basınç-sıcaklık-hız ile ilgili parametrelerin doldurma süresi, besleme stokunun ergime sıcaklığı ve kalıp sıcaklığından oluşan parametrelere etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda; enjeksiyon sıcaklığının plastik enjeksiyon kalıplamada çok önemli olduğunu, başarılı bir TEK için ise kritik olan değerlerin dolum süresi olduğunu tespit etmişlerdir. Kalıp sıcaklığının üç enjeksiyon kalıplama yönteminde de çok önemli olduğunu tespit etmişlerdir. Isıl yayılımın, üç kalıplama yöntemindeki soğutma süresi, paketleme süresi ve ergime sıcaklığı parametrelerini farklı oranda etkilediğini tespit etmişlerdir. TEK’de doldurma zamanının, kayma hızının, sıcaklık kontrolünün ve ısı yayılımının plastik enjeksiyondan daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca Lee ve arkadaşları başarılı bir TEK için doldurma süresinin iyi optimize edilmesi gerektiği ve kalıp sıcaklığının hassas bir şekilde kontrol altında tutulması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Chen, Ho ve Fan (2004) seramik enjeksiyon kalıplamada parçanın dolum yönündeki kademeli kesitinde oluşan çekmeyi belirlemeye çalıştıkları çalışmalarında kalıp boşluğunun kademe oranına, kalıplama şartlarına ve toz yükleme değerlerine bağlı olarak parçanın sırası ile kalıplandıktan, bağlayıcısı alındıktan ve sinterleme işlemi yapıldıktan sonra parçada oluşan enine çekmeleri tespit etmişlerdir. Her üç aşamada da akış yönünde enine çekmenin yüksek

olduğunu net bir şekilde tespit etmişlerdir. Ayrıca ütüleme basıncının artması ile enine çekme değerlerindeki farkın azaldığını belirlemişlerdir.

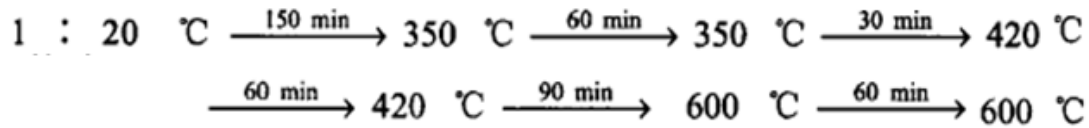
Qian (2010) yaptığı çalışmada titanyum ve alaşımlarının sinterlenme işlemi için çok uygun olduğunu belirtmiştir. Bunun sebebi olarak da 500-550 °C üzerinde ya da 700 °C'de tozun yüzeyindeki ince oksit ve/veya azot katmanlarının kolayca çözülmesini göstermiştir. Çalışma da α – titanyumu ile β – titanyumundaki oksijen ve azotun çözülme limitlerinin farklı olduğunu belirtmiştir. Qian, titanyum tozlarının ısıtma esnasında yüzeylerini temizlemesinden dolayı titanyumun sinterleme sürecinin basit olduğunu ifade etmiştir. Ancak oksijen ve azotun titanyum ile reaksiyonu 500 °C'nin altında yavaş, 500 °C'nin üzerinde önemli ölçüde hızlandığını da açıklamıştır. Pratikte de titanyumun sinterlenmesi esnasında karşılaşılan zorluklar ya tozun kirliliğinden ya da yüksek sıcaklıklarda titanyumun reaktifliğinden kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Qian'na göre titanyum parçaların sinterleme işlemlerinde vakum sinterleme tercih edilir. Ancak yüksek sıcaklıkta (~1300 °C) yapılan sinterleme esnasında fırında meydana gelecek bir kaçığın bütün parçaların bozulmasına sebep olacağını belirtmiştir. Bu nedenle titanyum ve alaşımlarının sinterlenmesi sürecinde sürekli olarak fırın ortamına argon gazı verilerek sinterlemenin yapılması gerektiğini açıklamıştır. Qian yaptığı çalışma da üç farklı ticari titanyum tozundan üretilen parçaların vakum altında ve sadece argon gazı ortamında sinterleme sonuçlarını karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda sadece argon atmosferinde sinterlenen parçalarda vakumla sinterlenenden daha düşük çekme dayanımı görülmüştür. Ancak her iki yöntemle sinterlenen parçalarda aynı yoğunluk ve aynı miktarda oksijen-azot tespit edilmiştir.

Razaa, Ahmad, Omar ve German (2012) 316 L paslanmaz çelik tozlarından TEK ile üretilmiş vakum atmosferinde sinterlenmiş parçaların korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Bağlayıcı giderme işlemine tabi tutulan parçaları 1325 °C de ısıtma hızı ve soğutma hızı aynı olacak şekilde 5 ve 10 °C/min da sinterlemişlerdir. Üretilen parçalardan soğutma hızı 10 °C/min olanda diğer parçalara göre yüksek mekanik özellikler ve korozyon dayanımında iyileşme tespit etmişlerdir. Yüksek soğutma hızının Cr buharlaşmasını azaltarak ve pasif Cr oksit tabakası

oluşmasına sebep olarak parçalarda korozyon dayanımının iyileşmesine sebep olduğunu belirlemişlerdir.

Ibrahim, Azmirruddin, Jabir, Ismail, Muhamad, Awang ve Muhamad (2010) Ti-6Al-4V tozu ile hazırladıkları besleme stoklarından ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırladıkları besleme stoklarında bağlayıcı olarak ağırlıkça %40 poietilen ve %60 palm stearin kullanmışlardır. Çalışmalarında sinterlenmiş Ti-6Al-4V numunelerde 541,53 MPa çekme dayanımı elde etmelerine rağmen MPIF 35 standardında 700 MPa çekme dayanımı istenmektedir. Aradaki farkın numunelerde TiC (Titanyum karbür) oluşmasından dolayı ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca sinterlenen numunelerin zehirleyici bir özelliği olmadığını belirlemişlerdir.

Guo, Qu, Xiang, Zhang, He, Li, Duo ve Li (2006) Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK yöntemi ile parça üretmişlerdir. Çalışmalarında mum bazlı GSB isimli bağlayıcı kullanmışlardır. Parçaların TEK ile üretimi esnasında enjeksiyon sıcaklığı 165 °C, enjeksiyon basıncı 80 MPa ve kalıp sıcaklığı 30 °C'dir. Ürettikleri numunelere kimyasal ve ısıl bağlayıcı giderme proseslerini uygulamışlardır. Kimyasal bağlayıcı giderme esnasında numuneleri heptan ve etanol'den meydana gelen (hacimsel olarak 8:2) bir karışımda 6 saat tutmuşlardır. Daha sonra numuneleri 1 saat kurumaya bırakmışlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemini vakum atmosferinde Şekil 1 deki şemaya göre yapmışlardır.



Şekil 2.1. Isıl bağlayıcı giderme aşamaları

Bağlayıcısı giderilmiş parçalara 1200 ile 1260 °C'de 2-4 saat vakum atmosferinde sinterleme işlemi uygulamışlardır. Daha sonra parçalara 960 °C'de 140 MPa basınç altında sıcak izostatik presleme (SIP) yapmışlardır. Bu işlemten sonra parçaları 720-760 °C'de 1 saat tutarak sertleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda parçaların mikroyapılarında birçok eş eksenli α yapıları ve az bir miktar β yapısı

olduğunu tespit etmişlerdir. 720-760 °C'de sertleştirilmiş numunelerde ortalama 1020-1060 MPa çekme dayanımı, 880-960 MPa akma dayanımı, %8-%9,5 uzama oranı elde etmişlerdir. 800 °C'den daha yüksek sertleştirme sıcaklığında numunelerde düşük mekanik özellikler elde etmişlerdir.

Chen, Li, Li, He ve Hu (2009) TEK yöntemi ile karmaşık şekilli (HDH Ti) titanyum tozu ve sodyum klorür (NaCl) tozlarından hazırladıkları besleme stoklarından numune üretmişlerdir. Sodyum klorür (NaCl) tozunun gözenekliliğe ve gözenek boyutuna etkisini tespit edebilmek için beş farklı besleme stoku (hacimsel olarak %30-40-50-60-70 NaCl içeren) hazırlamışlardır. Besleme stoklarında yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), parafin mum (PW), polietilen glikol (PEG) ve stearik asit (SA) den meydana gelen bağlayıcı kullanmışlardır. Besleme stoklarını 100 MPa enjeksiyon basıncı, 155 °C enjeksiyon sıcaklığı ve 30 °C kalıp sıcaklığında kalıplamışlardır. Enjeksiyon işleminden sonra numunelere kimyasal ve ısıl olmak üzere iki tür bağlayıcı giderme işlemi uygulamışlardır. Numuneleri ilk olarak 37 °C'de metilendiklorür'de (methylenedichloride) 2,5 saat bekletmişlerdir. Daha sonra termal bağlayıcı giderme aşamasında da argon atmosferinde 720 °C'de tüp fırında numuneleri tutarak tüm bağlayıcıların uzaklaşmasını sağlamışlardır. Bağlayıcı giderme aşamasından sonra numunelere $1,33 \times 10^{-3}$ Pa vakum altında 1150 °C sıcaklıkta 2 saat bekleterek sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Sinterleme işlemi sırasında iki ısıtma hızı kullanmışlardır. Sinterlemenin ilk aşamasında 525 °C'ye kadar numuneleri 4 K/min hız da, daha sonra ise 10 K/min hız da sinterlemişlerdir. Çalışma sonucunda besleme stokundaki NaCl miktarının gözenekliliği ve gözenek yapısını etkilediğini tespit etmişlerdir. Numunelerde %42,4 ila % 71,6 arasında gözeneklilik ve 300 µm boyutunda gözenekler elde etmeyi başarmışlardır. Mekanik testler sonucunda da besleme stokundaki NaCl miktarı arttıkça numunelerin basma dayanımlarının 316,6 MPa dan 17,5 MPa'la, elastikiyet modülünün de 3,03 GPa dan 0,28 GPa'la gerilediğini tespit etmişlerdir.

Galio ve Schaeffer (2006) TEK yöntemi ile titanyum hidrid (TiH₂) tozu ve polimerik bağlayıcıyı karıştırarak hazırladıkları besleme stoklarından parça üretmişler ve ürettikleri parçaların mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir. Besleme stoklarını ağırlıkça % 20,9 bağlayıcı (ağırlıkça %11,27 polimerik malzeme ve ağırlıkça %9,61 mum) ve %79,1 titanyum hidrid (TiH₂) tozundan hazırlamışlardır. 4 mm çapındaki

parçaları 180 °C sıcaklıkta 1600 bar enjeksiyon basıncında ve 2000 bar ütüleme basınç ile kalıplanmışlardır. Kalıplama esnasında kalıp sıcaklığı 70 °C'dir. Kalıptan çıkmış parçalara farklı çözücülerde ve farklı sıcaklıklarda kimyasal bağlayıcı giderme işlemi uygulamışlardır. Kalıptan çıkan numuneleri heptan ve karbon tetraklorür çözücülerinde 50 ve 60 °C'lerde, hekzan'da ise sadece 60 °C'de bekletmişlerdir. Çalışmaları sonucunda bağlayıcı sistemdeki mum bileşenlerinin 4 saatten sonra tüm çözücü ve sıcaklıklarda uzaklaştığını tespit etmişlerdir.

Kobayashi ve diğerleri (1998) diş imalatında kullanılan döküm tekniği ile Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşım tozlarından ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında magnezyum oksit esaslı santrifüj döküm tekniği ile numuneleri elde etmişlerdir. Döküm tekniği ile elde ettikleri Ti-6Al-7Nb numunelerde 933,2 MPa, Ti-6Al-4V numunelerde ise 975,5 MPa çekme gerilmesi elde etmişlerdir.

Niinomi (2003) düşük katılığa sahip titanyum alaşımının yorulma ve sitotoksiste özelliklerini araştırdığı çalışmasında Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alaşımını kullanmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler dövülerek elde edilmiş çubuklardan hazırlanmıştır. Numuneler suda sertleştirildikten sonra argon atmosferinde çözücü içerisinde bekletilmiştir. Numunelerin çekme testleri sonucunda 600 MPa civarında çekme dayanımı elde edilmiştir.

Henriquesa, Camposa, Cairoa ve Bressiani (2005) Ti-6Al-4V and Ti-13Nb-13Zr alaşım tozları kullanarak ürettikleri parçaların mikroyapılarını incelemişleridir. Çalışmalarında tek etkili pres ile 80 MPa basınç altında 20 mm çapında numuneler hazırlamışlardır. Daha sonra hazırladıkları numuneleri 300 MPa basınç altında soğuk izostatik presleme işlemine tabi tutmuşlardır. Soğuk izostatik presleme sonrasında numuneleri 900 ila 1500 °C aralığında, 20 °C/min ısıtma hızında, 10^{-6} Torr vakum altında sinterlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda ısıtma hızının azalması ve sinterleme sıcaklığının artması sonucunda Ti-6Al-4V numunelerin mikroyapılarında yapraksı yapının arttığını belirlemişlerdir. 1500 °C'de sinterlenmiş Ti-13Nb-13Zr'den hazırlanan numunelerin homojen bir mikroyapıya sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Yalçın ve Varol (2009) sinterlenmiş titanyum alaşımlarının aşınma performansı ve bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi isimli çalışmalarında Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2,5Fe ve Ti-6Al-7Nb alaşımlarından toz metalürjisi yöntemiyle parça üretmişlerdir. Parçaları tek etkili kalıp ile ortalama 530 MPa basınç da preslendikten sonra, 1250°C sıcaklıkta koruyucu argon gazı atmosferi ve 10^{-4} torr vakum ortamında sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Çalışmaları sonucunda büyük ve karmaşık şekilli gözenekli yapıya sahip Ti-6Al-7Nb alaşımında, sinter mekanizmasının iyi gelişmediğini tespit etmişlerdir.

Nyberg, Miller, Simmons ve Weil (2005) hazırladıkları besleme stoklarında temel bağlayıcı olarak naftalin kullanmışlardır. Çalışmalarında geliştirdikleri bağlayıcı sistem ile hacimsel olarak %50 ila %70 aralığın da olmak üzere değişik oranlara sahip titanyum hidrid (TiH_2) tozu içeren besleme stokları kullanmışlardır. Bağlayıcı sistemlerini hacimsel olarak % 93 naftalin, %6 etilen vinil asetat (EVA) ve %1 stearik asitten hazırlamışlardır. Kalıptan çıkan numunelerdeki naftalini 75 °C sıcaklıkta 48 saat 2×10^{-2} torr vakum altında buharlaştırarak uzaklaştırmışlardır. Numuneleri %2,75 H_2 +Argon gazı karışımında sinterlemişlerdir. Sinterleme esnasında 1 °C/min ısıtma hızında 375 °C çıkmışlar ve bu sıcaklıkta üç saat beklemişler daha sonra 1 °C/min ısıtma hızında 750 °C çıkmışlar ve bu sıcaklıkta fırın ortamına gazı göndermeyi kesmişlerdir. 750 °C'de 10^{-6} torr vakum altında üç saat beklemişlerdir. Bu aşamadan sonra 10^{-6} torr vakum altında 5 °C /min ısıtma hızında 1100 °C sıcaklığa çıkıp dört saat beklemişlerdir. Çalışmaları sonucunda yüksek toz oranına sahip besleme stoklarından üretilen numunelerin ham yoğunluğunun yüksek ve taneler arası temasın daha iyi olduğunu, sinterleme sonrasında ise numunede yüksek yoğunluk ve düşük boşluk yapısı elde edileceğini tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda kalıplama ile elde ettikleri numunelerin çekme dayanımları düşük çıkmıştır. Titanyum kütük malzemeden yapılan numunelerin dayanımlarının yüksek ve düşük gevrek yapıya sahip olmasının nedeni olarak TEK ile ürettikleri numunelerde oksijen seviyesinin yüksek olmasının sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca TEK ile üretilen numunelerin düşük dayanıma sahip olmasında kalıplama parametrelerinin dışında, kullanılan besleme stokunun etkisinin büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak kullanılan tozun saflığı, besleme stokunun hazırlanması ve enjeksiyon

aşamalarının optimizasyonun titanyumdan elde edilen ürünlerin mekanik özelliklerinin artmasında etkili olacağı sonucuna varmışlardır.

Gerling, Aust, Limberg, Pfuff ve Schimansky (2006) Ti 47Al 4(Nb,Mn,Cr,Si,B) alaşım tozunu kullanarak TEK yöntemi ile ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kullandıkları besleme stoklarında, hacimce % 68 toz ve hacimce % 32 polietilen, parafin ve stearik asitten oluşan bağlayıcı sistem bulunmaktadır. Numuneleri 420 bar enjeksiyon basıncı, 90 °C enjeksiyon sıcaklığı ve 45 °C kalıp sıcaklığında üretmişlerdir. Bağlayıcı giderme aşamasında kalıptan çıkan numuneleri ilk olarak 40 °C hegzanda bekleterek parafini uzaklaştırmışlardır. İkinci olarak, ısıl bağlayıcı giderme aşamasını 250 – 400 °C arasında vakum altında gerçekleştirmişlerdir. Numuneleri 1360 °C de 3,5 saat sinterlemişlerdir. Sinterleme işlemini, 10^{-5} mbar vakum, 300 mbar argon ve 900 mbar argon atmosferleri olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sinterleme işleminden sonra bazı numuneleri 1300 °C sıcaklık ve 200 MPa basınç altında 2 saat sıcak izostatik presleme (SİP) işlemine tabi tutmuşlardır. Çalışmaları sonucunda;

- 300 mbar argon gazında sinterlenen numunelerde 347 MPa
- 300 mbar argon gazında sinterlenen ve SİP yapılan numunelerde 359 MPa
- 900 mbar argon gazında sinterlenen numunelerde 351 Mpa
- 900 mbar argon gazında sinterlenen ve SİP yapılan numunelerde 412 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Çalışmaları sonucunda sinterleme ve SIP işlemlerinin birlikte yapılması sonucu numunenin mekanik özelliklerinin arttığını belirtmişlerdir.

German (2013) çalışmasında titanyumun TEK sürecini açıklamıştır. Çalışmasında sinterlenmiş titanyumun mekanik özelliklerine; yoğunluk, dokular arasındaki madde miktarı, alaşım türü ve mikroyapı olmak üzere dört temel unsurun etkilediğini açıklamıştır. German'a göre TEK ile titanyumundan parça üretiminde yoğunluk ilk olarak dikkat edilmesi gereken konudur. Parçanın yapısındaki boşluk miktarı azaltılarak arzu edilen mekanik özelliklere ve tam yoğunluğa ulaşmak istenir. Çalışmalarda kullanılan test numunelerinin geometrileri kırılma hızına karşı

çok hassastırlar ayrıca yuvarlak parçaların kırılabilirliği de yüksektir. Çalışmalarda istenilen yoğunluk ve mekanik özellikleri elde edebilmek için parçalara sıcak izostatik presleme ve/veya bilyeleme işlemleri uygulanmaktadır. German ikinci olarak dikkat edilecek konunun dokular arasındaki madde miktarı olduğunu ifade etmiştir. TEK yöntemi ile elde edilmiş parçaların dokuları arasında bulunan oksijen, karbon, azot yada hidrojen gibi maddeler akma dayanımını, çekme dayanımını ve sertliği artırır fakat esnekliği azaltır. Sinterlenmiş titanyum için oksijenin etkisini değerlendirdiğinde, 1800 ppm den daha az oksijene sahip ticari saflıktaki titanyumun (CpTi Grade 1) çekme dayanımı 240 MPa iken 4000 ppm oksijene sahip Grade 4 titanyumun çekme dayanımı 550 MPa olduğunu belirtmiştir. German sinterlenmiş titanyumda dokular arasındaki maddeleri kontrol etmenin çok zor olduğunu söylemiştir. Bunun nedeni sinterleme sıcaklığında yabancı maddelerin çözünmesi ve ortamda bunu engelleyici unsurların bulunmaması olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sinterleme sıcaklığında ortaya çıkan bu kirlenme durumunun artmasına, fırın ve kullanılan altlık gibi unsurlar da katkı sağlamaktadır. German üçüncü olarak dikkat edilecek konunun titanyumun içerisindeki alaşım türleri olduğunu belirtmiştir. German'a göre titanyum içerisine alaşım elementi katılarak hazırlanan kompozisyonlar döküm titanyumların ki ile aynıdır. Fakat hazırlanan her titanyum kompozisyonun farklı mekanik özellikleri vardır. Örneğin en çok kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı için 2000 ppm den daha az oksijen içerdiğinde ve tam yoğunlukta çekme dayanımı 710 MPa ile 850 MPa arasında değişmekte ve uzaması da %12 olduğunu ifade etmiştir. Son faktörde parçanın mikro yapısıdır. German'a göre sinterlemeden sonra faz dönüşümü ve tanecik boyutu dikkat edilmesi gerekli son konudur. Sinterlemede sıcaklık-zaman kombinasyonu mikro yapıdaki tane büyümelerini etkileyen bir durumdur. German sinterleme sırasında oluşan mikro yapı irileşmesi dökme titanyuma göre akma dayanımının azalmasına sebep olacağını belirtmiştir. Bunun için sinterlenmiş titanyum parçalara sıcak izostatik presleme gibi yoğunluğu artırıcı ilave işlemlerin yapıldığını ve bu yöntemin başarılı olduğunu belirtmiştir.

Limberg, Ebel, Pyczak, Oehring ve Schimansky (2012) TEK yöntemi ile gaz atomizasyon tekniği kullanarak elde edilmiş Ti 45Al 5Nb 0,2B 0,2C alaşım tozundan, ürettikleri numunelerin çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Numuneleri 80 MPa enjeksiyon basıncında, 35 cm³/saniye enjeksiyon hızında, 112 °C

enjeksiyon sıcaklığında ve 43 °C kalıp sıcaklığında kalıplamışlardır. Numunelerin bağlayıcı giderme işlemlerini kimyasal ve ısıl olmak üzere iki aşamada gerçekleştirmişlerdir. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemini numuneleri 40 °C deki heptan da 15 saat tutarak yapmışlardır. Isıl bağlayıcı gidermeyi ise 250 – 400 °C aralığının da 500 Pa da 150 l/h argon akışı ortamında gerçekleştirmişlerdir. Numuneleri, 1500 °C de 1 ve 2 saat 10^{-3} Pa vakum altında ve üç farklı argon gazı akışında (10, 30, 80 kPa) 2 saat süre ile sinterlemişlerdir. Numunelere çekme testi öncesinde zirkonyum (ZrO_2) bilyeler ile 800 kPa basınç altında bilyeleme işlemine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda, 2 saat 80 kPa argon atmosferinde sinterlenen numunelerde 626 MPa çekme dayanımı ve %1,1 gözeneklilik belirlemişlerdir. Ayrıca 2 saat 10 kPa argon atmosferinde sinterlenen numunelerde 630 MPa çekme dayanımı ve %0,3 gözeneklilik olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışma sonucunda sinterleme esnasında ortama gönderilen gaz miktarının artması ile parçanın gözenekliliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Numunedeki oksijen ve azot değerlerinin sinterleme esnasında ortama gönderilen argon gazının basıncına bağlı olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca 1500 °C de vakum altında sinterleme yapıldığı zaman alüminyumun buharlaştığını tespit etmişlerdir.

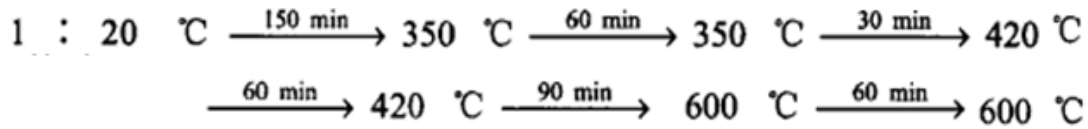
Nora, Muhamad, Ihsan ve Jamaludin (2013) çalışmalarında Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK ile ürettikleri numunelerin sinterleme parametrelerini optimize etmişlerdir. Besleme stoklarında ağırlıkça % 60 palmiye stearini ile % 40 polietilenden oluşan bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Enjeksiyon kalıbından çıkan numunelere kimyasal ve ısıl olmak üzere iki tür bağlayıcı giderme prosedürü uygulamışlardır. Kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında numuneleri 60 °C heptanda 6 saat bekletmişlerdir. Isıl bağlayıcı giderme aşamasını ise numuneleri 550 °C de 4 saat bekleterek gerçekleştirmişlerdir. Numuneleri yüksek vakum altında ($9,5 \times 10^{-6}$ mbar) sinterlemişlerdir. Deneyler ile sinterleme sıcaklığı (1200-1250-1300 °C), sinterleme süresi (60-120-180 dakika), ısıtma hızı (3-4-5 °C/min) ve soğutma zamanı (180-240-300 dakika) olmak üzere dört parametreyi optimize etmeye çalışmışlardır. Deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımını, 1200 °C sinterleme sıcaklığında, 60 dakika sinterleme süresinde, 5 °C/min ısıtma hızında ve 240 dakika soğutma zamanının da elde etmişlerdir. Bu parametreleri kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda 934,33 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Çalışmalarında sinterleme sonrasında numunelerde % 12,3 büzülme değerine ulaşmışlardır. Ayrıca Nora ve diğerleri yaptıkları deney tasarımı sonucunda;

- 1300 °C – 60 dakika – 3 °C/min – 240 dakika = 394,99 MPa
- 1250 °C – 120 dakika – 4 °C/min – 180 dakika = 319,153 MPa çekme dayanımı elde ettiklerini açıklamışlardır.

Gerling ve Schimansky (2002) Ti – 47Al – 4 (Nb, Mn, Cr, Si, B) alaşımından ürettikleri parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kalıptan çıkan parçalara kimyasal bağlayıcı giderme işlemi uyguladıktan sonra 1410 °C de 5×10^{-5} mbar vakum altında sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Sinterleme aşamasında numuneleri 2 ve 4 saat olmak üzere iki farklı sürede sinterlemişlerdir. Sinterlemeden sonrada parçaları 1300 °C de 200 MPa basınç altında 2 saat sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda 2 ve 4 saat sinterlenen parçalarda 190 MPa çekme gerilmesi elde etmişlerdir. 2 saat sinterlenmiş ve sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulmuş parçalarda ise 260 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Gerling ve Schimansky parçaların iç yapısındaki boşluk miktarının yüksek olmasından dolayı bu sonuçların oluştuğunu belirtmişlerdir.

Shibo, Bohua, Xinbo ve Xuanhui (2009) çalışmalarında ağırlıkça %85 gaz atomize (GA Ti) (Shanxi Bangzhen Co. Ltd.) tozu ile ağırlıkça %15 karmaşık şekilli (HDH – Ti) (HebeiWuyi Co. Ltd.) tozların karışımını kullanmışlardır. Besleme stokunda kullandıkları bağlayıcı sistem parafin mum, polietilen glikol (PEG 20,000), alçak yoğunluklu polietilen, polipropilen ve stearik asitten hazırlanmıştır. Deney numunelerini 150 °C enjeksiyon sıcaklığında, 90 MPa enjeksiyon basıncında, 30 °C kalıp sıcaklığında kalıplamışlardır. Numunelere kimyasal ve ısıl olmak üzere iki tür bağlayıcı giderme işlemi uygulamışlardır. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemini hacimsel olarak 8:2 oranında heptan+etanol karışımında 6 saat numuneleri bekleterek gerçekleştirmişlerdir. Bu işlemde sonra numuneleri 1 saat kurutmuşlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemini 10^{-3} Pa vakum altında Şekil 2 deki değerlerde gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 2.2. Isıl bağlayıcı giderme aşamaları

Numunelerin sinterleme işlemlerini 10^{-5} Pa vakum atmosferinde 1150°C de 2-4 saat bekleterek yapmışlardır. Çalışmalarında ilk olarak hazırladıkları besleme stoklarının reolojik özelliklerini araştırmışlar ve optimum toz yükleme değerini hacimsel olarak %67 olarak tespit etmişlerdir. % 67 toz yüklemeli besleme stoklarından ürettikleri numunelerde 389-419 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Haoming, Xinbo, Xuanhui ve Liming (2009) Ti-45Al-8,5Nb-(W, B, Y) alaşım tozundan ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kullandıkları bağlayıcı sistemi ağırlıkça %63 parafin mum, %20 düşük yoğunluklu polietilen, %12 polipropilen ve %5 stearik asitten hazırlamışlardır. Bağlayıcı sistem ve tozun karışımı sonu elde ettikleri besleme stoku için en uygun toz yükleme değerini %65 olarak belirlemişlerdir. Numuneleri 30°C kalıp sıcaklığı, 90 MPa enjeksiyon basıncı ve 150°C enjeksiyon sıcaklığında kalıplamışlardır. Numunelerin kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında 40°C trichloroethylene'de 12 saat bekletmişler ve ardından 6 saat kurutma işlemine tabi tutmuşlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemini $30 - 600^{\circ}\text{C}$ arasında 10^{-3} Pa vakum atmosferinde gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin sinterleme işlemini ise 10^{-3} Pa vakum atmosferinde $1400 - 1500^{\circ}\text{C}$ arasında ve 0,5 ila 3 saat arasında değişen tutma sürelerinde yapmışlardır. Çalışma sonucunda hazırlanan besleme stoku için 1480°C de 2 saat tutma süresinin optimum sinterleme parametresi olduğunu belirlemişlerdir. Bu sinterleme parametrelerindeki numunelerde %96,2 yoğunluk ve 382 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Zhao, Chang, Ebel, Qian, Willumeit, Yan ve Pyczak (2013) farklı oranlarda niyobyum (Nb) içeren titanyum alaşımlarının (ağırlıkça % 10, 16 ve 22 Nb ilaveli) ve ticari saflıktaki titanyumun mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında titanyum içerisindeki niyobyum (Nb) oranının mekanik özelliklere

etkisini belirlemişlerdir. Ticari saflıktaki titanyum, Ti-10Nb, Ti-16 Nb ve Ti-22 Nb kullanarak hazırladıkları besleme stoklarında (ağırlıkça) %5 stearik asit, %35 polietilen vinil asetat ve %60 parafin mum dan meydana gelen bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Tüm besleme stokları hacimsel % 69 toz yüklemesine sahiptir. Kalıplama işleminden sonra numuneler 40 °C de 20 saat hezanda bekletilmiştir. Numunelerin ısıl bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri 10^{-3} Pa vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler 1500 °C de 4 saat bekletilerek sinterlenmiştir. Bu sinterleme sıcaklığı ve bekleme süresinde en düşük boşluklu yapı elde edilmiştir. Sinterleme işleminden sonra bir kısım numuneler 915 °C de 2 saat 100 MPa basınç altında sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, Ti-10Nb numunelerde 638 MPa, Ti-16Nb numunelerde 687 MPa, Ti-22Nb numunelerde 754 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Tüm sinterlenmiş numunelerde % 11,5 doğrusal büzülme elde etmişlerdir. Besleme stokundaki Nb oranının çekme dayanımını arttırdığını fakat uzama ve Young's modülünü azalttığını belirlemişlerdir. Hem sinterlenmiş hem de izostatik presleme işlemi uygulanmış numunelerde Nb oranının artması ile çekme dayanımının yükseldiğini belirlemişlerdir.

Bidaux, Closuit, Rodriguez-Arbaizar ve Carreño-Morelli (2011) ağırlıkça %17 niyobyum (Nb) içeren titanyumdan hazırlanmış besleme stoklarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında d_{50} :21 μ m titanyum tozu ile d_{50} :41 μ m niyobyum boyutlarındaki tozların karışımını kullanmışlardır. Besleme stoklarında ağırlıkça % 55 parafin mum, % 35 düşük yoğunluklu polietilen ve %10 stearik asitten oluşan bağlayıcı sistemi kullanmışlardır. Deneyler için hacimce % 60 toz yüklemesine sahip besleme stokları hazırlamışlardır. Toz enjeksiyon kalıbından çıkmış numuneleri ilk olarak 50 °C de 20 saat heptan da bekletmişler ve daha sonra numuneleri 500 °C de 2 saat argon gazı atmosferinde tutarak ısıl bağlayıcı giderme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin sinterleme işlemini 1300 °C de 4 saat argon gazı atmosferinde yapmışlardır. Çalışma sonucunda numunelerde 749 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Weil, Nyberg ve Simmons (2006) çalışmalarında zirconium, niyobyum, tungsten, molybdenum ve titanium gibi reaktif metallerin toz enjeksiyon kalıplanmasında aromatik bazlı yeni bağlayıcı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında Ti-6Al-4V alaşım

tozu ile naftalin, ethylene vinyl acetate (EVA) ve stearik asitten hazırlanan bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Bu bağlayıcı sistem ile hacimce % 50 – 55 – 60 – 65 ve 70 olmak üzere beş farklı toz oranlarına sahip besleme stoku hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda en iyi kalıp doldurma özelliklerini hacimce % 65 toz yüklemeli besleme stokunda elde etmişlerdir. Ayrıca bağlayıcı bileşenlerinin seçiminden dolayı, termal ayrıştırma ile, bağlayıcının vakum ile kısa sürede ve düşük sıcaklıkta gaz halinde ayrışması başarılmıştır. Bu yöntem sinterleme öncesi ham parçadaki bağlayıcının tam olarak giderilmesini sağlayarak nihai ürünlerdeki artık karbon miktarını en aza indirdiğini rapor etmişlerdir.

Aggarwal, Smid, Park ve German (2007) saf niyobyum (Nb) tozundan hazırladıkları besleme stokları ile elde ettikleri numunelerin bağlayıcı giderme ve sinterleme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Toz enjeksiyon kalıbından çıkmış numuneleri 60 °C heptanda 2 saat tutarak kimyasal bağlayıcı giderme işlemini yapmışlardır. Daha sonra numuneleri yüksek saflıktaki argon gazı ortamında ısıtma bağlayıcı giderme işlemine tabi tutmuşlardır. Bağlayıcı giderme aşamasında numunelerin bir kısmını kimyasal bağlayıcı giderme yapmadan direkt olarak ısıtma bağlayıcı giderme işlemine tabi tuttuklarında çatlakların oluştuğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte besleme stokunun içindeki mumun dar bir erime aralığına sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Isıtma bağlayıcı giderme aşamasında da yüksek saflıkta argon gazı yerine azot gazı kullandıklarında numunelerde niyobyum nitrid'in meydana gelmesinden dolayı numunelerde çarpılma olduğunu gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda ısıtma bağlayıcı giderme işleminin yüksek saflıkta argon atmosferinde yapılması gerektiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kimyasal bağlayıcı giderme işlemi yapılmış numunelerde sinterleme işlemi sonrasında daha düşük değerlerde karbon kaldığını tespit etmişlerdir. Niyobyum karbidin neden olacağı kırılma yapısından kaçına bilmek için numunelerdeki karbon oranının düşük olması gerektiğini açıklamışlardır. TEK'de yapıdaki karbon miktarının kontrolünün zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu zorluğunda bağlayıcı elemanlarının hidrokarbon zincirlerinden meydana gelmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Sinterleme işlemini 1600 - 1800 ve 2000 °C lerde, 0,5 – 1 - 1,5 - 2 saat tutarak ve yüksek vakum atmosferinde (10^{-4} Pa), düşük vakum atmosferinde (0,13 Pa) ve yüksek saflıktaki argon gazı atmosferinde olmak üzere farklı sıcaklık, süre ve ortamlarda

gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda en yüksek yoğunluğu (%98) ve en düşük karbon miktarını 2000 °C 0,5 saat ve düşük vakum atmosferinde elde etmişlerdir. Sinterleme sıcaklığı ile sinterleme süresinin artması sonucu mikroyapıdaki tanelerde büyüme meydana geldiğini bununda tane sınır alanlarını azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ile sinterleme süresinin artması ile numunelerin sertliğinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Aust, Limberg, Gerling, Oger ve Ebel (2006) Ti-6Al-7Nb alaşım tozundan TEK yöntemi ile ürettikleri kemik vidasının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırladıkları besleme stoku hacimsel olarak % 68 toz ve hacimsel olarak % 32 polietilen, parafin ve stearik asitten oluşan bağlayıcı içermektedir. Vidaları 60 MPa enjeksiyon basıncı, 110 °C enjeksiyon sıcaklığı ve 50 °C kalıp sıcaklığında üretmişlerdir. Kalıptan çıkan vidaları 40 °C hezanda bekleterek parafin ve stearik asidin yapıdan uzaklaşmasını gerçekleştirmişlerdir. Isıl bağlayıcı giderme işlemini 250 – 400 °C arasında 10^{-3} mbar vakum atmosferinde yapmışlardır. Parçaları 1250 °C de 10^{-5} mbar vakum atmosferinde sinterlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda numunelerde yaklaşık % 12 büzülme ve 846 MPa çekme dayanımı ve 370 µg/g (% 0,037) kalıntı karbon elde etmişlerdir.

Ferri ve diğerleri (2010) Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK yöntemi ile ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında ağırlıkça %60 parafin mum, %35 polietilen vinil asetat (EVA) ve %5 stearik asitten hazırlanmış bağlayıcı sistemi kullanmışlardır. Numuneleri hacimsel olarak % 69 ve % 65 toz yüklemeli besleme stoklarından üretmişlerdir. Kalıptan çıkan numuneleri 20 saat 40 °C heptanda bekleterek kimyasal bağlayıcı giderme işlemine tabi tutmuşlardır. Numuneleri yüksek vakum atmosferinde (10^{-4} mbar) 1250 °C ve 1350 °C'lerde 2 saat sinterlemişlerdir. Çalışma sonucunda % 65 toz yüklemeli besleme stoklarından ürettikleri ve 1250 °C de sinterledikleri numunelerde 784 MPa çekme dayanımı, % 69 toz yüklemeli besleme stoklarından ürettikleri ve 1250 °C de sinterledikleri numunelerde 806 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Ayrıca % 65 toz yüklemeli numunelerde % 5,7 , % 69 toz yüklemeli numunelerde % 3,4 boşluk olduğunu belirlemişlerdir. Çekme dayanımı değerleri arasındaki farkın bundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çekme yüklemesi altında mikro yapıdaki gözenekler, gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerde ve yük altındaki kesitte etkili bir

kesit daralmasına ve dayanımın ve esnekliğin azalmasına yol açtığını rapor etmişlerdir.

Obasi, Ferri, Ebel ve Bormann (2010) TEK yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım tozundan ürettikleri numunelerin sinterleme ve ısıl bağlayıcı giderme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucu sinterleme sıcaklığı ve süresinin numunenin çekme dayanımına en yüksek etki yaptığını belirlemişlerdir. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ve süresinin numune yoğunluklarının farklı olmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Farklı sürelerde sinterlenmiş numunelerde aynı boyutta boşluklar görülmüş, sinterleme süresinin artması ile boşlukların daha düzenli olma eğiliminde olduklarını rapor etmişlerdir. Mikro seviyede gözenekler ile en yüksek sinterleme sıcaklığının süneklğe etkisinin henüz açıklanamayacağını ifade etmişlerdir. Obasi ve diğerleri yüksek sinterleme sıcaklığının ve uzun sinterleme süresinin parçanın mikroyapısında tane büyümesine neden olduğunu bununda mekanik özellikleri negatif yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Ergül, Gülsoy ve Günay (2009) TEK yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım tozundan ürettikleri numunelerin sinterleme parametrelerinin parçanın mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada parafin mum, polipropilen, karnoba mum ve stearik asitten hazırlanmış bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Kullandıkları besleme stoklarının kritik toz yüklemesi hacimce % 67,5 dir. Numuneleri 12,5 MPa enjeksiyon basıncı, 175 °C enjeksiyon sıcaklığı ve 35-40 °C kalıp sıcaklığında üretmişlerdir. Kalıptan çıkmış numuneleri ilk olarak 60 °C de 4 saat heptan da tutmuşlardır. Isıl bağlayıcı giderme aşamasında numuneleri 600 °C de 1 saat, ön sinterleme aşamasında da 900 °C de 1 saat 10^{-4} torr vakum atmosferinde bekletmişlerdir. Numuneleri 1150, 1200, 1260, 1275 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta ve 1, 2, 5, 7,5, 10 saat olmak üzere beş farklı sürede sinterlemişlerdir. Sinterleme işlemini 10^{-4} torr vakum atmosferinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda 1150 °C de 2 saat sinterlenmiş numunede 330 MPa, 1275 °C de 2 saat sinterlenmiş numunede 580 MPa, 1275 °C de 1 saat sinterlenmiş numunede 357 MPa, 1275 °C de 10 saat sinterlenmiş numunede 704 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir.

Yalçın (2007) Toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımı implantların temel özelliklerinin araştırılması isimli çalışmasında Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-5Al-2,5Fe ve Ti-6Al-4V-4Ta alaşımlarının mekanik özelliklerini araştırmıştır. Yalçın numunelerin sinterleme işleminde ilk olarak 5 °C/min ısıtma hızında 400 °C sıcaklığa kadar çıkmış ve bu sıcaklıkta 20 dakika bekleyerek yapıdaki yağlayıcıyı gidermiştir. Daha sonra, aynı ısıtma hızında 1200 °C sinterleme sıcaklığına çıkmış bu sıcaklıkta iki saat bekleyerek sinterleme işlemini gerçekleştirmiştir. Numunelerin sinterleme işlemini tüp fırın içerisinde argon gazı ortamında yapmıştır. Sinterleme işleminden sonra fırın 5 °C/min soğutma hızında soğutulmuştur. Deneyler sonucunda, Ti-6Al-4V alaşımından yapılan numunelerde en yüksek 464,11 MPa, Ti-6Al-7Nb alaşımından yapılan numunelerde en yüksek 415,96 MPa, Ti-5Al-2,5Fe alaşımından yapılan numunelerde en yüksek 581 MPa çekme dayanımı elde etmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarından TEK ile titanyum ve titanyum alaşımlarından üretimin gittikçe yaygınlaştığı ancak toz ve bağlayıcı sistemin enjeksiyon parametrelerine (enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı) etkilerinin tam olarak optimum bir hale getirilemediği sadece Ahn ve diğerlerinin (2009) demir ve paslanmaz çelik tozlarından toz enjeksiyon yöntemi ile parça üretiminde enjeksiyon parametrelerini sanal ortamda optimize etmeye çalıştıkları görülmüştür. Yapılan çalışmanın literatürdeki bu boşluğu doldurmaya yardım edebileceği düşünülmektedir.

3. TİTANYUM

Alüminyum ve magnezyum genellikle hafif metaller olarak bilinse de, titanyum da demirin yoğunluğunun yaklaşık %60 kadarı bir yoğunluğa sahiptir. Dünyada birçok ülke bu malzemenin öneminin farkında olduğu için araştırma, geliştirme ve uygulamaya yönelik çalışmaları desteklemektedir. Titanyum, hem mühendislik uygulamalarında hem de diş ve medikal uygulamalarda ilgi duyulan özel bir malzemedir.

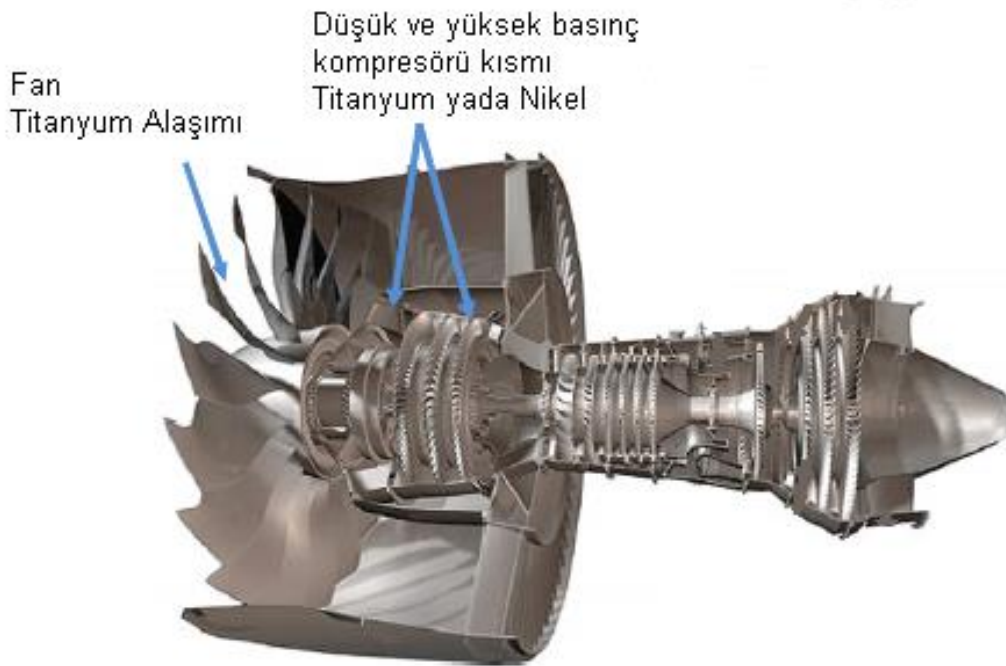
Titanyum ilk olarak maden bilimci ve kimyacı olan William Gregor tarafından 1791 yılında keşfedilmiştir. Dört yıl sonra, Martin Klaproth, Yunan çocuk mitolojisindeki Titans'ların hikayesine dayanarak bulunan bu elemente Titanyum adını vermiştir. Titanyum oksitten titanyum metalini elde etmek için yüz yıldan daha fazla bir süre gerekmiştir. Titanyumun ilk alaşımları 1940'ların sonunda geliştirmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı piyasada bulunan titanyum alaşımları arasında en yaygın kullanılanıdır. Bundan dolayı Ti-6Al-4V alaşımının yoğunluğunun ve özelliklerinin geliştirilmesi için çok fazla çalışma yapılmaktadır (Leyens ve Peters, 2003:1,36).

Niyobyum 1801 yılında İngiliz kimyager Charles Hatchett tarafından keşfedilmiştir. Bugünkü adı Alman kimyacı Heinrich Rose tarafından tantalum'dan ayırmak için verilmiştir. Tantalum niyobyum gibi hacim-merkezli kübik bir yapısı olan yumuşak, sünek içerisinde katkı maddesi içermediğinden dolayı işlenebilirliği ve çalışılabilirliği kolay bir malzemedir. Niyobyum 200 yıl önce keşfedilmesine rağmen tarihte ve endüstride anlamlı bir yere kavuşması 1950'lerin ortasında Kanada ve Brezilya'da büyük yatakların keşfedilmesi ile olmuştur. Dünyadaki niyobyum arzının %80'ni Brezilya daki madenlerden elde edilmektedir (Aggarwal ve diğerleri 2006).

Vanadyum (V), Molibden (Mo), Niyobyum (Nb) gibi elementlerin titanyum ile karıştırılması sonucunda elde edilen matriks titanyum alaşımı olarak bilinir. Titanyum organik bir malzemedir. Titanyumun kapsamlı ve tercih edilmesini sağlayan güçlü özellikleri vardır. Bu özelliklerden bazıları şunlardır: düşük yoğunluk ($4,5 \text{ g/cm}^3$), yüksek spesifik dayanım, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı,

çatlak yayılımına karşı direnç, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk ve mükemmel korozyon direncidir. Bazı titanyum alaşımlarının en yüksek çalışma sıcaklığı yaklaşık 550 °C ile 700 °C arasındadır (Ivasyshyn ve Aleksandrov 2008, Chunxiang ve diğerleri 2011).

Titanyum alaşımları, belirli bir akma dayanımı ve yoğunluk arasındaki ilişkiye göre ($\sigma_{0.2}$ / yoğunluk) hafif metal alaşımlar, çelikler, nikel alaşımlar vb. malzeme türleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptirler. Hatta bu avantajlarını yaklaşık 500 °C sıcaklıkta bile koruyabilmektedirler. Bundan dolayı bazı titanyum alaşımları gaz türbini ve jet motorlarının parçalarının üretimi için çok uygundur (Chunxiang ve diğerleri 2011) (Resim 3.1).



Resim 3.1. Bir jet motorunun kesit görüntüsü (Ulutan ve Özel 2011)

3.1. Titanyum Alaşımı Türleri

Pratikte kullanılan ilk titanyum alaşımı "Ti-6Al-4V" 1954 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde geliştirilmiştir. Isı direnci, dayanım, esneklik, tokluk, işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik, korozyon direnci ve biyouyumluluk özellikleri yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı tüm titanyum alaşımları içerisinde Ti-6Al-4V alaşımının % 75-85 oranında tüketilmesinin en önemli nedenidir. Diğer titanyum alaşımları Ti-

6Al-4V alaşımasının değiştirilmiş / geliştirilmiş şekli olarak görülmektedir. Bilim dünyasında yüzlerce çeşit titanyum alaşımı geliştirilmiştir. Ama bunlardan 20-30 tanesi (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-5Al-2,5Sn, Ti-2Al-2,5Zr, Ti-32Mo, Ti-Mo-Ni, Ti-Pd gibi) çok bilinendir (Chunxiang ve diğerleri 2011). Farklı endüstriyel sektörler değişik tipte ve yeni geliştirilen titanyum alaşımları kullanmaktadır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı bazı yerler (Ratner ve diğerleri 1987)

Kullanıldığı yer	Titanyum alaşımı
Gaz türbin motoru malzemesi	Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,35Si-0,06C Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-4Al-4Mo-2Sn-0,5Si
Uçak gövdesi	Ti-10V-2Fe-3Al Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al Ti-15Mo-2,8Al-3Nb-0,2Si
Balistik zırh	Ti-6Al-1,8Fe-0,2Si
Jeotermal ve açık denizde kullanılan borular	Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al
İyi spor malzemeleri (hafif ve yüksek dayanımlı)	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
Diş ve medikal uygulamalar	Vanadyumsuz ve Ti-6Al-4V eşdeğer alaşımlar
Medikal ortopedik aletler	NiTi-Cu

Titanyuma ilave edilen alaşım elementleri α ve β dengeleyicileri olarak iki ana gruba ayrılır (Çizelge 3.2). α dengeleyicisi olarak bilinen Al, Sn, Ga ve Zr gibi elementler yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler. Faz dönüşüm sıcaklığını azaltan V, Mo, Nb, Ta ve Cr gibi alaşım elementleri, β dengeleyicisi olarak bilinirler. Genellikle β dengeleyici elementleri oldukça gevrek bir yapı sağlarlar. Bunların yanı sıra mekanik dayanımı, kimyasal kararlılığı, kalıplanabilirliği ve/veya

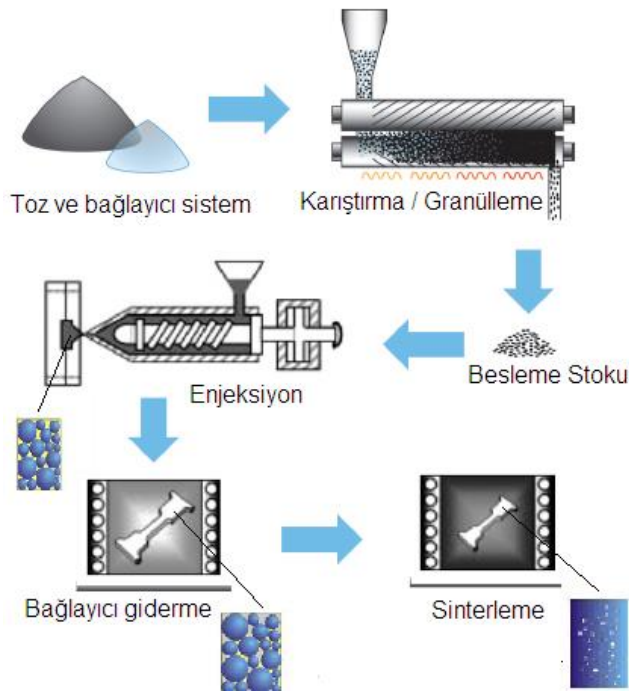
tane incelmelerini geliştirmek için titanyum bazlı alaşımlara sıklıkla Fe, Cu, Ni, Si ve B alaşım elementleri ilave edilmektedir (Oshida 2007:15).

Çizelge 3.2. Alaşım elementlerinin titanyuma etkileri (Oshida 2007:20)

Tip / Malzeme özellikleri α dengeleyici element β dengeleyici element	α ve α yakın Al, Sn, Ga, Zr, C, O, N	$\alpha + \beta$	β ve β yakın V, Mo, Nb, Ta, Cr
	Ticari saflıktaki Ti Ti-5Al-2,5Sn Ti-5Al-6Sn-2Zr-Mo Ti-6Al-2Sn-4Zr-Mo Ti-8Al-1Mo-1V	Ti-5Al-2,5 Fe Ti-5Al-2Mo-2Fe Ti-5Al-3Mo-4Zr Ti-5Al-7Nb Ti-6Al-4V Ti-6Al-6V-2Sn Ti-6Al-2Sn-4Zr-Mo	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr Ti-6Al-6Fe-3Al Ti-10V-2Fe-3Al Ti-13V-11Cr-3Al Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-35V-15Cr Ti-8Mo-8V-2Fe-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-30Mo, Ti-40Mo Ti-13Nb-13Zr Ti-25Pd-5Cr Ti-20Cr-0,2Sn Ti-30Ta
Materyal özellikleri	Alçak		Yüksek
Özel yoğunluk			
Oda sıcaklığındaki dayanımı			
oda sıcaklığındaki tokluğu			
Elastikiyet modülü			
Yaşlandırma sertliği			
Sertleştirilebilirlik			
Plastik şekillenebilirlik			
Gerinim oranı hassasiyeti			
Süper plastik şekillenebilirlik			
	Yüksek		Alçak
β dönüşüm sıcaklığı			
işlenebilirlik			
Isı direnci			
Kaynak edilebilirlik			
Yüksek sıcaklık dayanımı			
Sürünme dayanımı			

4. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA

TEK, metal ve seramik tozlarından üretim yapabilmek için toz metalurjisinin yetenekleri ile plastik enjeksiyon kalıplamanın biçimlendirme verimliliğinin birleşimi sonucunda ortaya çıkmış üretim teknolojisidir (German 1990:65). TEK plastik enjeksiyon kalıplama prensibine dayanır. Bu yöntem özellikle küçük boyutlu parçaların üretimi ve karmaşık şekilli parçaların daha düşük maliyetlerle üretilebilmesi için geliştirilmiştir. Ayrıca, bu yöntem yüksek yoğunluklu metallerden, seramiklerden, kompozitlerden ve intermetallerden parça yapabilmek için kullanılır. Bu tekniğin en büyük avantajı, parçalarda geometrik hassasiyet ve yüksek üretim miktarlarında düşük maliyet sağlamasıdır. TEK besleme stoku hazırlama, enjeksiyon kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme olmak üzere dört adımdan meydana gelmektedir (Resim 4.1). Bu kalıplama tekniğinde iyi bir sonuca ulaşmak için her bir adımın parametrelerinin iyi optimize edilmesi gereklidir. Örneğin besleme stoku adımında toz bağlayıcı karışımındaki kritik toz yüklemesi önemli bir parametredir. Bir sonraki adım olan enjeksiyon aşamasında da sıcaklık, basınç gibi kalıplama parametreleri dikkate alınacak parametrelerdir (German 1990:58; Subaşı ve Karataş 2012).



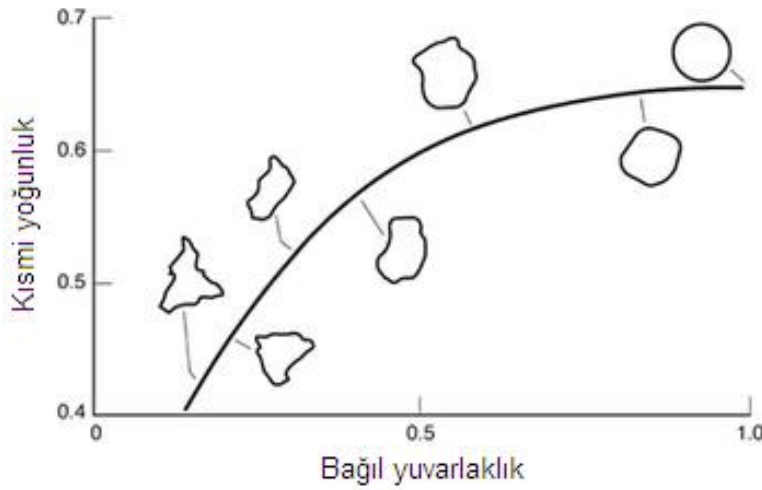
Resim 4.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama Aşamaları

4.1. TEK de Kullanılan Tozlar

TEK de başarılı bir üretim için tozların özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Nihai ürünün mekanik özelliklerini tozun başlangıç özellikleri belirler. Genel olarak TEK de kullanılan tozlarda aşağıdaki özelliklerin olması istenir (Karataş 1997).

- Yüksek paketlenme yoğunluğu, düşük maliyet için uygun parçacık büyüklüğü dağılımı (karışım için düşük maliyetli büyük parçacık ve yüksek maliyetli küçük parçacık).
- Topaklanma olmaması,
- Küresel parçacık şekli,
- Bağlayıcının ayrışmasından sonra parçanın bozulmasını önlemek için parçacıklar arasında yeterli sürtünme (55° üstünde şev açısı)
- Hızlı sinterleme için küçük ortalama parçacık büyüklüğü ($20\ \mu\text{m}$ altında),
- Kapalı, gözeneksiz yoğun parçacık,
- Temiz parçacık yüzeyi.

TEK de tozun şekli önemli bir parametredir. Örnek olarak; küresel bir toz, yüksek paketlenme yoğunluğu sağlar ve böylelikle sinterleme sırasında oluşan çekme (daralma) miktarını azalttığı gibi, katılacak bağlayıcı miktarını da en aza indirger (Şekil 4.1). Yalnız küresel parçalar arasında mekanik bağlılık olmadığından ham mukavemet düşer. Özellikle ayrıştırma sırasında ve sinterlemede şekil kaybı ortaya çıkar. Düzensiz şekilli tozlarla üretilmiş parçaların ise bağlayıcı giderme aşamasında şekillerini daha iyi korumasına rağmen paketlenme yoğunluklarında azalma olduğu tespit edilmiştir (Karataş 1997; German ve Bose 1997:55).



Şekil 4.1. Toz şeklinin yoğunluğa etkisi (Heaney 2012:54).

Titanyum tozları; sünger (sponge fines), hydride-dehydride (HDH) ve gaz atomize olmak üzere üç farklı türde üretilirler. TEK ile parça üretiminde kullanılan sünger (sponge fines) ve hydride-dehydride (HDH) tozlar gaz atomize tozlar ile karşılaştırıldıklarında daha ucuzdurlar. Ancak sünger (sponge fines) ve hydride-dehydride (HDH) tozların karmaşık şekillerinden dolayı bu tozlardan hazırlanan besleme stoklarının maksimum toz yüklemesi daha düşük olmaktadır (Ferri 2010, German ve Bose 1997:58).

TEK’de kullanılacak tozun tane büyüklüğü de dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. TEK de kullanılan tozların 1 μm ila 45 μm arasında bir boyuta sahip olması istenir (Ferri 2010, Hartwig ve diğerleri 1998). TEK de kullanılan tozun özelliklerinin etkileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tozların özellikleri ve TEK'e etkileri (Karataş 1997)

Tanecik tipi	Etkiler
Küçük tanecik	(A)= Hızlı sinterleme (A)= Kusursuz parça şekli (D)= Yavaş bağlayıcı çözümü (D)= Yüksek maliyet (D)= Daha fazla topaklanma (D)=Karışım viskozitesinde yükseklik
Küresel tanecik	(D)= Daha fazla sinterleme firesi (A)= Yüksek paketleme yoğunluğu (A)= Düşük karışım viskozitesi (D)= Bağlayıcı gidermede çökme (D)= Düşük ham mukavemeti
Geniş tanecik dağılımı	(A)= Yüksek paketleme yoğunluğu (A)= Daha az sinterleme firesi (D)= Yavaş bağlayıcı giderme

A= Avantaj, D= Dezavantaj

4.2. TEK de Kullanılan Bağlayıcı Sistem

TEK'de, toz özelliklerinin yanı sıra bağlayıcının özellikleri de önemlidir. Bağlayıcıdan, tozları istenilen şekilde paketlemesi ve sinterlemeye kadar ham parçanın şeklinin korunmasına yardımcı olması ve bitmiş üründen ise tamamen uzaklaşması istenir. Bağlayıcılar besleme stokunun kolay enjekte edilmesi için düşük viskoziteye sahip olmalı, homojen bir besleme stoku hazırlamak için kalıba yapışmamalı ve uçucu olmamalı, kademe kademe sistemden ayrılmalı, kolayca uzaklaştırılabilmesi, uzun raf ömrüne sahip olmalı, ucuz olmalı, düşük ısı genleşme katsayısına sahip olmalı, kalıplama ve karışım sıcaklığında bozulmamalı ve akış esnasında tozdan ayrılmamalıdır. Ayrıca toz ile kimyasal tepkimeye girmemelidir (Karataş ve Sarıtaş 1998, Setasuwan ve diğerleri 2008, Yang ve diğerleri 2002).

TEK’de kullanılan bağlayıcı sistemden ilk olarak istenilen, besleme stokuna akışkanlık kazandırması ve kalıp içerisinde tozların birbirine tutunmasını sağlamasıdır. Bağlayıcı sistem genellikle çoklu elemanlardan meydana getirilir. Oluşturulan bağlayıcı sistemin temel elemanı olarak ya termoplastik yada termoset malzeme kullanılır. Temel eleman olarak kullanılan malzeme, bağlayıcı giderme aşamasından sonraki diğer adımlarda ürünün şeklini korumasını sağlar. Bağlayıcı sistemin geri kalanı ise mum ve yağlayıcı gibi kimyasallar kullanılarak hazırlanır. Mum ve yağlayıcı, besleme stokunun akışkanlık özelliğinin artmasına yardımcı olur. Ayrıca bağlayıcı sistemde kullanılan mum ve yağlayıcılar kimyasal bağlayıcı giderme işleminde numuneden uzaklaştırılarak boşluklu bir yapı elde edilmesi sağlanır. Bu boşluklu yapı ısıl bağlayıcı giderme işleminde temel eleman olarak kullanılan termo yada termoset plastik malzemenin parçanın yapısını bozmadan uzaklaşmasını sağlar. Bağlayıcı sistemin kimyasal ve ısıl olmak üzere iki adımda uzaklaştırılması numunedeki kalıntı karbon miktarında azalmaya sebep olur. Ayrıca hazırlanan bağlayıcı sisteme toz ve bağlayıcı arasındaki yüzey enerjisini ve temas açısını düşürmek için yüzey aktif maddeleri de ilave edilir (German 1990:60, Ferri 2010, Loh ve diğerleri 2001).

4.3. Karıştırma ve Granülleme

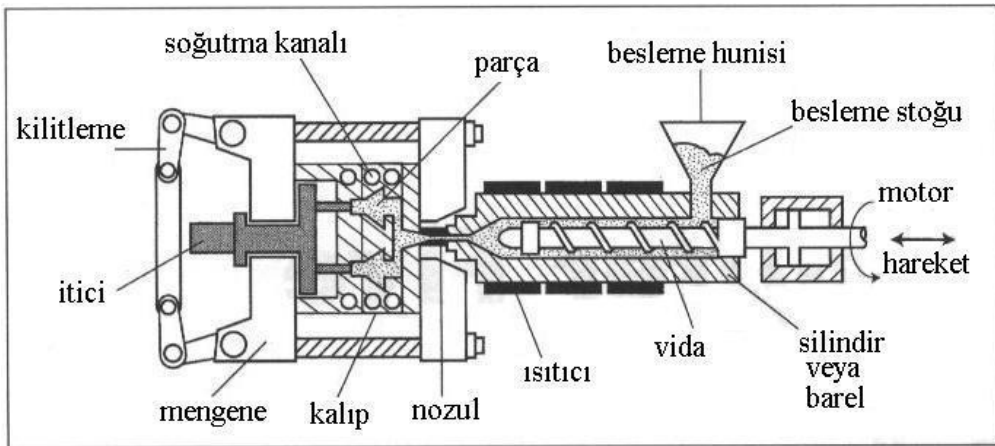
Parça üretiminde kullanılacak toz ve bağlayıcı seçildikten sonra bunların homojen bir şekilde karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma ve granülleme işlemi kalıplama için besleme stokunun hazırlanmasında ilk işlemdir. Besleme stokundaki hata parça üzerinde istenilmeyen kusurların oluşmasına sebep olur. Karıştırmadaki amaç, toz parçacıklarını bağlayıcı ile kaplamak, topaklanmaları dağıtmak, besleme stokunun her yerinde homojen bir dağılım sağlamaktır (Karataş ve Sarıtaş 2001, Karataş 1997).

TEK malzemesinin granül yapılmasının birinci amacı, kalıplama makinasını otomatik olarak doldurabilecek şekilde toz ve bağlayıcının kolayca taşınabilecek kümelerin hazırlanmasıdır. İkincisi ise kalıplama işlemi için hurda malzemeyi tekrar kullanabilmektir. Hurda malzeme, hatalı kalıplanmış parçalardan, dağıtıcı ve yolluklardan oluşur. Hurda malzemenin tekrar kullanımı ekonomik bir avantajdır (Ergüney 2005, Karataş 1997, German 1990:59).

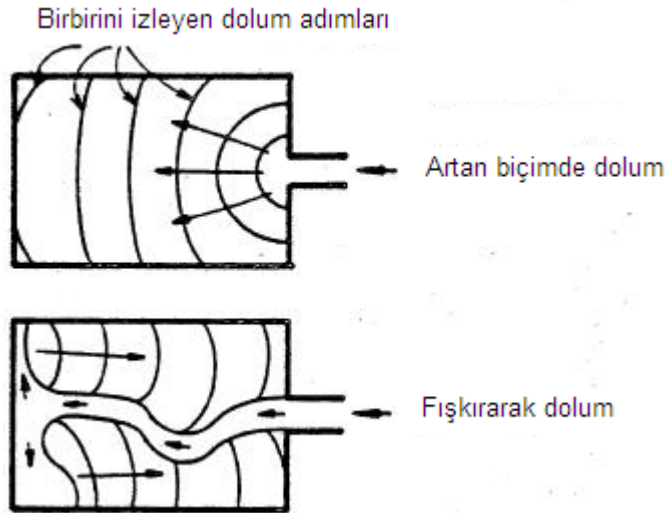
4.4. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama prensip olarak geleneksel plastik enjeksiyon kalıplamaya benzer (Şekil 4.2). Ancak besleme stokunun viskozitesi ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinden dolayı enjeksiyon tezgahının bazı donanımlarında değişiklik yapılması gereklidir.

Enjeksiyon kalıplama işlemi esnasında, sıcaklık ve basınç altında besleme stocku kalıp boşluğuna farklı şekillerde doldurulabilmektedir (Şekil 4.3). Enjeksiyon esnasında fışkırarak dolum, arzu edilmeyen bir dolum şeklidir. Bu tür dolum parça yüzeyinde birleşme çizgilerinin oluşmasına ve parça içerisinde havanın sıkışmasına sebep olur. Enjeksiyon kalıplama ile başarılı bir parça üretimi için artan biçimdeki dolum en fazla arzu edilen dolum şeklidir (German 1990:65).

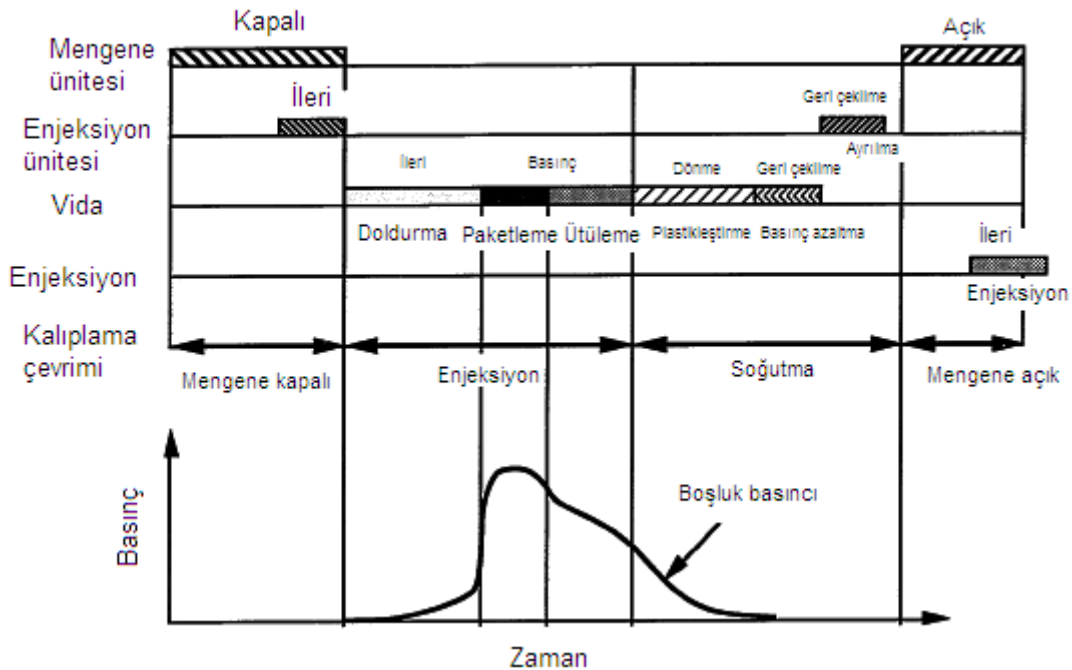


Şekil 4.2. Kalıp ve enjeksiyon silindrinin kesit görünüşü (German 1990:65, German ve Bose 1997:60)



Şekil 4.3. Kalıp dolum şeklinin görünüşü (German 1990:66)

TEK yöntemi ile kusursuz parça üretimi için besleme stokunun kalıplama işlemi ile ilişkili teknik özelliklerinin çok iyi belirlemesi gereklidir. Ayrıca TEK yöntemi ile üretilmiş parçanın kalitesini kullanılan besleme stokunun kalıba enjekte edilmesi sırasında ortaya koyduğu akış davranış özellikleri belirler. Enjeksiyon kalıplama işlemi plastikleştirme, doldurma, paketlenme, ütüleme ve soğutma olmak üzere beş aşamadan meydana gelir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Enjeksiyon kalıplama işlemi aşamaları (Rhee 1992)

Şekil 4.4'de gösterildiği gibi kalıp boşluğuna hızla artan basınçla besleme stokunun girmesi bir zamanla sınırlıdır. Bu basınç zirveye ulaştığında, besleme stoku katılaşıp kataraktik tutulur. Bu noktadan sonra enjeksiyon makinesi daha fazla boşluk basıncını kontrol edemez. (Ergüney 2005, German 1990:66, German ve Bose 1997:60).

Kalıp dolduktan sonra operasyon boşluktaki hassasiyeti sağlamak için basınç kontrolünden vidanın hız kontrolüne değişir. Basınç giriş donana kadar tutulur, buna ütüleme aşaması denir. Bu noktada dış basıncın kalıp boşluğu üzerinde çok küçük bir etkisi olur. Soğuma sırasında basınçtaki azalmanın yerine termal büzülme öncülük eder. Son olarak bağlayıcı çıkarılmaya yetecek kadar soğuduğu zaman kalıp açılır ve parça iticilerle çıkarılır. İtici sistemi, hareketi hidrolik sistemden veya ayrı bir mekanik hareketten alır (Ergüney 2005, German 1990:67, German ve Bose 1997:61).

Kalıplama zamanı boşluk büyüklüğüne, dolma ve soğuma zamanına bağlıdır. Bu zaman beş saniyeye kadar kısaltılabilir veya bir dakika kadar da sürebilir. Akışı sağlamak için sıcaklık bağlayıcının yumuşama noktasından daha fazla olmalıdır. Bu sıcaklık genellikle 50-200°C arasındadır. Sıcaklık çok düşük olursa kısa doldurma zamanı gerekir bu da tam dolmamaya (eksik baskı) yol açar. Buna karşılık sıcaklık çok yüksek olduğunda malzemede derecelenme olabilir ve soğuma zamanı uzar. Kalıplama basıncı debide en büyük etkiye sahiptir buna rağmen basınç artarken yüksek viskoziteden ayrılma etkisi de ortaya çıkar. Enjeksiyon basıncı fışkırmaya başlaması ile ölçülen basınçtır. Basınç çok düşük olursa yüzey boşlukları oluşur ve kafi ütüleme meydana gelmez. Buna karşılık çok yüksek ütüleme basıncı da parçanın çapak yapmasına neden olabilir (Ergüney 2005, German 1990:69, German ve Bose 1997:63).

4.5. Bağlayıcı Giderme

Kalıptan çıkmış ham üründen bağlayıcı sistemin uzaklaştırılması TEK işleminde dikkatli ve kontrolü yapılması gereken aşamadır. TEK'de yaygın olarak ısı, vakum, katalitik ve kimyasal+ısı olmak üzere dört farklı bağlayıcı giderme teknikleri kullanılmaktadır. Her yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları

bulunmaktadır. Hangi bağlayıcı giderme sisteminin kullanılacağını bağlayıcı içerisinde kullanılan polimerik malzemeler belirler.

Bağlayıcı giderme aşamasında tüm bağlayıcının uzaklaştırılması tozların dökülmesine ve parçanın bozulmasına yol açar. İlk aşamada bağlayıcının 3/4'ü, geriye kalan kısmı ise sinterleme aşamasında ayrışır. Bağlayıcı ısıtılınca yumuşar ve bu nedenle yerçekimi ile içerideki buhar keselerinde oluşan gerilmelere karşı koyamaz. Bundan dolayı toz taneleri arasında sürtünmeye gerek duyulur. Parçayı bozmadan ve kirlenmeden, gözeneklerden bağlayıcıyı sıvı ve buhar halinde çıkartmak gerekir. Bağlayıcı uzaklaştırmanın en uygun ve kolay yolu çok bileşenli bağlayıcı formülü kullanmaktır. Bağlayıcı bileşenlerinden ana bağlayıcı uzaklaştırılırken tozları bir arada tutacak olan iskelet bağlayıcı parçanın bozulmasını önleyecektir (Urtekin 2008, Karataş 1997).

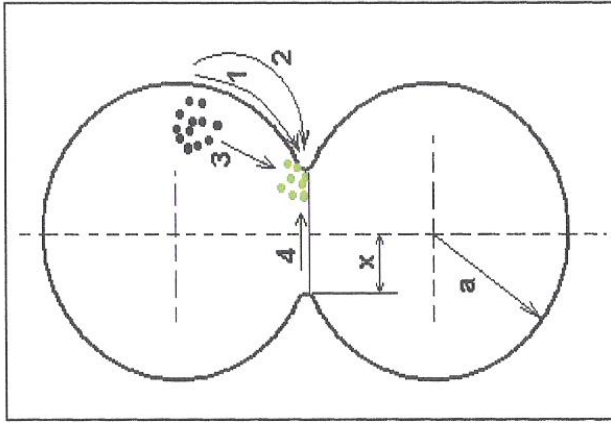
Bağlayıcının çıkarılması sırasında parçanın dayanımı önemli oranda azalır, bu yüzden bağlayıcı çıkarma işlemine tabi tutulmuş parça sinterleme aşamasına dikkatli bir şekilde taşınmalıdır (Ergüney 2005).

4.6. Sinterleme

Sinterleme işlemi parçanın ısıtılması ile toz parçacıklarının birbirlerine kaynamasının sağlanmasıyla son ürünün dayanımının artırılması işlemidir. Bu işlem atmosfer kontrollü fırınlarda veya bazen vakum altında ergime sıcaklığının altındaki ısılarda gerçekleştirilir. TEK deki sinterleme işlemi toz metalürjisindeki aynıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta metal tozlarının kullanılması halinde bunların oksitlenmeden korunmasıdır. Onun için işlem indirgeyici koşullarda yapılır. Metali korumanın ötesinde indirgeyici koşullar aynı zamanda metal toz parçacıklarının üzerlerinde önceden bulunan oksitlerin temizlenmesi için de bir avantaj durumundadır. Tanelerin küçük olması yüzünden toz üzerinde biriken oksit TEK işlemlerinde toz metalürjisinden daha büyük bir öneme sahiptir (Ergüney 2005, Gökten 2003).

Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayını ve küçük parçaların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir (Türker 2007). Sinterleme, parçacıkların

birbirlerine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma işlemidir. Bazı durumlarda bu bağlanma, sıvı faz sinterleme oluşumu ile gerçekleşse de çoğu zaman erime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşur. Bağlanma, temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir (Şekil 4.5). Bu tür boyunlaşma, mukavemetin ham mukavemete oranla artmasını sağlar.



1. Yüzey yayınımlı
2. Buharlaşıma ve yoğunlaşma
3. Kütle yayınımlı
4. Tane sınırı yayınımlı

Şekil 4.5. Boyun Oluşumundaki Sinterleme Mekanizması (Geçkinli 1992:24)

Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımlı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir (Urtekin 2008).

5. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMADA BESLEME STOKLARININ GENEL REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

TEK besleme stokunda quasi-plastic yada pseudo-plastik akış karakteristikleri görülür. Bu akış davranışını gösteren besleme stoklarının TEK uygulamalarında başarılı olduğu tespit edilmiştir. Besleme stoklarının kayma gerilmesi Eş.5.1'te verilen denklem ile belirlenir.

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (5.1)$$

Burada τ kayma gerilmesi, $\dot{\gamma}$ kayma hızı, n akış davranış indeksi ve K sabittir. $n > 1$ materyalin dilatant olduğunu gösterir. Bu tip materyallerde yüksek kayma hızı altında metal tozu ve bağlayıcı birbirinden ayrılır.

Toz ve bağlayıcı karışımından elde edilen besleme stokunun reolojik özelliklerinden en önemlisi viskozitedir (η), Eş. 5.2'deki denklem ile belirlenir:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5.2)$$

Genelde viskozite (η), kayma hızı ($\dot{\gamma}$), sıcaklık, toz yüklemesi ve bağlayıcı kompozisyonlarına bağlıdır (Eş. 5.3).

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T, \phi, \eta_b) \quad (5.3)$$

Burada η_b bağlayıcı karışımın viskozitesidir.

Genelde viskozite kayma hızına bağlı olarak tespit edilir (Eş. 5.4).

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5.4)$$

Burada η besleme stoku viskozitesi, K sabittir. $\log \eta - \log \dot{\gamma}$ grafiğinin eğiminden $n-1$, buradan da n tespit edilebilir.

TEK besleme stokunun reolojik özelliğindeki ikinci önemli yaklaşım sıcaklığa bağlı viskozitedir. Normalde en iyi yaklaşım olarak, Arrhenius eşitliği (Eş. 5.5) kullanılır.

$$\eta = \eta_0 \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \quad (5.5)$$

Burada η_0 sabittir, E akış aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Eş. 5.5'e göre $\ln \eta$ grafiği çizilebilir. $1/T$ ile kesin kayma hızı elde edilebilir. Bu grafiklerde keskin viskozite değişimleri oldukça azaltılarak kalıplanmış parçalarda meydana gelen burulma, çatlak ve yoğunluk gerilimi ve besleme stokunun akışkanlığının azalmasından kaçınılabilmektedir. Buna ek olarak düşük sıcaklığa bağlı viskozite kalıp boşluğuna daha fazla basınç aktarılmasına izin verir ve parçadaki çekmeye (büzülmeye) bağlı hataların önlenmesine yardımcı olur.

Besleme stokunun reolojik özellikleri ile ilişkili üçüncü önemli yaklaşım besleme stokunun toz yüklemesine bağlı viskozitesidir. Literatürde önemli bir yere sahip olmasına rağmen çeşitli Newtonian akışlarda sadece küresel şekilli tozlardan meydana gelmeyen karışımların viskozitesini tahmin etmek için teorik olarak uygulanabilirliği azdır (Eş. 5.6 - Eş. 5.7).

$$\eta_R = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-2} \quad (5.6)$$

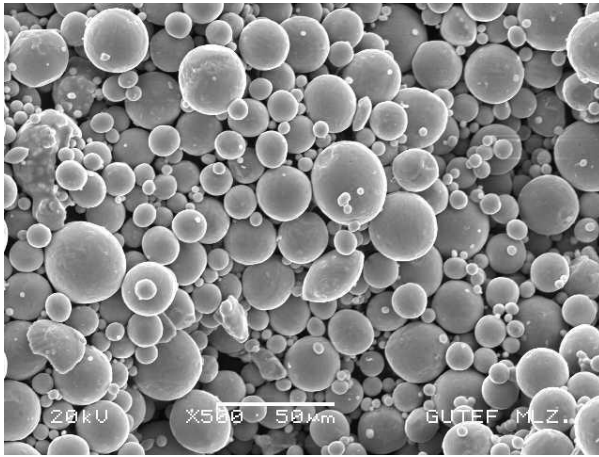
$$\eta_R = \frac{\eta_f}{\eta_b} = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-2} \quad (5.7)$$

Burada η_R relative (bağıl) viskozite; besleme stoku viskozitesinin bağlayıcı viskozitesine oranı, ϕ besleme stokuna yüklenen toz miktarı, ϕ_m kritik toz yükleme miktarı, η_f besleme stoku viskozitesi, η_b bağlayıcı viskozitesidir (Huang 2003).

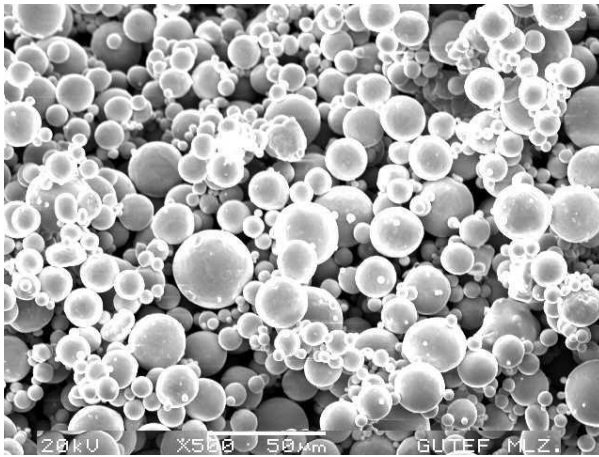
6. MALZEME VE YÖNTEM

6.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda gaz atomizasyon yöntemi ile elde edilmiş TLS Teknik GmbH firmasından temin edilen küresel şekilli ve boyutu $< 25 \mu\text{m}$ olan Ti-6Al-4V alaşım tozu (Resim 6.1) ile Ti-6Al-7Nb (Resim 6.2) alaşım tozu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan tozların kimyasal özellikleri Çizelge 6.1 ve 6.2’de verilmiştir.



Resim 6.1. Ti-6Al-4V tozunun SEM görüntüsü



Resim 6.2. Ti-6Al-7Nb tozunun SEM görüntüsü

Çizelge 6.1. Ti-6Al-4V tozunun kimyasal özellikleri

Element	Al	V	C	Fe	O	N	H	Y	Zn	Mg	Sn	Ti
%	6,42	4,22	0,007	0,130	0,120	0,016	0,0010	<0,001	<0,002	<0,002	0,001	Geri kalan

Çizelge 6.2. Ti-6Al-7Nb tozunun kimyasal özellikleri

Element	Al	Nb	Fe	O	N	H	Ti
%	5,82	6,58	0,050	0,190	0,006	0,001	Geri kalan

6.2. Bağlayıcı Sistem Elemanları

Bağlayıcı sistem elemanları olarak Çizelge 6.3’de verilen kimyasallar kullanılmıştır.

Çizelge 6.3. Bağlayıcı Sistem Elemanları

	Bağlayıcı Elemanları	Yoğunluğu (g/cm ³)	Ağırlıkça (%)	Ergime Noktası (°C)	Bağlayıcı Sistemin Yoğunluğu (g/cm ³)
Bağlayıcı Sistem (B)	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (I 668 UV)	0,968	15	134	0,938
	Polipropilen (PP-MH 418)	0,85	10	190	
	PEG 20.000	1,2	13	58 - 63	
	Parafin	0,9	60	42-72	
	Stearik asit	0,94	2	68-70	

6.3. Besleme Stoklarının Hazırlanması

Çalışmada besleme stoklarının hazırlanması aşamasında ilk olarak bağlayıcı sistem elemanları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi’nde bulunan Turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda kuru ortamda karıştırılmıştır. Bağlayıcı sistem elemanları Karataş ve diğerlerinin (2004) yaptıkları çalışma doğrultusunda 45

dakika kuru ortamda karıştırılmış ve bu sürenin homojen bir karışım için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

İkinci aşamada ise tozlar ve bağlayıcı sistem 750 rpm dönüş hızına ve 85 Ncm torka sahip sıcak karıştırma sistemi kullanılarak karıştırılmıştır. Sıcak karıştırma işlemi $68^{\circ}\text{C} \pm 3$ 'de 30 dakika gerçekleştirilerek homojen bir yapıya sahip besleme stokları elde edilmiştir (Resim 6.3).



Resim 6.3. Sıcak karışım yapılmış %50 Ti-6Al-7Nb + %50 B besleme stoku optik mikroskop görüntüsü

6.4. Reoloji Çalışmaları

Çalışmada, bağlayıcı sistemlerinin ve besleme stoklarının reolojik özellikleri, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Lloyd marka Ergiyik Akış İndeksi (EAI) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Testler ASTM D 1238 (TS EN ISO 1133) standardına göre yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan EAI cihazının ısıtıcı sistemi $0,1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetindedir ve cihaz elle ile kumanda edilebilir özelliktedir. Basınç için kullanılan yükler kalibrasyon sertifikasına sahiptir. İçerisinde besleme stokunun konulduğu ve etrafı yalıtılmış 9,55 mm ($\pm 0,0076$ mm) çapında, 162 mm yüksekliğinde ve 200°C 'de 60-65 HRC sertliğini koruyabilecek özellikte silindirik haznesi olan EAI cihazı, SAE 52100

malzemesinden üretilmiştir. Piston, silindire kaygan geçme toleransında geçmektedir. Pistonun üzerine yük konulan kısmında, pistondaki ısının yüke geçmesini önleyen bir yalıtım bileziği bulunmaktadır. Orifisin çapı 9,5 mm ve yüksekliği 8 mm olup tugsten karbür malzemesinden üretilmiştir. Orifis üzerinde bulunan ve besleme stokunun içerisinden geçerek aktığı delik (nozul) silindirik kesitli olup 2,095 mm ($\pm 0,0051$ mm) çapındadır (Uluer (2008)).

EAl cihazından elde edilen kayma hızı değerleri görünür değer olup görünen kayma hızı ($\dot{\gamma}_g$) olarak adlandırılmaktadır. EAl cihazında, uygulanan basınç sonrasında oluşan hız ve hıza bağlı olarak yer değiştirme miktarı ölçülmektedir. Ölçülen yer değiştirme miktarı kullanılarak debi hesaplanmaktadır. Bu debi değeri, nozul yüzeyindeki (duvardaki) kayma hızının (Eş. 6.1) elde edilmesi için kullanılmaktadır. Uygulanan basınçta nozul boyunca düşme olmadığı kabulü ile birlikte ($\Delta p = p$) nozul yarıçapı (R) ve nozul uzunluğuna (L) ait geometrik değerler kullanılarak Newtonian bir akışkan için silindir içindeki akışta duvardaki kayma gerilmesi (τ) Eş. 6.2 ile hesaplanmaktadır. Dolayısı ile elde edilen değerler Newtonian bir akışkan için gerçek değerler olup, Newtonian olmayan bir akışkan için bu değerler görünür değerler olarak adlandırılmaktadır. Görünür kayma hızı ve duvardaki kayma gerilmesi kullanılarak hesaplanan viskozite de Newtonian viskozite olup görünür viskozite olarak adlandırılmaktadır (η_g). Gerçek viskozite değerinin elde edilmesi için görünür kayma hızının Rabinowitsch yaklaşımı (Eş. 6.3) ile düzeltilmesi gerekmektedir. Rabinowitch yaklaşımı, duvardaki kayma hızının herhangi bir hız profili gerekmeksizin hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, Rabinowitch yaklaşımı, Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanların kayma hızları arasındaki farkı da göstermektedir. Düzeltilen kayma hızı ($\dot{\gamma}_d$) Eş. 6.4'te yerine yazılarak düzeltilmiş gerçek viskozite (η_d) elde edilmiştir (Uluer 2008, Carreau ve diğerleri 1997: 40).

$$\dot{\gamma}_g = \frac{4 Q}{\pi R^3} \quad (6.1)$$

$$\tau = \frac{\Delta p R}{2L} \quad (6.2)$$

$$\dot{\gamma}_d = \dot{\gamma}_g \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad (6.3)$$

$$\eta_d = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_d} \quad (6.4)$$

Burada,

$\dot{\gamma}_g$: Kayma hızı

R : Nozul yarıçapı, mm

L : Nozul uzunluğuna, mm

τ : Kayma gerilmesi

Δp : Kılcal kanal boyunca basınç düşmesi

Q : Hacimsel debi

$\dot{\gamma}_d$: Düzeltilmiş kayma hızı

η_d : Düzeltilmiş viskozite, Pa.s

Akışkanın Newtonian özellikte olup olmadığına akış davranış indeksine bakılarak karar verilmektedir. Akış davranış indeksi akış eğrisinin (logaritmik olarak çizilerek doğrusallaştırılan akış eğrisinin) eğimi olup “ n ” simgesi ile gösterilmektedir. Newtonian akış özelliğine sahip olan akışkanlar için $n = 1$ dir. Newtonian olmayan akışkanlar için $n \neq 1$ ’ dir. Newtonian olmayan akışkanlarda eğer $n < 1$ ise kayma incelmesi (viskozitenin azalması), $n > 1$ ise kayma kalınlaşması (viskozitenin artması) davranışı sergileniyor anlamına gelmektedir (Uluer 2008, Carreau ve diğerleri 1997: 45).

6.5. Toz Enjeksiyon Kalıplama

TEK aşamasında Metal Powder Industries Federation tarafından belirlenen ölçülerde çekme dayanımı test numuneleri üretilmiştir (MPFI Standart 50 1992) (Resim 6.4). Numunelerin kalıplanmasında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan ARBURG Allrounder 220S marka toz enjeksiyon pres tezgahı kullanılmıştır. Kullanılan Toz Enjeksiyon Tezgahının teknik özellikleri Çizelge 6.4’de verilmiştir.



Resim 6.4. Çekme dayanımı test numunesi kalıbı

Çizelge 6.4. Arburg Allrounder 220S enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hidrolik Yağ (l)	120
Makine net ağırlığı (kg)	1900
Mengene kilitleme kuvveti (KN)	250
Mengene kapama kuvveti (KN)	20
Mengene açılma kuvveti (KN)	14
Maksimum mengene açılma mesafesi (mm)	275
Minimum mengene kapanma mesafesi (mm)	150
Mengene ebatları (mm)	400x400
Kolon genişlikleri (mm)	221x211
Hareketli mengene taşıma kapasitesi (kg)	300
Hidrolik pompa motoru (kW)	5,5
Vida uzunluğu (L/D)	24,5
Vida Çapı (mm)	18
Maksimum Enjeksiyon basıncı (bar)	2500
Maksimum vida kursu (mm)	80
Maksimum Baskı hacmi (cm ³)	20
Maksimum enjeksiyon ağırlığı (g/PS)	17
Maksimum vida Torku (Nm)	147
Vida dairesel hızı (m/d)	27
Silindir ısıtma (W)	1250+2x3
Besleme hunisi kapasitesi (l)	25

6.5.1. Kalıp şartlandırıcı

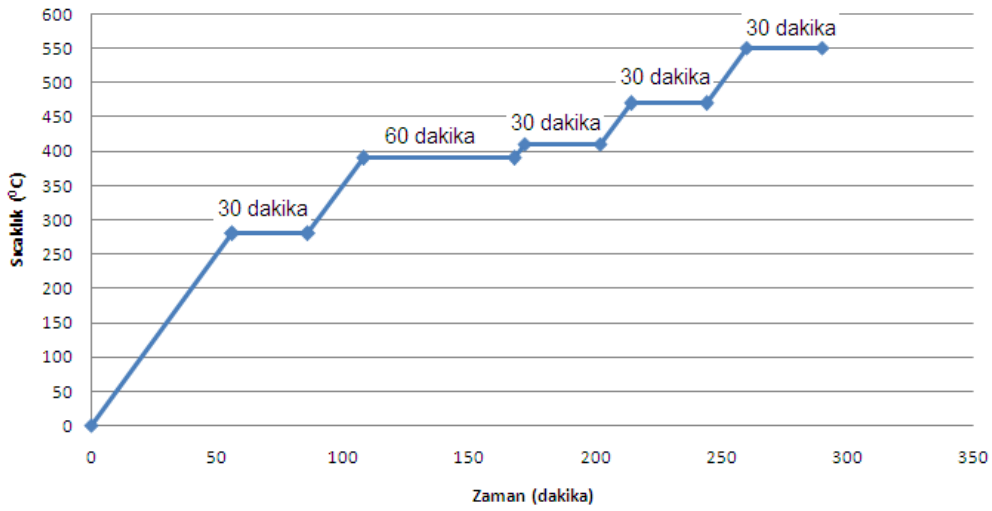
TEK esnasında kalıbın baskı süresince sabit sıcaklığı koruyabilmesi için TOOL-TEMP TT-157 E Marka kalıp şartlandırıcı kullanılmıştır. Kullanılan kalıp şartlandırıcısının teknik özellikleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kalıp şartlandırıcının özellikleri

Model	TT-157 E
Isıtma aralığı (°C)	Su ile en çok 90, Yağ ile en çok 150
Isıtma kapasitesi (kW)	Su ile 9 , Yağ ile 3-9
Pompa gücü (kW)	9
Basınç (bar)	4
Debi(l/min)	75
Depo (l)	6

6.6. Bağlayıcı Giderme İşlemi

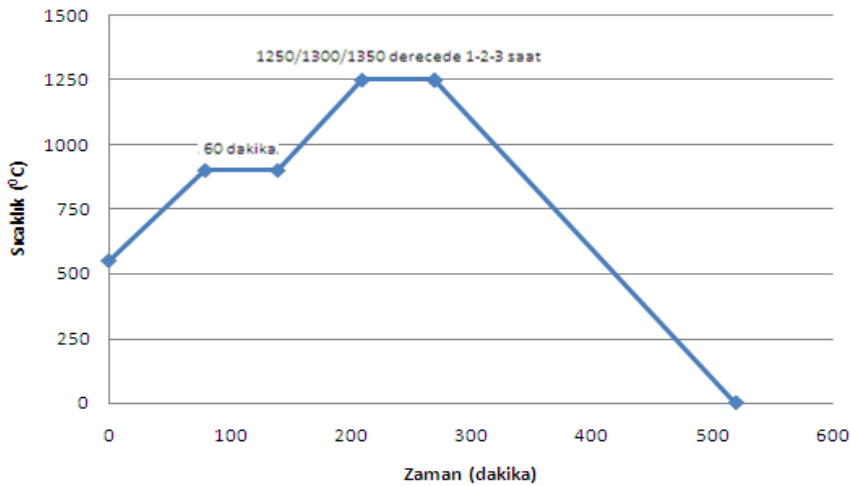
Besleme stoklarına kimyasal ve ısıl olmak üzere iki bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Numunelere kimyasal bağlayıcı giderme işlemi uygulanmasının amacı düşük erime noktasına sahip parafin ve stearik asiti kimyasal içerisinde yavaş bir şekilde çözerek gözenekli bir yapı elde etmektir. Numunelerdeki gözenekli yapı sayesinde ısıl bağlayıcı giderme aşamasında kemik bağlayıcının numune içerisinden çatlama ve çarpılmalara neden olmadan ayrılmasını sağlamaktır. Kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında numuneler Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan etüv fırında yüksek saflıktaki Heptan da 60 °C de 20 saat bekletilmişlerdir. Bu aşamadan sonra numuneler 60 °C 12 saat kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemi ise Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan atmosfer kontrollü sinterleme fırınında yüksek saflıktaki (%99,999) argon gazı ortamında gerçekleştirilmiştir. Isıl bağlayıcı giderme deneyleri 1 – 3 – 5 °C/min olmak üzere üç farklı ısıtma hızında yapılmıştır. Şekil 6.1'de 5 °C/min ısıtma hızında yapılan ısıl bağlayıcı giderme aşaması adımları gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 5 °C/min ısıtma hız ile yapılan ısıl bağlayıcı giderme aşamaları

6.7. Sinterleme İşlemi

Sinterleme işlemi, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan atmosfer kontrollü MTI marka sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir. Alümina sinterleme altlıklar üzerine numuneler yerleştirilmeden önce altlık üzerine alümina tozları serpilmiştir. Ön sinterleme (ısıl bağlayıcı giderme) ve sinterleme işlemi peş peşe yapılmıştır. Ön sinterleme tamamlandıktan sonra 3 °C/min ısıtma hızıyla 1250 – 1300 - 1350 °C sıcaklıklarına çıkılmış ve 1, 2, 3 saat beklenilerek sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işleminden sonra fırın 5°C/min soğutma hızında soğutulmuştur (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Sinterleme aşaması

6.8. Sinterlenmiş Numunelerin Boyutsal Çekme - Yoğunluk Oranı Ölçümü

TEK yöntemi ile üretilmiş ve sinterlenmiş numunelerin boyutsal çekme, yoğunluk ve % gözenek oranı belirlenmiştir. Numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Sinterlenmiş numunelerin boyutsal çekme ve yoğunluk ölçümleri TS EN 623-2 ve TS 2305 standartları esas alınarak belirlenmiştir (TS EN 1999, TS 2305 1976). Gözeneklere suyun girmemesi için numune yüzeyi ağırlıkça %5 parafin ve %95 kloroform çözeltisi içerisine daldırılarak kaplanmıştır (Urtekin 2008). Numunelerin yoğunluk hesapları Eş. 6.5 ve 6.6'ya göre yapılmıştır.

$$d: \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times \rho_w \quad (6.5)$$

d: Yoğunluk (g/cm³)

m₁: Kuru deney numunesinin havadaki kütlesi

m₂: Numunenin çözelti ile kapandıktan sonraki kütlesi

m₃: Numunenin sudaki kütlesi

ρ_w : Saf suyun yoğunluğu, 0,997 g/cm³ olarak alınmıştır.

$$\% \text{ Teorik Yoğunluk} : \frac{\text{Sinterlenmiş parçanın yoğunluğu}}{\text{Hadde malzeme yoğunluğu}} \times 100 \quad (6.6)$$

Çalışmada sinterlenmiş parçanın boşluk oranını Eş. 6.7'ye göre belirlenmiştir.

$$\% \text{ Boşluk oranı} : 100 - \left[\left(\frac{\text{Sinterlenmiş parçanın yoğunluğu}}{\text{Hadde malzeme yoğunluğu}} \right) \times 100 \right] \quad (6.7)$$

Numunelerin boyutsal çekme (% çekme) oranları sinterleme öncesi ve sonrası 0,01 hassasiyetteki mikrometre ile yapılan ölçümler sonucunda hesaplanmıştır. Hesaplama Eş. 6.8'e göre yapılmıştır.

$$\% \text{ Çekme} : \frac{b-a}{b} \times 100 \quad (6.8)$$

b : Sinterleme öncesi ölçülen numune boyu

a : Sinterleme sonrası ölçülen numune boyu

6.9. Çekme Deneyleri

Deneyler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan maksimum 50 kN yükleme kapasiteli Instron marka bilgisayar kontrollü çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri kafa hızı 1 mm/min sabit tutularak TS EN ISO 6892-1 standardına göre yapılmıştır.

6.10. Mikroyapı Analizleri

Çalışmada numunelerin mikroyapı analizleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan LEICA marka ışık mikroskopu ve JEOL marka JSM-6060LV Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) cihazlarında yapılmıştır. Mikroyapı analizleri aşamasında numuneler 400 ila 1200 numaralı zımparalar ile sırasıyla parlatılmış ve ardından Kroll çözeltisi (2 ml HF (Hidroflorik asit)+ 10 ml HNO₃ (Nitrik Asit)+ 88 ml saf su) ile dağlanmıştır.

6.11. Termal Analizler (DTA-TG)

Reoloji ve sinterleme deneylerinin hangi parametrelerde yapılması gerektiğini belirleyebilmek amacı ile geliştirilen bağlayıcı sistemin ve hazırlanan besleme stoklarının termal analizleri yapılmıştır. Geliştirilen bağlayıcı sistemin termal analizleri Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Süper İletken laboratuvarında bulunan Exstar S11 7300 markalı cihazda yapılmıştır. Besleme stoklarının termal analizleri ODTÜ Merkez laboratuvarında yapılmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Tozların Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında, implant malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilen, Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşımları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların TS EN ISO 3923-1 standardına göre yapılan deneyler sonucunda görünür yoğunlukları, ASTM B-527 standardına göre yapılan deneyler sonucunda vurgu yoğunlukları, ASTM B-213 standardına göre yapılan deneyler sonucunda shev açıları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Tozların genel özellikleri

Toz Cinsi	Yoğunluk (g/cm ³)	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)	Vurgu Yoğunluğu (g/cm ³)	Shev Açısı (°)	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)
Ti-6Al-4V	4,42	1,651	2,79	57° ±1°	3,97	11,34	21,50
Ti-6Al-7Nb	4,52	1,708	2,916	58° ±1°	7,31	13,45	20,03

Çalışmada kullanılan tozlar küresel şekilli ve D₅₀ de 15 µm altı boyuta sahiptir. Belirtilen tüm bu özelliklerin tozların enjeksiyon işlemi için uygun olduğunu belirtmektedir. TEK’de kullanılacak tozların Shev açısının 55° den yüksek olması istenir (German ve Bose 1997:30, Loh ve diğerleri 2007). Çalışmada kullanılan tozlarında shev açılarının 55° yüksek olması tozların enjeksiyon için uygun olduğunu belirten bir diğer parametredir.

7.2. Besleme Stokları

TEK’de kritik toz yükleme genellikle toz vurgu yoğunluğunun %10 - %20 daha fazlasıdır. Optimum yükleme, kritik yüklemeden %2 - %5 daha azdır (German 1990:60). Bu oranlar reolojisi hakkında hiçbir bilgiye sahip olunmayan besleme

stokları için bir ilk tahmin yapılmasını sağlar. Aslında kritik toz yükleme ve optimum yükleme oranları tozların boyutuna, dağılımına, bağlayıcı sisteme, toz ile bağlayıcının homojen karışımı gibi faktörlere bağlı olarak değişirler. Bu bağlamda çalışmada kritik toz yüklemeyi tespit edebilmek için toz vurgu yoğunluklarının %20 fazlası çerçevesinde hacimsel olarak % 57'den % 71'e kadar farklı oranlarda toz içeren besleme stokları hazırlanmıştır (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. Deneyler için hazırlanan besleme stokları

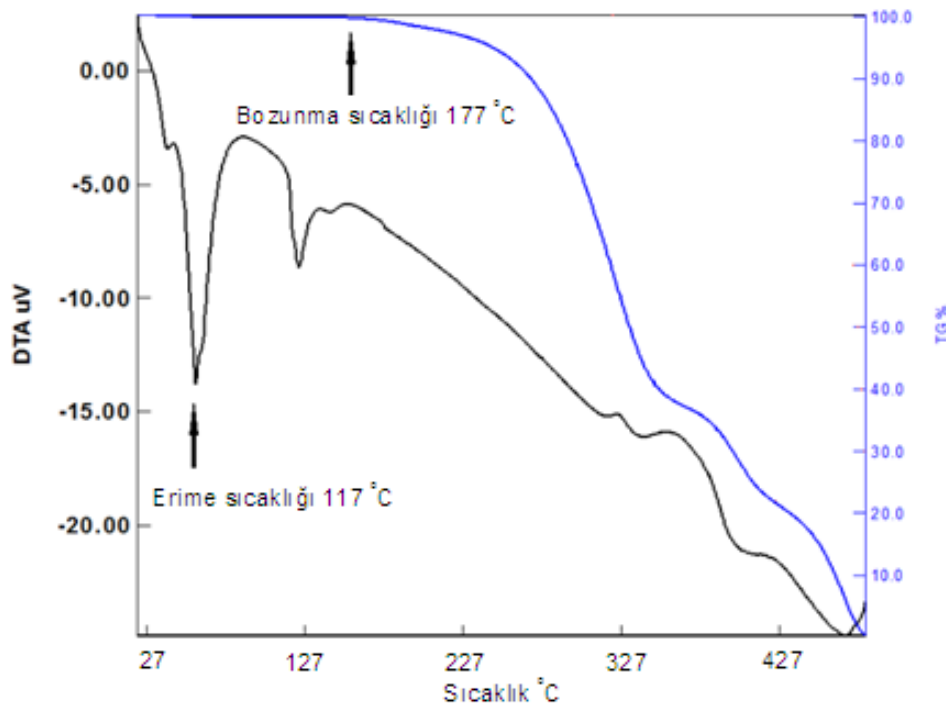
Hazırlanan Besleme Stokları	Hacimce Yüklenen % Toz Miktarı
Ti-6Al-4V + Bağlayıcı	57-59-61-63-65-67
Ti-6Al-7Nb + Bağlayıcı	57-59-61-63-65-67-69-71

TEK'de kritik toz yükleme değeri formüller (Maron ve Pierce 1956) ile hesaplanabildiği gibi EAI değeri ile de belirlenebilmektedir (German ve Bose 1997:37). Hazırlanan tüm besleme stokları ile 0,298-0,524-0,689 MPa basınç altında kılcal reometrede deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb tozlarının bağlayıcı sistem ile karıştırılması sonucu hazırlanan besleme stoklarının kritik toz yükleme kapasiteleri belirlenmiştir.

7.3. Reoloji Deneyleri

Kalıplamada kullanılacak besleme stoklarının hangi sıcaklıklar arasında reolojik karakterizasyonlarının incelenmesi gerektiğini belirlemek için bağlayıcı sistemin termogravimetrik analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda bağlayıcı sistemin, birçok bileşenden meydana gelmesinden dolayı farklı bozulma sıcaklıkları elde edilmiştir. Şekil 7.1'de Bağlayıcı sistemin (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) termogravimetrik analiz sonucu görülmektedir. TGA eğrisine göre bağlayıcı sistem, 177 °C de bozulmaya başlamış ve 507 °C de bozulma sonlanmıştır. Bozulma sıcaklıklarının başlangıçları 267 °C, 347 °C, 377 °C, 407 °C, 477 °C'dir. DTA eğrisine göre bağlayıcı sistem, 57 °C ve 117 °C'de endotermik (erime) piki yapmıştır. DTG eğrisine göre en çok kütle kaybı 317 °C'de olmuştur. Bağlayıcı

sisteminin TGA analizi sonucu en yüksek erime sıcaklığı 117 °C ve bozunmaya başladığı sıcaklık 177 °C olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda bağlayıcı sistem ile hazırlanan besleme stoklarının reoloji deneylerinin 140 – 150 - 160 °C’lerde yapılabileceği ortaya konmuştur. Fakat bu değerlerin 10 °C altına ve üstüne inilip çıkılarak reoloji deneyleri 130 - 140 – 150 – 160 - 170 °C’lerde yapılmıştır.

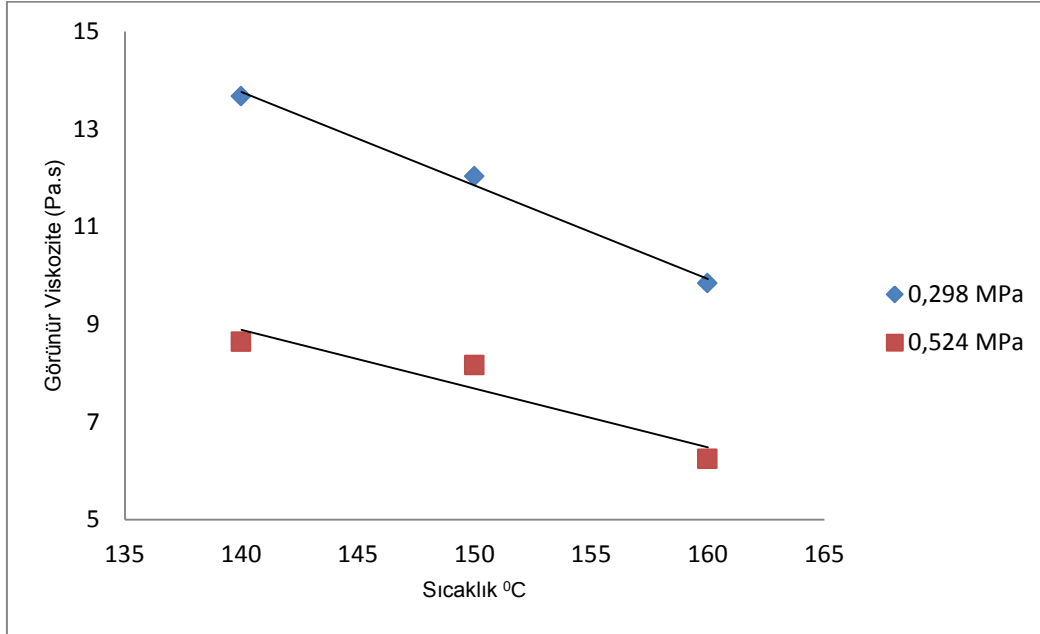


Şekil 7.1. Bağlayıcı sistemin termogravimetrik analizi

Çalışmada ilk olarak, hazırlanan bağlayıcı sistemin viskoziteleri tespit edilmiştir. Yapılan reoloji deneyleri sonucunda sıcaklığın artması ile bağlayıcı sistemin viskozitesinin azalma gösterdiği, bu kapsamda bağlayıcı sistemin viskozitesinin 20 Pa.s nin altında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.2).

Liu ve diğerleri (2001) bağlayıcı sistemde kullanılan yüksek yoğunluklu polietilenin (YYPE) miktarının artması ile bağlayıcının viskozitesinin yükseleceğini belirtmişlerdir. Geliştirilen bağlayıcı sistemde ise az miktarda (ağırlıkça % 15) YYS kullanılması bağlayıcının viskozitesinin düşük çıkmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca geliştirilen bağlayıcı sistemin viskozitesinin düşük çıkmasında akışkanlığı arttıran PEG 20,000 nin etkili olduğu düşünülmektedir.

German ve Bose (1997:42) TEK'de saf bağlayıcının viskozitesinin 10 Pa.s değerinde olabileceğini belirtmişlerdir. Bundan dolayı hazırlanan bağlayıcının viskozite değerinin literatür ile uyumlu oluşu sonucuna varılmıştır.



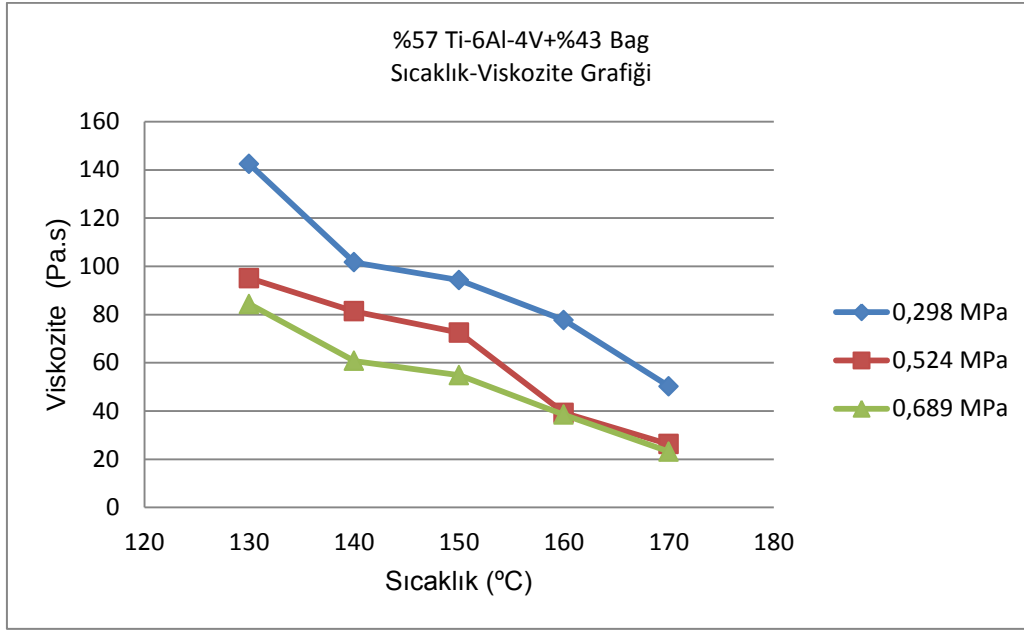
Şekil 7.2. Bağlayıcı sisteminin sıcaklık - görünür viskozite grafiği

7.3.1. Ti-6Al-4V besleme stoklarının reoloji deneyleri

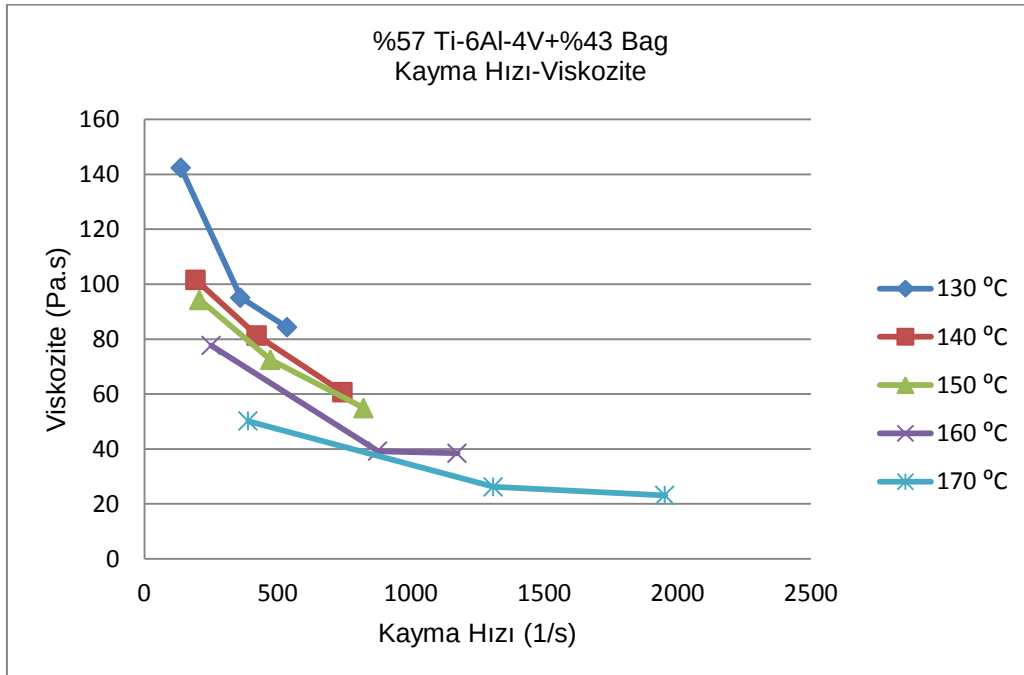
Şekil 7.3 - 7.6'da Ti-6Al-4V + Bağlayıcıdan (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) hazırlanmış farklı toz yüklemesine sahip besleme stoklarının farklı sıcaklık ve kayma hızlarında elde edilen viskozite değerleri verilmiştir.

TEK da besleme stoklarının kayma hızı artar iken viskozitenin azaldığı psedo-plastik akış davranışı göstermesi istenir. Çünkü bu akış tipi kalıplama sırasındaki hataları en aza indirir.

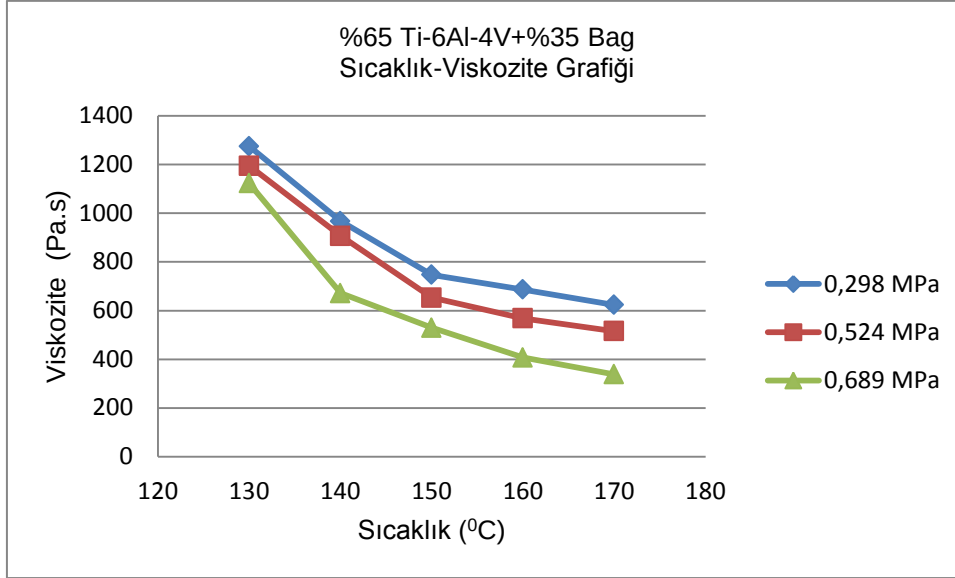
Hazırlanan besleme stoklarının hepsinde 130 °C'de yüksek viskozite değeri elde edilmiştir. 170 °C'de ise besleme stoklarında arzu edilen akış elde edilememiştir.



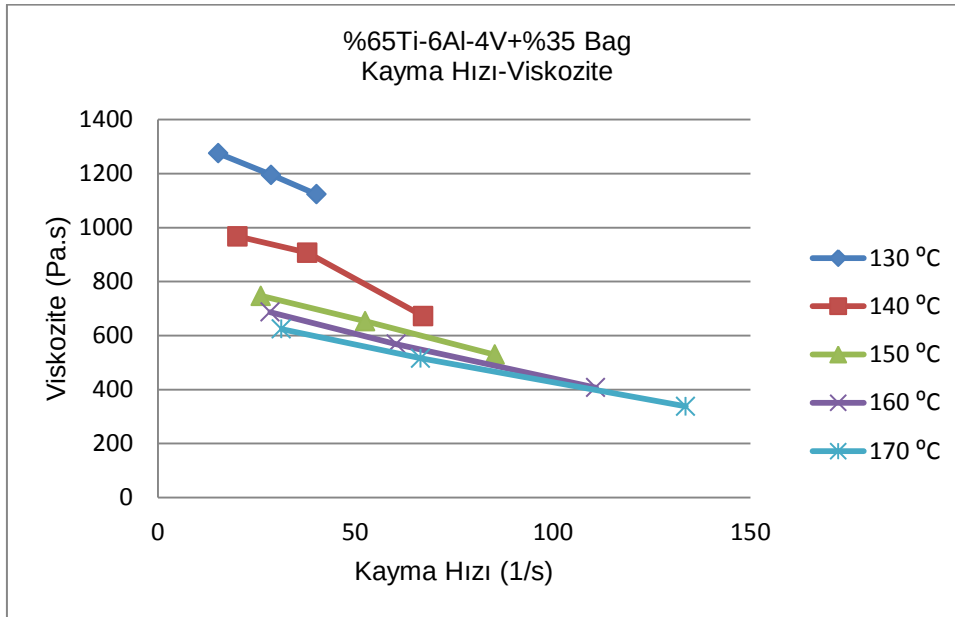
Şekil 7.3. Hacimce %57 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık - viskozite grafiği



Şekil 7.4. Hacimce %57 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı - viskozite grafiği



Şekil 7.5. Hacimce %65 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık - viskozite grafiği



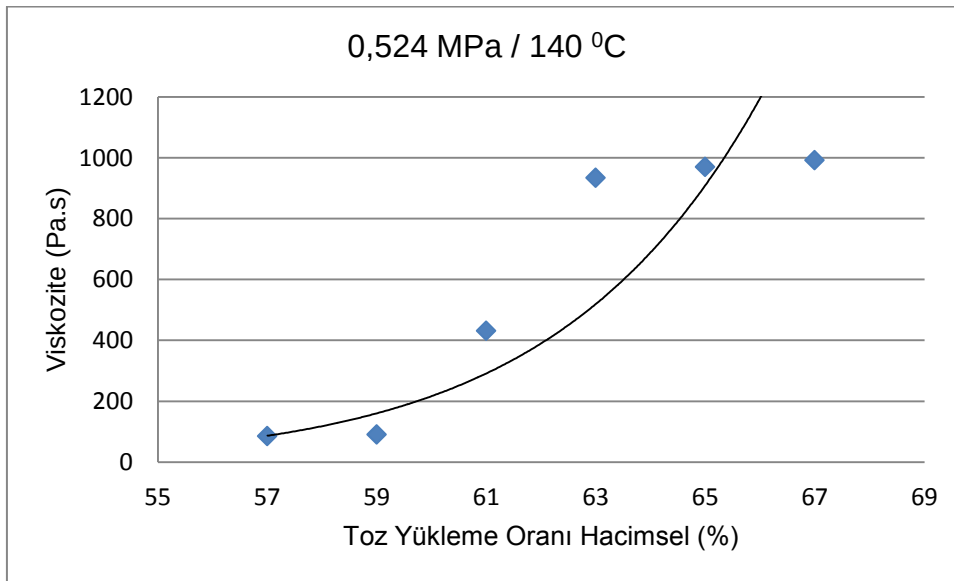
Şekil 7.6. Hacimce %65 (Ti-6Al-4V+Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı - viskozite grafiği

Kayma hızına karşı viskozitenin hassasiyetini n değeri belirler. n değeri çok düşük olur ise kayma hızına karşı viskozite çok hassas olur. n değeri logaritmik kayma hızı - kayma gerilmesi grafiğinin eğiminden elde edilen bir değerdir (Sotomayor ve diğerleri 2010). Çizelge 7.3 de kritik ve optimum toz yüklemedeki Ti-6Al-4V besleme stoklarının n değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.3. Kritik ve optimum toz yüklemedeki Ti-6Al-4V besleme stoklarının “ n ” değerleri

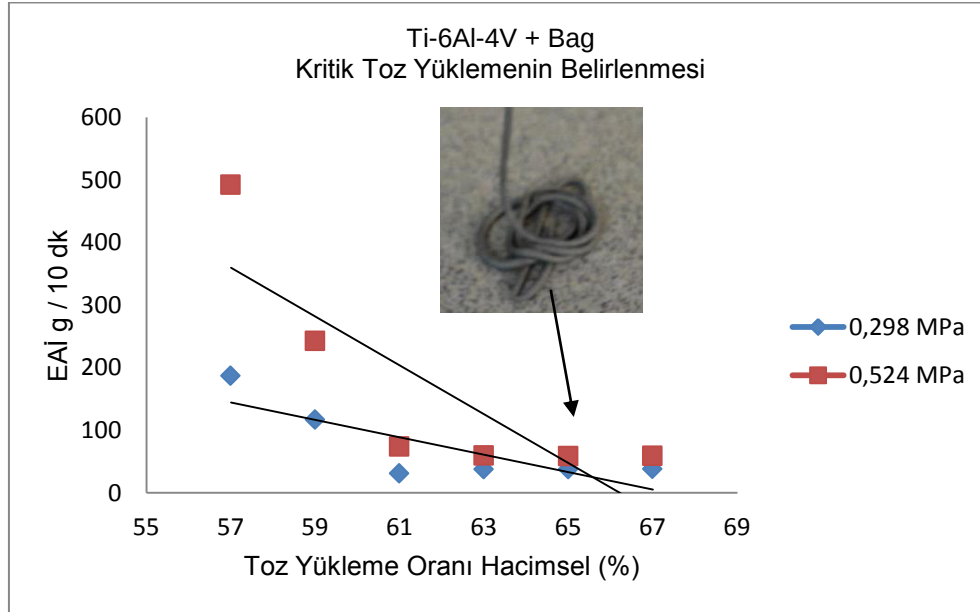
Toz yükleme oranı	Sıcaklık (°C)	Akış Davranış İndeksi (n)
65	130	0,872
	140	0,699
	150	0,715
	160	0,621
	170	0,579
67	130	0,958
	140	0,7
	150	0,68
	160	0,596
	170	0,603

Şekil 7.7’de Ti-6Al-4V alaşım tozundan hazırlanan besleme stoklarının toz yükleme oranının (140 °C de - 0,524 MPa yüklemede) viskoziteye etkileri görülmektedir. Deneyler sonucunda toz yükleme oranına bağlı olarak viskozite değerinde artış tespit edilmiştir % 65 hacimsel toz yüklemede viskozitenin 1000 Pa.s’nin altında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.7. Toz Yükleme oranının viskoziteye etkisi

Ti-6Al-4V hazırlanan besleme stokunun optimum toz yükleme değerini belirlemek için besleme stokunun EAI değerleri kullanılmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.8. Ti-6Al-4V + Bağlayıcı (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) besleme stokunun optimum toz yükleme oranı

Yapılan deneyler sonucunda Ti-6Al-4V alaşım tozundan hazırlanan besleme stokunun kritik toz taşıma kapasitesinin hacimce %67, optimum toz yükleme oranı ise %65 olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda toz yükleme oranının ve sıcaklığın viskoziteyi yakından etkileyen parametreler olduğu belirlenerek Çizelge 7.4'teki şu sonuçlar elde edilmiştir.

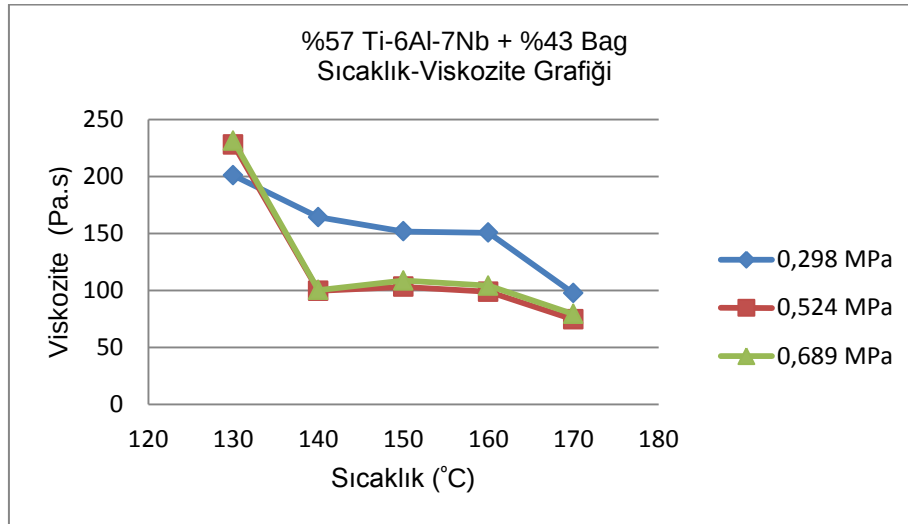
Çizelge 7.4. Ti-6Al-4V besleme stokunun optimum ve kritik yüklemelerdeki reoloji verileri

Ti-6Al-4V	Hacimsel Toz Yükleme Oranı					
	% 65			% 67		
	140 °C	150 °C	160 °C	140 °C	150 °C	160 °C
Viskozite (Pa.s) (0,524 MPa için)	906,761	653,157	568,222	1017,141	658,941	576,321
Akış Davranış İndeksi (n)	0,699	0,715	0,621	0,7	0,68	0,596

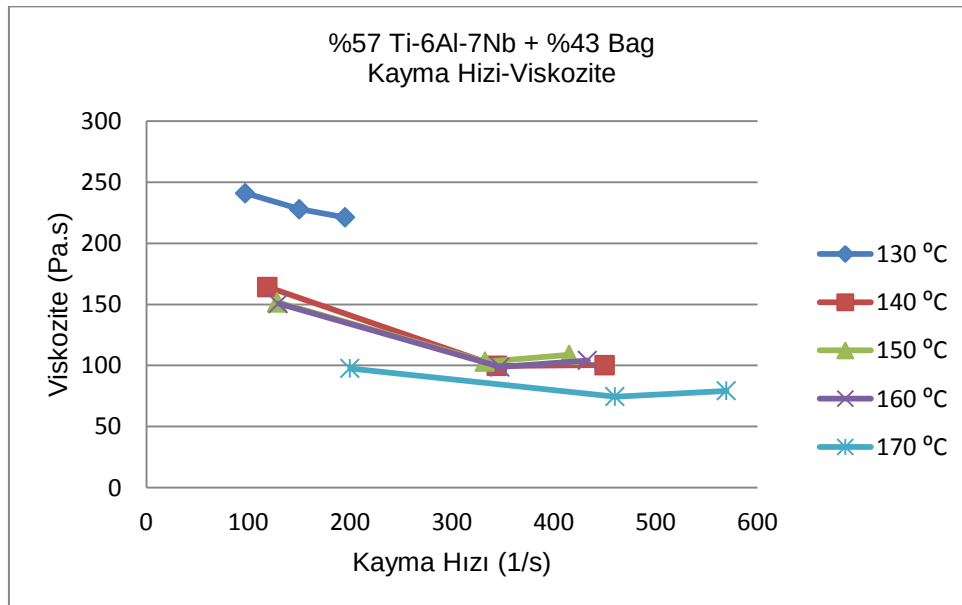
7.3.2. Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının reoloji deneyleri

Şekil 7.9 - 7.12'de Ti-6Al-7Nb + Bağlayıcıdan (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) hazırlanmış farklı toz yüklemesine sahip besleme stoklarının farklı sıcaklık ve kayma hızlarında elde edilen viskozite değerleri verilmiştir.

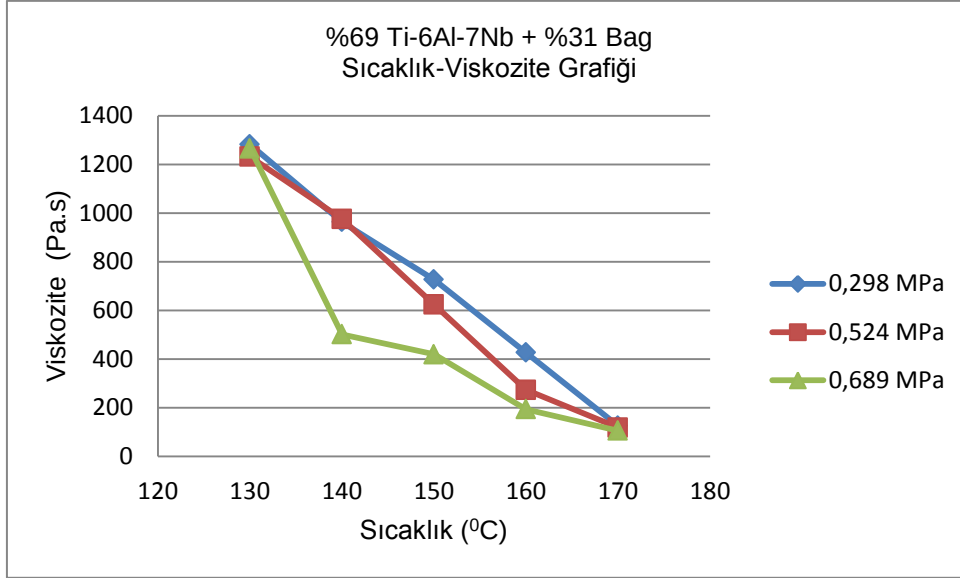
Ti-6Al-7Nb besleme stoklarından hazırlanan besleme stoklarında psedo-plastik akış tipi tespit edilmiştir.



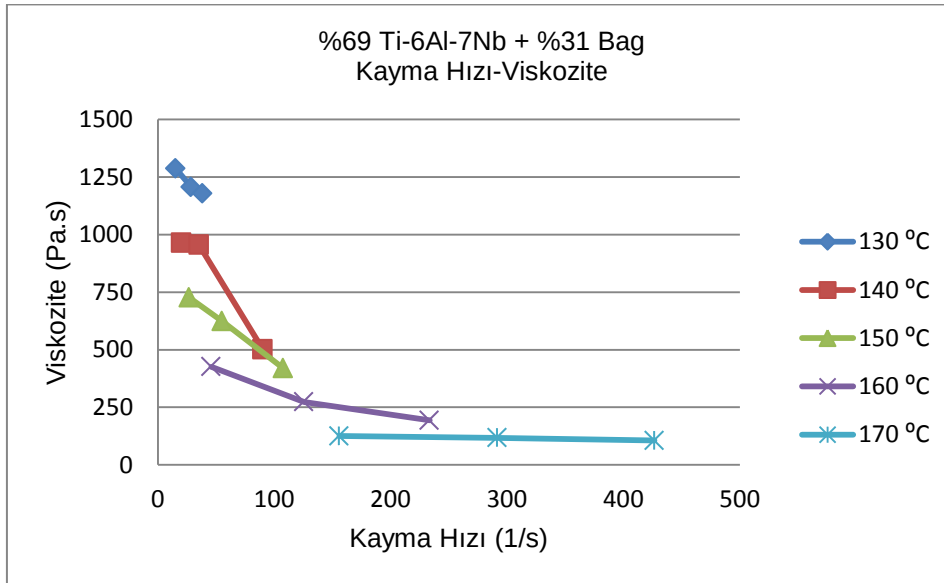
Şekil 7.9. Hacimce % 57 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık-viskozite grafiği



Şekil 7.10. Hacimce % 57 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı-viskozite grafiği



Şekil 7.11. Hacimce % 69 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun sıcaklık-viskozite grafiği



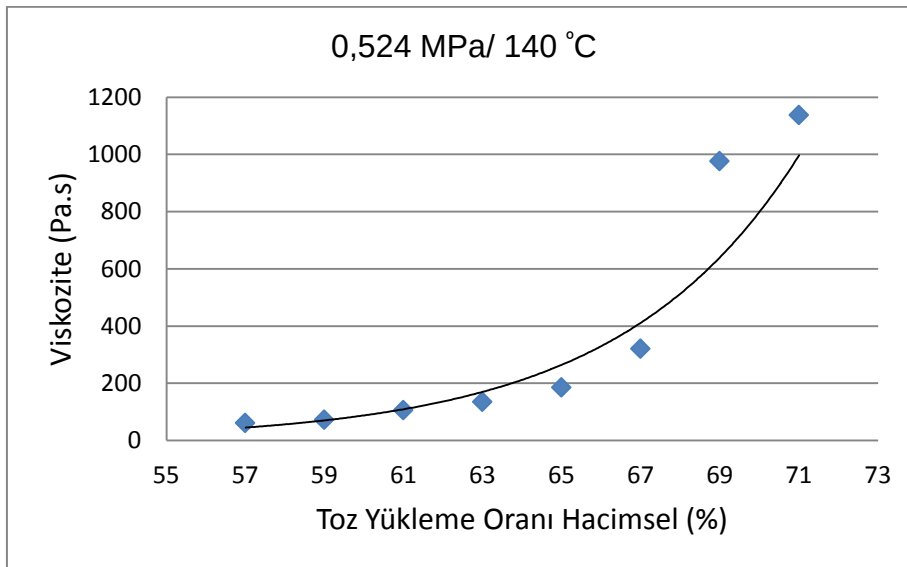
Şekil 7.12. Hacimce % 69 (Ti-6Al-7Nb + Bag) toz içeren besleme stokunun kayma hızı-viskozite grafiği

n 'nin değerinin düşük olması kayma hassasiyetini artırır ve böylece kayma hızının artması ile viskozite hızlıca azalır (Aggarwal ve diğerleri 2006). Deneyler sonucunda Ti-6Al-7Nb besleme stokunun kritik ve optimum toz yüklemedeki " n " değerleri Çizelge 7.5 de verilmiştir.

Çizelge 7.5. Kritik ve optimum toz yüklemedeki Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının “ n ” değerleri

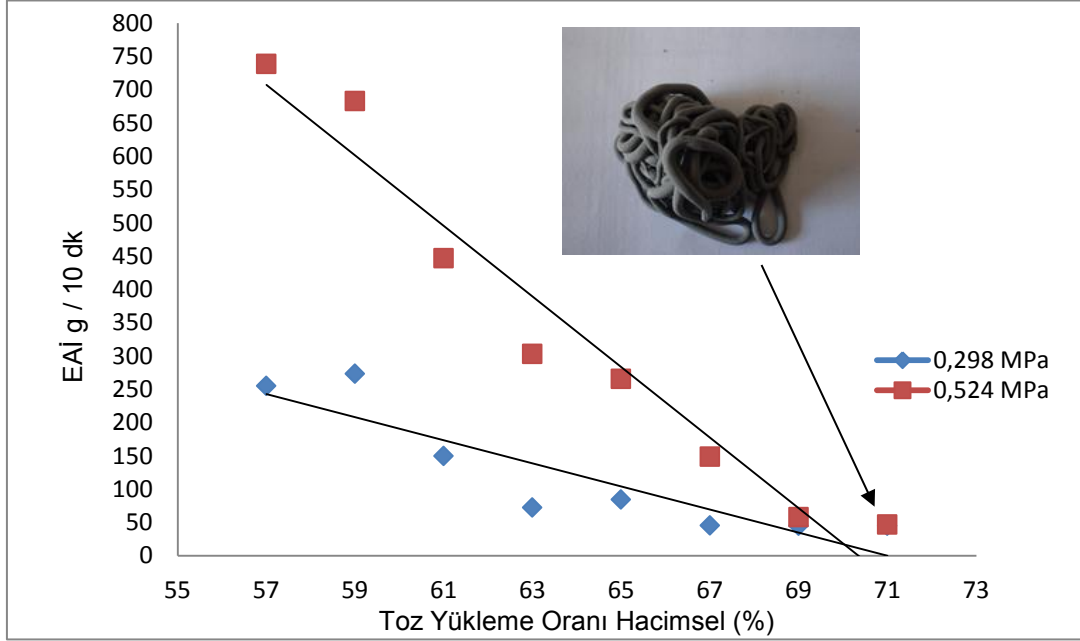
Toz yükleme oranı	Sıcaklık (°C)	Akış Davranış İndeksi (n)
69	130	0,978
	140	0,533
	150	0,606
	160	0,518
	170	0,839
71	130	1,369
	140	0,69
	150	0,67
	160	0,606
	170	0,474

Şekil 7.13’de Ti-6Al-7Nb alaşım tozundan hazırlanan besleme stoklarının toz yükleme oranının (140 °C de - 0,524 MPa yüklemede) viskoziteye etkileri görülmektedir. Deneyler sonucunda toz yükleme oranına bağlı olarak viskozite değerinde artış tespit edilmiştir % 69 hacimsel toz yüklemede viskozitenin 1000 Pa.s civarında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.13. Toz yükleme oranının viskoziteye etkisi

Ti-6Al-7Nb'den hazırlanan besleme stokunun optimum toz yükleme değerini belirlemek için besleme stokunun EAİ değerleri kullanılmıştır (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. Ti-6Al-7Nb+ Bağlayıcı (YYPE, PP, PEG 20 000, Parafin, SA) besleme stokunun optimum toz yükleme oranı

Yapılan deneyler sonucunda Ti-6Al-7Nb alaşım tozundan hazırlanan besleme stokunun kritik toz yükleme oranı hacimce %71, optimum toz yükleme oranı ise %69 olduğu tespit edilmiştir. Optimum ve kritik toz yükleme değerlerindeki besleme stoklarının reoloji çalışmaları sonucu Çizelge 7.6'daki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.6. Ti-6Al-7Nb besleme stokunun optimum ve kritik yüklemelerdeki reoloji verileri

Ti-6Al-7Nb	Hacimsel Toz Yükleme Oranı					
	% 69			% 71		
	140 °C	150 °C	160 °C	140 °C	150 °C	160 °C
Viskozite (Pa.s) (0,524 MPa için)	975,817	624,095	273,283	1036,273	769,482	512,278
Akış Davranış İndeksi (n)	0,533	0,606	0,518	0,69	0,67	0,606

7.3.3. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarına sıcaklığın etkisi

TEK’de kullanılan besleme stoklarının diğer önemli bir özelliği de sıcaklığa bağlı viskozitesidir. Viskozite sıcaklık değişimine çok duyarlı olduğundan kalıplama esnasında en küçük bir sıcaklık dalgalanması ani viskozite değişimine neden olur. Bu durum kalıplanmış parçada aşırı gerginliğe neden olabilir bunun sonucunda da parçada çatlaklar ve bozulmalar görülebilir. Buna ek olarak kalıp boşluğuna küçük bir basınç iletimi viskozitenin sıcaklığa bağımlılığını güçlendirir. Buda çekme ile ilgili kusurların oluşumunu teşvik eder. Bu nedenle sıcaklığa bağlı viskoziteyi değerlendirmek önemlidir (German ve Bose 1997:32, Khakbiz ve diğerleri 2005).

Besleme stoku, mutlak sıcaklık (T) ile katlanarak değişen bir viskoziteye sahiptir (German ve Bose 1997:34, Li ve diğerleri 2007). Bu yüzden besleme stokunun viskozitesine sıcaklığın etkisi Eş.6.8’deki formül ile belirlenir:

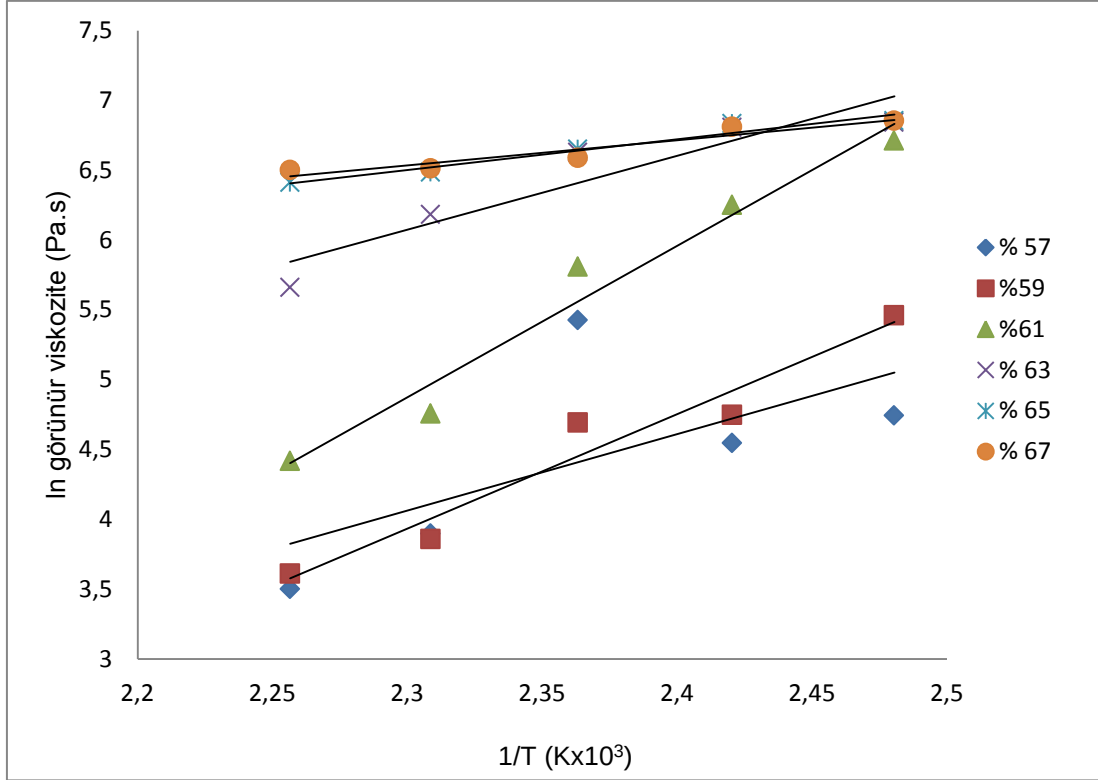
$$\log \eta = E_a/R(1/T) \quad (6.8)$$

Burada;

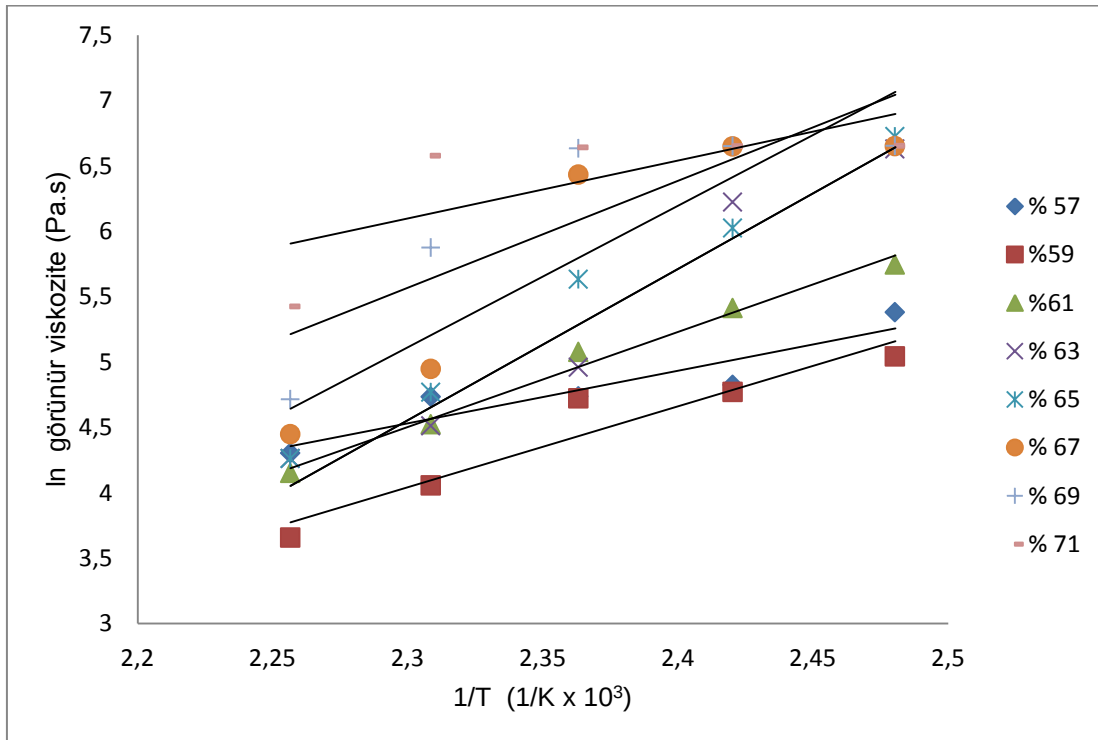
η viskozite, E_a sıcaklığa bağlı viskozite için akış aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ($R:8,31 \text{ J/molK}$), T mutlak sıcaklıktır.

Akış aktivasyon enerjisi düşük olur ise besleme stoku viskozitesi kalıplama esnasındaki sıcaklık değişimlerinden çok etkilenmez. Bunun sonucu olarak da kalıplama anındaki ısı dalgalanmaları besleme stokunun viskozitesini etkilemez. Ayrıca kalıplama esnasında besleme stoku viskozitesinin değişimi sonucu parçada ortaya çıkan çatlama ve deformasyon ortadan kalkmış olur (Li ve diğerleri 2007).

Besleme stoklarının akış aktivasyon enerjileri deneysel olarak da belirlenebilmektedir. Bu çalışmada besleme stoklarının aktivasyon enerjileri akış verilerinden hazırlanan $\ln$ görünür viskozite - $1/T$ ($1/K \times 10^3$) diyagramlarındaki eğrinin eğiminden faydalanılarak Arrhenius denkleminde (Fine ve Beall 1990:1006) elde edilmiştir (Şekil 7.15 - Şekil 7.16).



Şekil 7.15. Farklı toz oranına sahip Ti-6Al-4V besleme stokunun ln görünür viskozite - 1/T grafiği (0,524 MPa yüklemede)



Şekil 7.16. Farklı toz oranına sahip Ti-6Al-7Nb besleme stokunun ln görünür viskozite - 1/T grafiği (0,524 MPa yüklemede)

Aynı bağlayıcı ve farklı tozlar (Ti-6Al-4V ile Ti-6Al-7Nb) ile hazırlanan besleme stoklarının aktivasyon enerjileri kendi aralarında karşılaştırıldığında ilk olarak besleme stoku içindeki toz oranı arttıkça aktivasyon enerjilerinin arttığı daha sonra azaldığı tespit edilmiştir (Çizelge 7.7). Bu durumun besleme stoklarının ısı iletkenliği ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Ahn ve diğerleri 2009).

Çizelge 7.7. Besleme stoklarının akış aktivasyon enerjileri (0,524 MPa yüklemde)

Besleme Stoku Cinsi	Akış Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)							
	Ea ₅₇	Ea ₅₉	Ea ₆₁	Ea ₆₃	Ea ₆₅	Ea ₆₇	Ea ₆₉	Ea ₇₁
Ti-6Al-4V	45,53	68,15	90,17	43,95	<u>18,28</u>	14,93	-	-
Ti-6Al-7Nb	33,48	51,45	60,36	96,11	91,80	89,95	<u>67,97</u>	36,75

Sıcaklık hassasiyeti bakımından besleme stokundaki toz oranı artışı besleme stoklarının reolojik özellikleri için yararlıdır. Sıcaklıktaki dalgalanma ile besleme stokunun viskozitesinde meydana gelen değişim organik bağlayıcıların doğasından kaynaklanan bir davranıştır. Bağlayıcı sistemin içerisine karıştırılan toz oranı arttıkça viskozitenin sıcaklığa karşı hassasiyeti azalmaktadır. Buda yüksek toz yüklemeye sahip besleme stokları ile geniş sıcaklık aralığında enjeksiyon kalıplama yapılabilmesini sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda toz yükleme oranına bağlı olarak besleme stoklarının akış aktivasyon enerjileri değişiklik göstermektedir. TEK’de sorunsuz bir ürün elde etmek için maksimum toz oranında düşük akış aktivasyon enerjisi elde etmek önemlidir (Karataş ve diğerleri 2004, Sotomayor ve diğerleri 2010, Aggarwal ve diğerleri 2006, Li ve diğerleri 2007). Çizelge 7.7’de de görüldüğü gibi Ti-6Al-4V tozdan hazırlanan besleme stokunun akış aktivasyon enerjisi % 65 toz oranında 18,28 kJ/mol, Ti-6Al-7Nb tozdan hazırlanan besleme stokunun % 69 toz oranı için 67,97 kJ/mol’dür. Literatürde yapılan çalışmalara göre bağlayıcı sistemlerde kullanılan PEG’in molekül sayısı arttıkça besleme stokunun akış aktivasyon enerjisinin azaldığı ve geniş bir sıcaklık aralığında psedo-plastik akış davranışı sergilediği görülmüştür. Ayrıca molekül sayısı yüksek olan PEG’lerin düşük olanlara göre daha iyi yapışma sağladığı ve bunun sonucu olarak da daha mükemmel akış kararlılığı gösterdiği tespit edilmiştir (Yang ve diğerleri 2002).

Shibo ve diğerkleri (2006) gaz atomize Ti-6Al-4V tozu ve karmaşık şekilli Ti-6Al-4V tozu karışımı ile parafin mum, PEG 20,000, düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen ve stearik asit kullanarak hazırladıkları besleme stokunun akış aktivasyon enerjisini 27,15 kJ/mol olarak tespit etmişlerdir. Thavanayagam ve diğerkleri (2015) karmaşık şekilli Ti-6Al-4V alaşım tozu ile PEG 8,000, PVB (polyvinyl butyryl) ve stearik asitten meydana gelen bağlayıcı sistem ile karıştırarak hazırladıkları besleme stoklarında 14,8 kJ/mol akış aktivasyon enerjisi tespit etmişlerdir. Bu çalışmada Ti-6Al-4V tozu ile hazırlanan besleme stoklarında Çizelge 7.7’de verilen akış aktivasyon enerjisi değerkleri elde edilmiştir. Elde edilen değerkler Shibo ve Thavanayagam’ın yaptıkları çalışmalar ile karşılaştırıldığında aradaki farkın tozların ve bağlayıcının türlerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Aggarwal ve diğerkleri (2006) saf niyobyum (Nb7) tozunun ($D_{50} \approx 7\mu\text{m}$) toz enjeksiyon yöntemi ile kalıplanması için gerekli reolojik özellikleri araştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları bağlayıcı sistemi parafin mum, polipropilen, polietilen ve stearik asitten hazırlamışlardır. Çalışmalarında en yüksek toz yükleme değerkinde (hacimce % 59) besleme stoku için 32,83 kJ/mol akış aktivasyon enerjisi belirlemişlerdir. Çalışmamız da ise Ti-6Al-7Nb alaşım tozu kullanarak hazırlanan besleme stokları için en yüksek toz yükleme değerkinde (hacimce % 71) 36,75 kJ/mol akış aktivasyon enerjisi belirlemiştir. Daha yüksek toz oranında bu değerkın elde edilmesinin sebebi olarak kullanılan tozların tür ve boyutlarındaki farkın sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmamızda kullandığımız PEG’in daha yüksek toz oranlarına ulaşmamıza sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürde Ti-6Al-7Nb alaşım tozu kullanarak PEG esaslı bağlayıcı ile hazırlanmış besleme stoklarına yönelik çalışmaya rastlanamamıştır. Ancak elde edilen değerkler kendi arasında karşılaştırıldığında toz yükleme oranının artması ile akış aktivasyon enerjilerinin azaldığı belirlenmiş ve bu sonuçların kalıplama için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

7.3.4. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının kalıplanabilirlik indeksi

Kalıplanabilirlik besleme stokunun şekillendirilmesindeki kolaylığın ölçüsüdür (German 1990:229, German ve Bose 1997:148). TEK’de besleme stoklarının kalıplanabilirlik indeksi Eş.6.9’daki formül ile belirlenir (Edirisinghe ve Evans 1987, German 1990:233, Karataş 2004).

$$\alpha_{stv} = \frac{10^9}{\eta_0} \frac{\left| \frac{\partial \log \eta}{\partial \log \dot{\gamma}} \right|}{\left| \frac{\partial \log \eta}{\partial 1/T} \right|} \quad (6.9)$$

Formülde;

η viskozite, η_0 referans viskoziteyi, T sıcaklığı, $\dot{\gamma}$ kayma hızını ve α_{stv} kalıplama indeksini ifade eder. Formülü sadeleştirdiğimizde ise Eş.6.10’daki formülü elde ederiz (Aggarwal ve diğerleri 2006, Karataş 2004).

$$\alpha_{stv} = \frac{10^9}{\eta_0} \frac{|n-1|}{E/R} \quad (6.10)$$

Sadeleştirilmiş formülde;

η_0 referans viskoziteyi, E akış aktivasyon enerjisini, n akış davranış indeksini, R gaz sabitini, α_{stv} deki “s” kayma hızını, “t” sıcaklığı ve “v” viskoziteyi ifade eder.

Aggarwal ve diğerleri (2006) tarafından besleme stoklarının kalıplanabilirlik (α_{stv}) değeri en yüksek olanın en iyi reolojik özelliklere sahip olacağı belirtilmiştir. Çalışmada hazırlanan tüm besleme stoklarının 160 °C sıcaklık ve 0,524 MPa basınç şartlarındaki kalıplanabilirlik indeksleri Çizelge 7.8 da verilmiştir. Çalışma sonucunda kalıplanabilirlik indeksi değerlerinin düşük toz yüklemeli besleme stoklarında çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Besleme stokundaki toz yüzdesi arttıkça kalıplanabilirlik indeksi düşüş göstermiştir. Homojen bir besleme stokunun içerisinde, kalıplamayı zorlaştırmayacak şekilde içinde maksimum miktarda toz bulundurması önemlidir. Çünkü sinterleme, bağlayıcı giderme ve kalıplama sırasında görülebilen çekme, çökme gibi olumsuzlukları azaltmak için TEK sırasında toz miktarı fazla bir besleme stokunun kullanılması gerekir (Thian ve diğerleri 2002). Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V besleme stoku için hacimsel olarak

% 65 toz yüklemeli besleme stokunda kalıplanabilirlik indeksinin yükseldiği sonra ise tekrar azaldığı belirlenmiştir (Çizelge 7.8). Bu artış ve azalış Ti-6Al-4V besleme stoku için en uygun toz yükleme değerinin % 65 olduğunun bir kanıtı olarak tespit edilmiştir. Ti-6Al-7Nb besleme stoku için bu artış ve azalış hacimsel olarak % 69 ila % 71 toz yüklemeli besleme stoklarında belirlenmiştir. Ti-6Al-7Nb besleme stoku içinde en ideal toz yükleme değerinin hacimsel olarak % 69 olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.8).

Çizelge 7.8. Besleme stoklarının kalıplanabilirlik indeksi değerleri

Besleme Stoku Cinsi	Hacimsel Toz Yükleme Oranları							
	%57	%59	%61	%63	%65	%67	%69	%71
	Kalıplanabilirlik İndeksi ($\text{Pa}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)							
Ti-6Al-4V	2704	1375	423	179	<u>189</u>	185	-	-
Ti-6Al-7Nb	1606	2180	1587	979	395	395	<u>525</u>	502

7.3.5. Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının reoloji sonuçlarının değerlendirilmesi

Besleme stokunun reoloji özellikleri, karışımın kalitesini belirten önemli bir göstergedir. Reoloji deneyleri sonucunda besleme stoku viskozitesinin kayma gerilmesi, kayma hızı ve sıcaklığa karşı hassasiyeti, akış davranış indeksi (n), ergime akış indeksi (g/10 dakika), kalıplanabilirlik ($\text{Pa}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), akış aktivasyon enerjisi (kJ/mol) ve kritik toz yükleme oranı değerleri belirlenir. Elde edilen bu değerler besleme stokunun TEK için uygunluğunu tespit etmemizde bize yardımcı olan çok önemli parametrelerdir.

Deneylerde besleme stoklarına 13 ila 1154 s^{-1} arasında değişen kayma hızları uygulanmıştır. Deneyler sonucunda tüm besleme stoklarında 140 - 150 – 160 °C’lerde kayma incilmesi veya pseudo –plastik davranış görülmüştür. Buda TEK için hazırlanan besleme stoklarında olması istenen bir özelliktir. Pseudo –plastik davranışın temel özelliği kayma hızı artar iken viskozitenin azalmasıdır. Pseudo –plastik akış davranışı akışkan bağlayıcının topaklanmış toz partiküllerini dağıtması sonucu meydana geldiği literatürde belirtilmiştir (Khakbiz ve diğerleri 2005).

Besleme stokunun pseudo –plastik akışa sahip olduğunun ispatı akış davranış indeksi (n) değerinin tespiti ile yapılabilir. Besleme stokunun n değerinin 1’den küçük olması karışımın pseudo –plastik akışa sahip olduğunun göstergesidir. Çalışmamızda hazırlanan besleme stoklarının 140 - 150 – 160 °C’lerde n değerleri 1’in altındadır (Çizelge 7.3 - Çizelge 7.5). Besleme stokunun n değeri 1’in üzerinde olur ise yüksek basınç altında toz ve bağlayıcı sistemin birbirinden ayrılması durumu ortaya çıkar (Karataş ve diğerleri 2004). Bu sebepten dolayı TEK’de kullanılan besleme stoklarının n değerinin 1’in altında olması istenir.

Yapılan araştırmalar sonucu PEG esaslı bağlayıcılar ile hazırlanan besleme stoklarında düşük sıcaklıkta n değerlerinin 1’den büyük olduğu görülmüştür (Yang ve diğerleri 2002). Bu çalışmada da Ti-6Al-7Nb tozu ile hazırlanan besleme stokunun (hacimce % 71) 130 °C’de n değeri 1,3 elde edilmiştir. Elde edilen sonucun literatür ile uyumlu ancak pseudo-plastik akış vermediği için kalıplanabilirlik açısından uygun değildir.

Wang ve diğerleri (2013) karmaşık şekilli Ti-6Al-4V alaşım tozunun reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kayma hızının artması ile viskozitenin azaldığını belirlemişlerdir. Bunun sebebi olarak da erimiş polimerin uzun molekül zincirinden dolayı görünür viskozite azalır iken kayma hızının artmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Erimiş polimerin bu durumunun sürmesi durumunda, partiküller yada moleküllerin kayma gerilmesi ile rastgele dağıldığını ve ardından yavaş yavaş uzayan, bozulan ve dağılma yönlü akış formu oluştuğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak kayma hızının artması ile erimiş polimerin daha düzenli bir yapıya dönüştüğünü ve viskozitenin azaldığını ve erimiş polimerin tamamen düzenli yapıya dönüşmesi sonucunda viskozitedeki azalmanın durduğunu açıklamışlardır. Wang ve diğerlerinin çalışmaları sonucunda elde ettikleri kayma hızının artması ile viskozitenin azalması, çalışmamızda kullanılan tüm besleme stoklarında elde edilmiştir (Şekil 7.6 - Şekil 7.12).

İbrahim ve diğerleri (2010) Ti-6Al-4V tozu ile hazırladıkları besleme stoklarından ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırladıkları besleme stoklarının reoloji çalışmaları sonucunda en uygun toz yükleme oranının hacimce %65-67 aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Weil ve diğerleri (2006) Ti-6Al-4V

alaşım tozu kullanarak yaptıkları çalışmalarında en iyi kalıp doldurma özelliklerini hacimce % 65 toz yüklemeli besleme stokunda elde etmişlerdir. Bu çalışmada da reoloji deneyleri sonucu Ti-6Al-4V alaşım tozundan hazırlanan besleme stokları için optimum toz yükleme değeri hacimce % 65 olarak tespit edilmiştir.

Shibo ve diğerleri (2006) Ti-6Al-4V alaşım tozunun Toz Enjeksiyonla Kalıplanması isimli çalışmalarında %90 gaz atomize Ti-6Al-4V tozu ile %10 karmaşık şekli Ti-6Al-4V tozunun karışımını besleme stoklarında kullanmışlardır. Thian ve diğerleri (2002) ise çalışmalarında sadece karmaşık şekli Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanmışlardır. Shibo ve diğerleri çalışmalarında optimum toz yüklemesini hacimce % 70 olarak bulmuş iken Thian ve diğerleri hacimce % 60 olarak tespit etmişlerdir. Karmaşık şekli tozlardan hazırlanan besleme stoklarının optimum toz yükleme değerlerinin düşük olduğu, gaz atomize tozlar ile karıştırıldıklarında ise toz yükleme değerinin arttığı bilinmektedir (Ferri 2010, Karataş 1997). Bu alışmamızda gaz atomize Ti-6Al-4V alaşım tozu ile hazırlanan besleme stoklarında optimum toz yükleme değeri % 65 olarak tespit edilmiştir. Optimum toz yükleme değerleri arasındaki fark çalışmalarda kullanılan tozların geometrik özelliklerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

TEK’de, besleme stokunun reolojik özelliklerinin bilinmesi kalıplama aşaması için önemlidir. Düşük sıcaklıklarda besleme stokunun viskozitesi çok yüksek olurken yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı ile toz bir birinden ayrışabilir. Ayrıca termal gerilmeler ile bağlayıcı bozulabilir ve kalıplanan parçalarda çatlaklar oluşabilir. Bundan dolayı TEK için en uygun çalışma aralığının belirlenmesi gereklidir. Belirlenecek bu aralık içerisinde besleme stokunun psedo-plastik akış (kayma hızı artar iken viskozitenin azalması) göstermesi istenir. Psedo-plastik akış kalıbın dolumunu kolaylaştırır, fışkırmayı azaltır ve kalıplanan parçanın şeklini korumasına yardımcı olur. Ancak besleme stokunun viskozitesi toz yükleme oranına bağlı olarak değişiklik gösterir. İyi bir kalıplama için, enjeksiyon kalıplama sırasında kayma hızının 100 ila 1000 s⁻¹ arasında olması gerektiği, akışında 1000 Pa.s den daha az viskoziteye sahip olması gerektiği bilinmektedir.

Çalışmamızda Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb titanyum alaşım tozları YYPE + PP + PEG 20,000 + Prafin + SA’dan oluşan bağlayıcı sistem ile karıştırılması sonucu elde

edilen besleme stoklarının viskozitelerinin 1000 Pa.s 'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşım tozun ile hazırlanmış hacimce % 65 toz yüklemeli besleme stokunun kayma hızı değerleri 20,18 ila 133,64 s⁻¹ aralığında iken Ti-6Al-7Nb alaşım tozun ile hazırlanmış hacimce % 69 toz yüklemeli besleme stokunun kayma hızı değerleri ise 20,25 ila 233,38 s⁻¹ aralığında olmuştur.

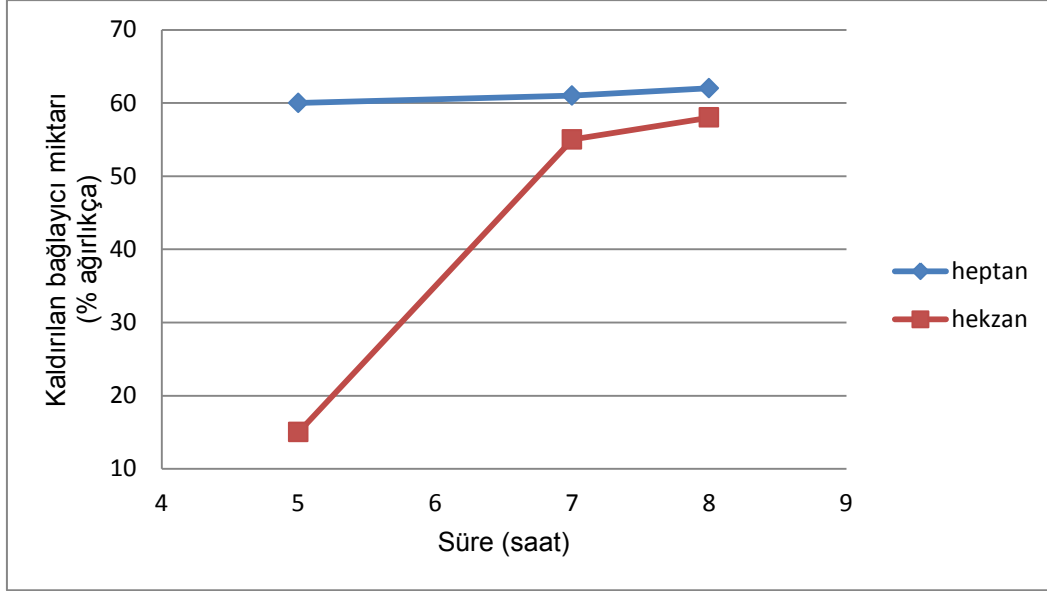
7.4. Bağlayıcı Giderme Deneyleri

Bağlayıcı giderme, çatlama ve kabarma olmaksızın bağlayıcının numuneden tamamen uzaklaştırılmasının yapıldığı bir adım olduğu için oldukça zor ve önemli bir süreçtir. Bu aşamada yaşanılacak bir sıkıntı veya numune yapısında kalacak fazladan bağlayıcı miktarı bir sonraki üretim adımlarında farklı sıkıntıların oluşmasına neden olacaktır. TEK'de yaygın olarak ısı, vakum, katalitik ve kimyasal+ısı bağlayıcı giderme teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde kimyasal + ısı bağlayıcı giderme yöntemi en çok tercih edilenidir. Kimyasal + ısı bağlayıcı giderme yönteminin ilk aşaması olan kimyasal bağlayıcı giderme, numunenin daha az bozulmasına, eş eksenli büzülmesine ve sürecin daha kısa sürede gerçekleşmesini sağlar (Chen 2013). Ayrıca argon atmosferinde yapılan sinterleme nőtürdür bu yüzden yağlayıcıların ortadan kaldırılmasında pek etkili değildir (German 1996/2014). Bu sebeplerden dolayı çalışmamızda kimyasal + ısı bağlayıcı giderme yöntemi kullanılmıştır.

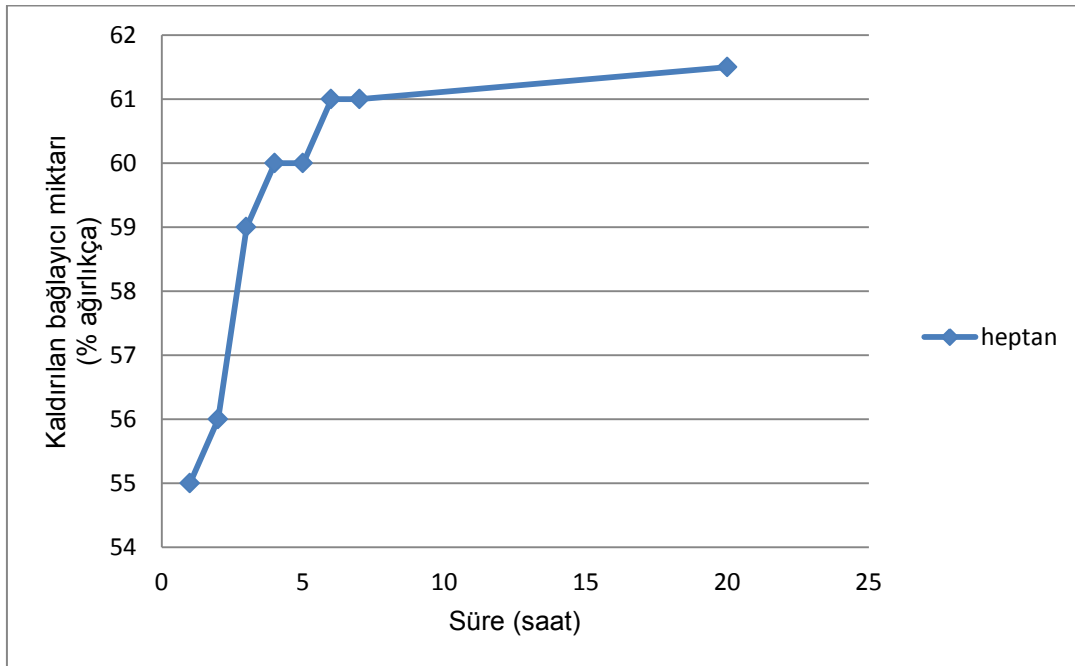
7.4.1. Kimyasal bağlayıcı giderme deneyleri

Teknik literatürde TEK den çıkan ürünlerin kimyasal bağlayıcı giderme işlemlerinde farklı çözücüler kullanılmıştır. Ancak hangi çözücü kullanılırsa kullanılsın kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında en az % 30 en fazla % 98 bağlayıcının besleme stokundan uzaklaştırılması gerekir (German ve Bose 1997:178). Deneylerde kullanılacak çözücünün belirlenmesi bağlayıcı sistemin elemanları ile yakın ilişkilidir. Bu çalışmamızda da hekzan ve heptan olmak üzere iki farklı çözücü ile çalışma yapılmıştır (Şekil 7.17). Numuneler bağlayıcı sistemde kullanılan PEG 20,000, parafin ve stearik asitin ergime sıcaklığına uygun olabilecek olan 60 °C'de heptan veya hekzan çözücüler içinde etüvde bekletilmiş ve ardından 60 °C'de 12 saat fırında kurutulmuştur. Deneyler sonucunda Şekil

7.17’de görüldüğü gibi hekzanın çalışmada kullanılan bağlayıcı sistemden (YYPE+PP+PEG 20,000+Parafin+SA) 8 saat de % 58 bağlayıcı çözmesinden dolayı uygun bir çözücü olmadığı tespit edilmiştir. Heptan ile yapılan deneylerde ağırlıkça % 61-62 bağlayıcı uzaklaştırılabildiği görülmüştür. Besleme stokundan heptan ile uzaklaştırılan bu değer German’ın belirttiği değerlere daha uygundur (Şekil 7.18).



Şekil 7.17. İki farklı çözücüde kaldırılan bağlayıcı miktarları



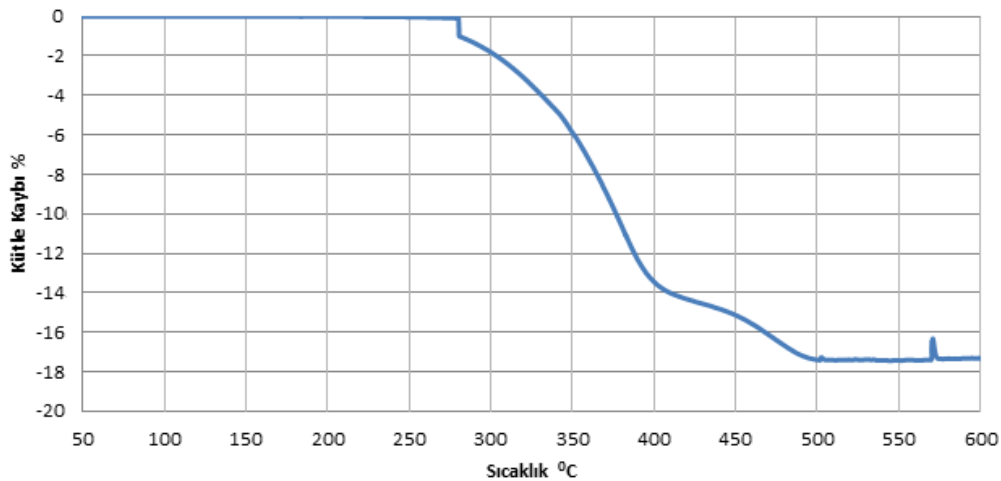
Şekil 7.18. Heptanda kaldırılan bağlayıcı miktarları

7.4.2. Isıl bağlayıcı giderme deneyleri

Isıl bağlayıcı giderme ön sinterleme olarak da tanımlanır ve önemli bir aşamadır. Sinterleme sürecinin ilk aşaması olan bu safhada ısıtma hızı parçada oluşabilecek çatlak, çökme ve bozulma gibi birçok hatanın oluşması ile yakından ilişkilidir. Bu aşamanın işlem basamaklarını belirleyebilmek için hazırlanan besleme stoklarının Termogravimetrik Analizi (TGA) yapılmıştır. Bu analiz sayesinde bağlayıcı sistem elemanlarının hangi sıcaklıkta bozunduğu tespit edilerek ısıl bağlayıcı giderme şartları optimize edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 7.19'da Ti-6Al-7Nb + Bağlayıcı (YYPE+PP+PEG 20,000+Parafin+SA) besleme stokunun TGA analizi sonucu görülmektedir. Besleme stokunda TGA eğrisine göre, 250-280 °C arasında %1, 280-390 °C arasında %11, 390-410 °C arasında % 2, 410-470 °C arasında %2 ve 470-500 °C arasında %1 kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir. Ti-6Al-7Nb besleme stokundaki toplam kütle kaybı % 17 olarak belirlenmiştir.

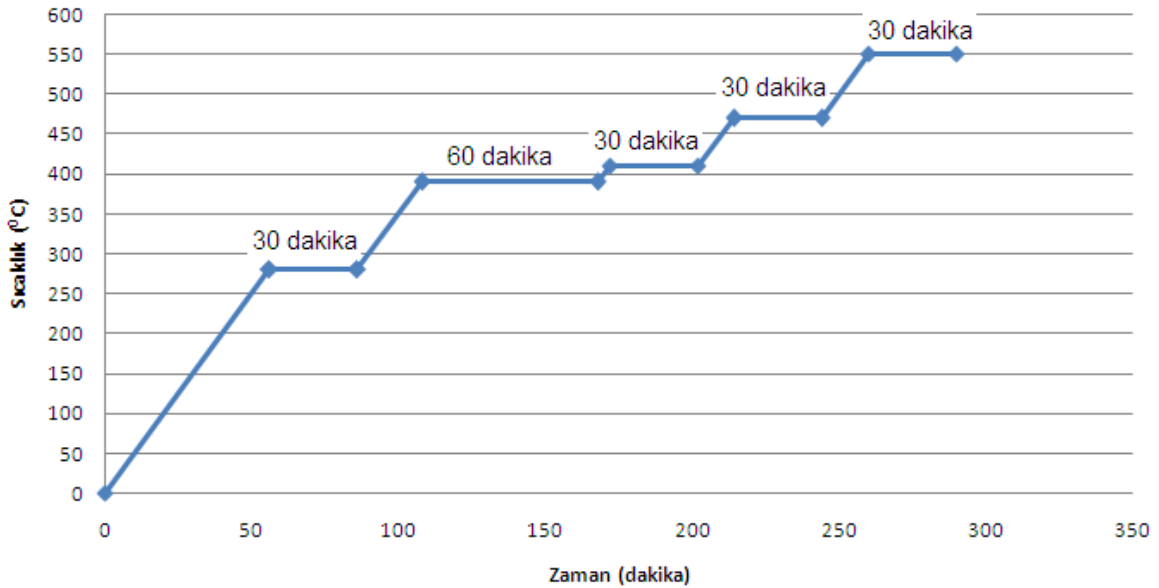
Polimerler genellikle ısı olarak metan, butan, propan, karbon monoksit, karbon dioksit ve ya su gibi küçük moleküllere ayrışırlar. Bu ayrışma 150 °C gibi düşük sıcaklıkta başlar, 350-450 °C'de artar ve 550 °C civarında tamamlanır (Türker ve diğerleri 2007). Bu sebepten dolayı ısıl bağlayıcı giderme deneylerinde en yüksek bozulma sıcaklığının üstüne (550 °C) çıkmıştır.



Şekil 7.19. Ti-6Al-7Nb besleme stokunun TGA analizi

Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda hazırlanan besleme stoklarının ısıtılma hızı bağlayıcı giderme deneyleri 1 – 3 – 5 °C/min olmak üzere üç farklı ısıtma hızında Şekil 7.20’de verilen sürelerde yapılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda da 500 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda titanyumun oksijen ile reaksiyona girdiği belirlenmiştir. Ayrıca titanyumun sinterleme sıcaklığında azot ve oksijenin çözölebileceği, bu durumda parçada istenilmeyen özelliklerin oluşmasına neden olabileceği rapor edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 500 °C’nin altında besleme stokundaki bağlayıcı sistem elemanlarının yapıdan uzaklaştırılmasının çok önemli bir konu olduğu tespit edilmiştir (Wen ve diğerleri 2013).

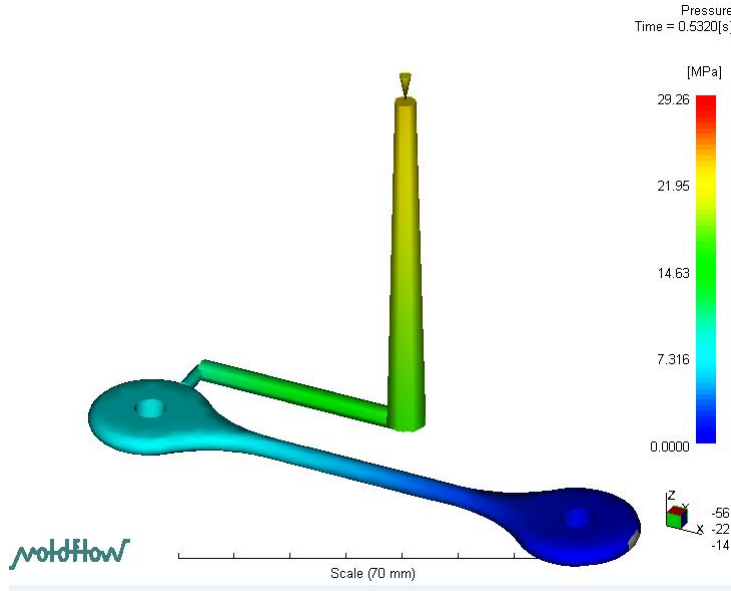


Şekil 7.20. Ti-6Al-7Nb / Ti-6Al-4V besleme stoklarının 5 °C/min ısıtma hızındaki ısıtılma aşamaları

7.5. TEK Parametreleri

Çalışmada besleme stoklarından standart çekme dayanımı test numunesi üretilmiştir. Çekme dayanımı test numuneleri üretmek için kullanılan kalıp Resim 5.6’da görülmektedir. Bu kalıbın boşluk ölçüleri “Metal Powder Industries Federation” tarafından belirlenen ölçülere uygun yapılmıştır (MPFI Standart 50 (1992)). Kalıbın girişleri genişleyen doluma uygun olması için parçaya teğet açılmıştır.

Kalıbın dağıtıcı ve giriş ölçülerinin uygun olup olmadıklarını tespit etmek için ilk olarak Mouldflow Insight paket programı kullanılarak dolum analizi yapılmıştır (Resim 7.1).



Resim 7.1. Çekme dayanımı test numunesi Mouldflow Insight dolum analizi

Bilgisayar ortamında yapılan analizde programın kütüphanesinde bulunan çalışmada kullanılan besleme stoklarına en yakın özelliklere sahip malzeme seçilmiştir. Analiz sonucunda kalıp tasarımına göre 300 bar (30 MPa) enjeksiyon basıncında kalıbın dolduğu tespit edilmiştir. Ayrıca analiz sonucunda kalıbın dağıtıcı ve giriş boyutlarının kalıplama için uygun değerlerde olduğu belirlenmiştir.

Kalıbın dolum analizi aşamasında elde edilen 300 bar enjeksiyon basıncı değerinde parça üretebilmek için deneyler yapılmıştır. Fakat numune üretilenmemiştir. Analizde elde edilen 300 bar enjeksiyon basıncı 600-900-1000 bar'a çıkarılmış, fakat numune üretimi gerçekleştirilememiştir (Resim 7.2 - 7.3 - 7.4). 1100 bar enjeksiyon basıncında kalıp boşluğunun tam olarak dolduğu belirlenmiştir (Resim 7.5). Literatürde yapılan çalışmalarda da titanyum alaşım tozları ile hazırlanan besleme stoklarının 900 ila 1500 bar basınç aralığında enjekte edilebildiği rapor edilmiştir (Haoming 2009, Shibo 2009, Sidambe 2009,2011).



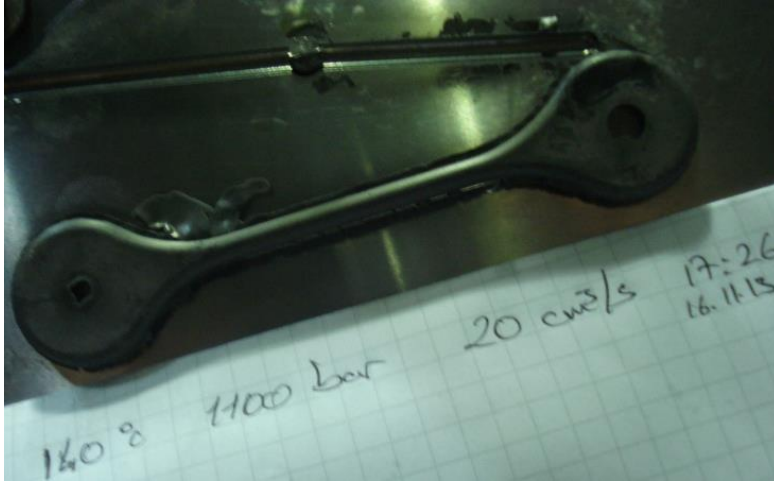
Resim 7.2. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri
140 °C – 600 bar - 10 cm³/s (%65 Ti-6Al-4V))



Resim 7.3. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri
140 °C – 900 bar - 10 cm³/s (%65 Ti-6Al-4V))



Resim 7.4. Kalıp üzerinde eksik dolum (enjeksiyon parametreleri
140 °C – 1000 bar - 10 cm³/s (%65 Ti-6Al-4V))



Resim 7.5. Kalıp üzerinde tam dolum (enjeksiyon parametreleri
140 °C - 1100bar - 20 cm³/s (%65 Ti-6Al-4V))

7.6. Sinterleme Parametreleri

Deneylerde kullanılacak sinterleme parametrelerini tespit edebilmek amacı ile ilk olarak Resim 7.6'da görülmekte olan kalıp ile silindirik numuneler sıkıştırma tekniği ile üretilmiştir. Elde edilen numuneler ile %99,99 saflıkta argon gazı atmosferinde, %95 argon+ %5 hidrojen karışım gazı atmosferinde, %95 argon+ %5 hidrojen karışım gazı ve 5×10^{-1} Pa vakum altında ve yüksek saflıktaki (%99,999) argon gazı atmosferlerinde sinterleme çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde kabul edilebilir sonuçlar sadece yüksek saflıktaki (%99,999) argon gazı atmosferlerinde yapılan numunelerde elde edilebilmiştir. Resim 7.7'de Ti-6Al-4V besleme stokundan üretilmiş ve 1300 °C'de 1 saat sinterlenmiş numuneler görülmektedir.

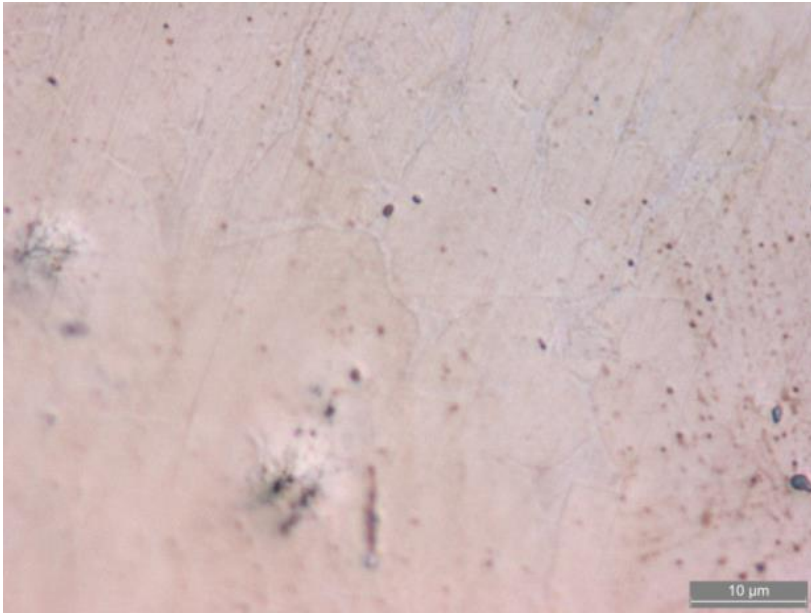


Resim 7.6. Küçük parçaların üretildiği kalıp



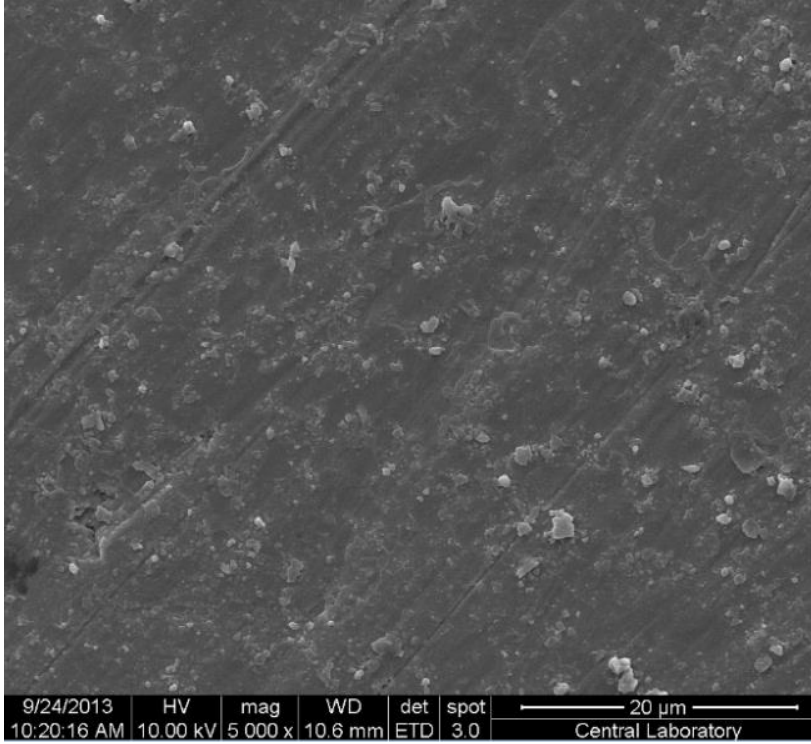
Resim 7.7. 1300 °C'de 1 saat sinterlenmiş Ti-6Al-4V numune

Resim 7.7'deki numunelerin sinterleme işlemi sırasında % 99,999 saflıktaki argon gazı kullanılmıştır. Sinterleme esnasında argon gazı 5 l/min hız ile fırına gönderilmiştir. Ayrıca fırının sıcaklığı 5 °C/min hız ile arttırılmıştır. Sinterleme sonucunda parçanın iç yapısında 10 µm dan küçük boşlukların bulunduğu tespit edilmiştir (Resim 7.8). Ayrıca parçanın iç yapısında yapraklı mikroyapının oluştuğu görülmüştür.



Resim 7.8. 1300 °C'de sinterlenmiş Ti-6Al-4V'den kalıplanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü

Resim 7.9'da Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş ve 1300 °C'de 1 saat sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu numunenin sinterlenmesi esnasında da yüksek saflıkta argon gazı (%99,999) kullanılmış ve gazın fırına gönderilme hızı 5 l/min, fırının ısıtma hızı da 5 °C/min olarak sabit tutulmuştur.



Resim 7.9. 1300 °C'de sinterlenmiş Ti-6Al-7Nb'den kalıplanmış numunenin SEM görüntüsü

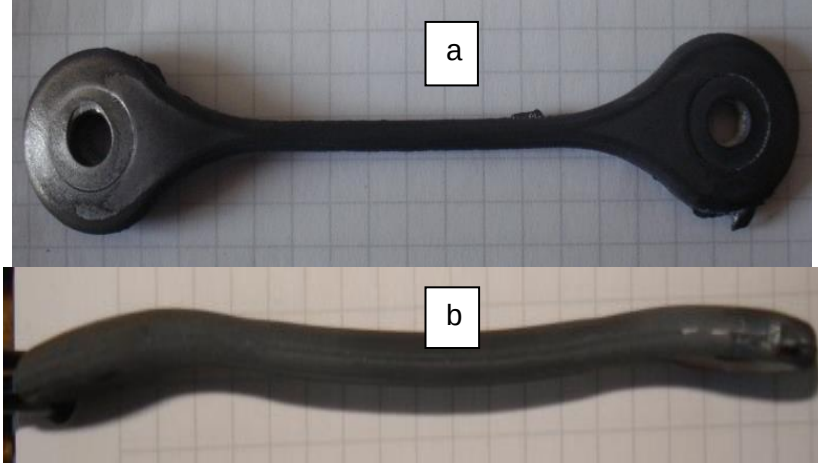
Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş numunenin SEM görüntüsünde taneler arası sinterlemenin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Yapılan bu deneyler sonucunda yüksek saflıktaki argon gazı ile besleme stoklarımızın sinterlenebileceği belirlenmiştir. Çalışmamızın bu aşamasından sonra reoloji deneyleri sonucu belirlediğimiz optimum toz yükleme değerindeki besleme stoklarımız ile çekme dayanımı test numuneleri hazırlanmıştır (Resim 7.10).



Resim 7.10. %65 (H)Ti-6Al-4V + %35 Bag besleme stokundan üretilen numune

TEK ile hazırlanan numuneler 1250 °C'de 2 saat %99,999 saflıktaki argon gazı atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterleme esnasında sıcaklık artış hızı 5 °C/min, gazın fırına gönderilme hızı ise 5 l/min olarak sabit tutulmuştur. Deney sonucunda numunelerde deformasyon olduğu gözlemlenmiştir (Resim 7.11).



Resim 7.11. 1250 °C'de 2 saat, 5 °C/min artış hızında sinterlenmiş Ti-6Al-4V numune (a: Üst Görünüş, b: Yan Görünüş)

Kalıplama ve sinterleme çalışmaları sonucunda bir deney tasarımı yapılması gereği duyulmuştur ve bu tasarım aşağıda verilmiştir.

7.7. Deney Tasarımı

Günümüz ekonomisinde düşük maliyetli, yüksek kalitede ve güvenilir ürünler üretmek en önemli konudur. Birçok kalite uzmanı bunu sağlamanın en iyi yolunun, ürün tasarımına odaklanmak olduğunu belirtmektedir. Bu da aslında kaliteyi kontrol ile sağlamak yerine tasarım aşamasında sağlamanın daha kolay olacağını göstermektedir (Hamzaçebi 2000). Bundan dolayı yüksek kaliteli ürünleri düşük maliyet ile üretebilmek için teknolojiyi ve istatistikî metotları, tasarım aşamasında etkin bir şekilde kullanma zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Çalışmanın bu aşamasına kadar yapılan bağlayıcı giderme, kalıplama ve sinterleme deneyleri sonuçları doğrultusunda Taguchi yöntemi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi yönteminde verilerin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak ve toplanabilirliğini sağlamak için genellikle performans istatistiği olarak ortalama yerine S/N oranını kullanılmaktadır. Böylece, ortalama ile standart sapma, aynı analiz tekniği ile

analiz edilmiş olmaktadır. S/N oranı en basit ifade ile ortalamanın standart sapmaya oranı olarak kabul edilmektedir (Taguchi, ve diğerleri 2005). Bu oranın kullanılması, performans karakteristiğinin ölçülmesinde ortalama veya standart sapmanın tek tek kullanılmasına göre daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Hamzaçebi 2000).

Taguchi'nin performans karakteristiğinin olması istenilen durumlara göre geliştirdiği S/N oranlarından "Hedef değer en büyük"; (güç, mukavemet vb.) olması isteniyor ise y'nin hedef değeri sonsuzdur ve İşaret/Gürültü oranı Eşitlik 6.11'de verildiği gibi tanımlanabilir (Hamzaçebi 2000).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.11)$$

Literatür taraması ve yapılan toz enjeksiyon kalıplama deneyleri sonucunda TEK deneylerinde Çizelge 7.9'daki debi, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Kalıplamada kullanılacak olan bu parametrelerden üç seviye alınmıştır.

Çizelge 7.9. Toz enjeksiyon kalıplama parametreleri

Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri	Debi (cm ³ /s)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)
1	20	1100	50	140	40
2	25	1200	60	150	50
3	30	1300	70	160	60

Kalıplanmış numunelerin sinterleme parametreleri yapılan bağlayıcı giderme, sinterleme ve literatür taraması sonucunda Çizelge 7.10'daki parametrelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Sinterleme aşamasındaki parametrelerden üçer seviye alınmıştır.

Çizelge 7.10. Sinterleme parametreleri

Sinterleme Parametreleri	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Isıtma Hızı (°C /min)	Gaz Akış Hızı (l / min)
1	1250	1	1	5
2	1300	2	3	10
3	1350	3	5	15

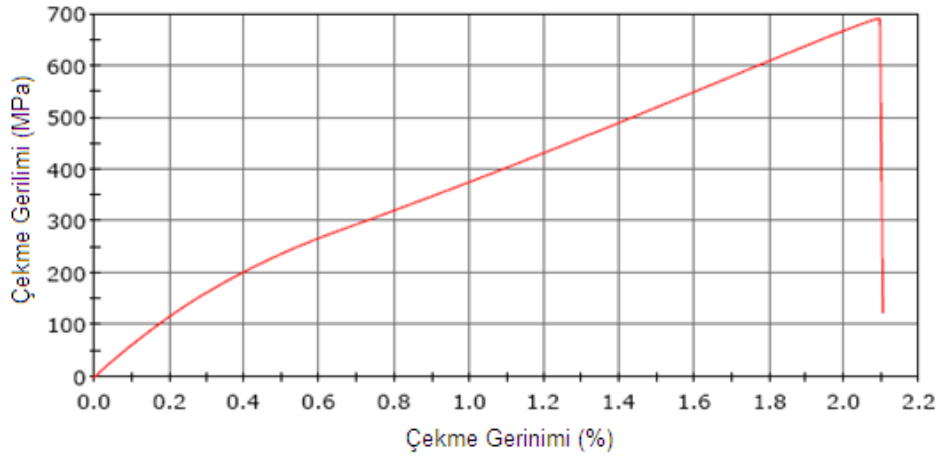
TEK ve sinterleme parametrelerinin üretilen parçanın mekanik özelliklerine etkisi belirleyebilmek için Taguchi yönteminde bulunun L27 modeli ile deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 7.11). Deney tasarımı sonucunda her bir satır için 3 numune olmak üzere bir besleme stokundan 81 adet numune TEK yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmada iki besleme stoku için toplamda 162 numune kalıplanmış ve sinterlenmiştir.

Çizelge 7.11. Taguchi yöntemi kullanılarak hazırlanan L27 modeli

	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/ °C)	Gaz Akış hızı (l/min)
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5

7.8. Hacimce %65 Ti-6Al-4V + %35 Bağlayıcıdan Hazırlanan Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

Hacimce %65 Ti-6Al-4V alaşım tozu içeren besleme stokundan kalıplanan ve sinterlenen numunelerin çekme testi sonuçları Ek-1'deki Çizelge 1.1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçların büyükten küçüğe sıraladığımızda (Ek-1 Çizelge 1.2) en yüksek çekme dayanımı 683,97 MPa olarak birinci satırdaki deney şartlarında elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 7.21, Çizelge 7.12).

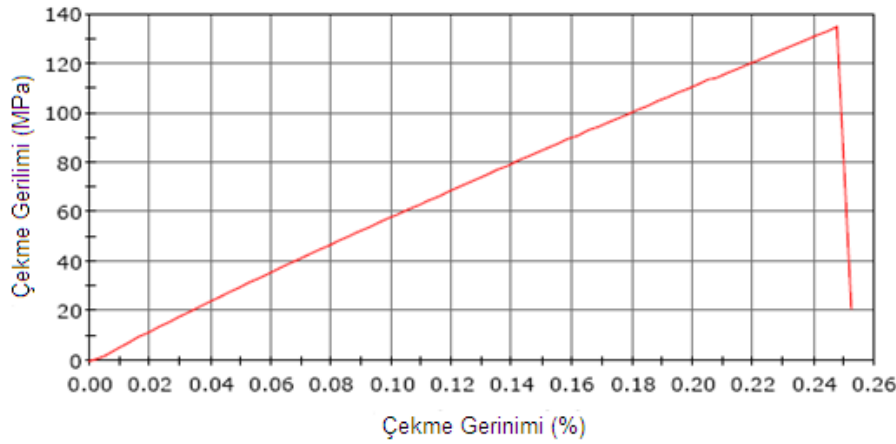


Şekil 7.21. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı

Çizelge 7.12. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı için parametreler

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütölleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min./°C)	Gaz Akış hızı (l/min)	Çekme Dayanımı (MPa)	Teorik Yoğunluk (%)
20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	683,97	96,59

Ti-6Al-4V besleme stokundan hazırlanan numuneler içerisinde en düşük çekme dayanımı değeri 134,77 MPa olarak yirmi birinci satırdaki deney şartlarında elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 7.22, Çizelge 7.13).

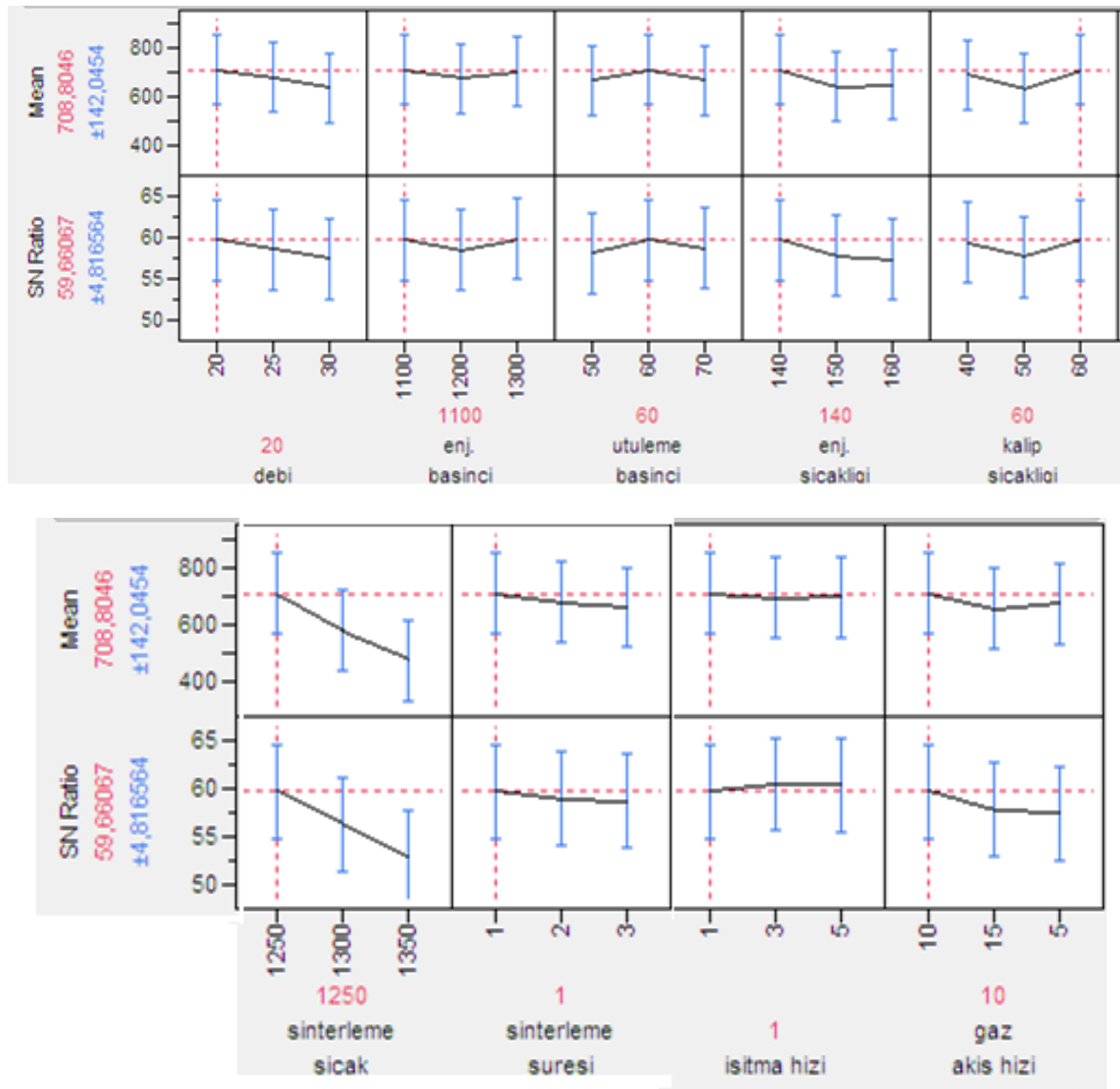


Şekil 7.22. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı

Çizelge 7.13. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı için parametreler

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütölleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/°C)	Gaz Akış hızı (l/min)	Çekme Dayanımı (MPa)	Teorik Yoğunluk (%)
30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	134,77	94,03

Çalışmada deneylerde kullanılan girdilerin çekme dayanımına etkileri belirlenmiştir (Resim 7.12).



Resim 7.12. Hacimce % 65 Ti-6Al-4V toz yüklemeli besleme stokundan kalıplanan numunelerin deney girdilerinin çekme dayanımına etkileri

Resim 7.12'deki deney girdilerinin analiz sonucu hacimce %65 Ti-6Al-4V + %35 Bağ'dan üretilen numunelerden en yüksek çekme dayanımını elde etmek için Çizelge 7.14'deki kalıplama ve sinterleme parametrelerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Çizelge 7.14. Hacimce %65 Ti-6Al-4V besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/ °C)	Gaz Akış hızı (l/min)
20	1100	60	140	60	1250	1	1	10

Deney girdilerinin etki analizi (ANOVA) sonuçları Çizelge 7.15'de verilmiştir. Çizelge 6.15'de verilen deney girdilerinin en küçük Prob>F değeri bize en etkili parametreyi belirtmektedir. Buna göre Ti-6Al-4V besleme stokundan hazırlanan numunelerin deney girdilerinin etki analizi sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu en yüksek etkiye sahip olan parametrenin sinterleme sıcaklığı olduğu Prob>F değeri ile tespit edilmiştir (Çizelge 7.16).

Çizelge 7.15. Ti-6Al-4V besleme stokundan hazırlanan numunelerin ANOVA analizi

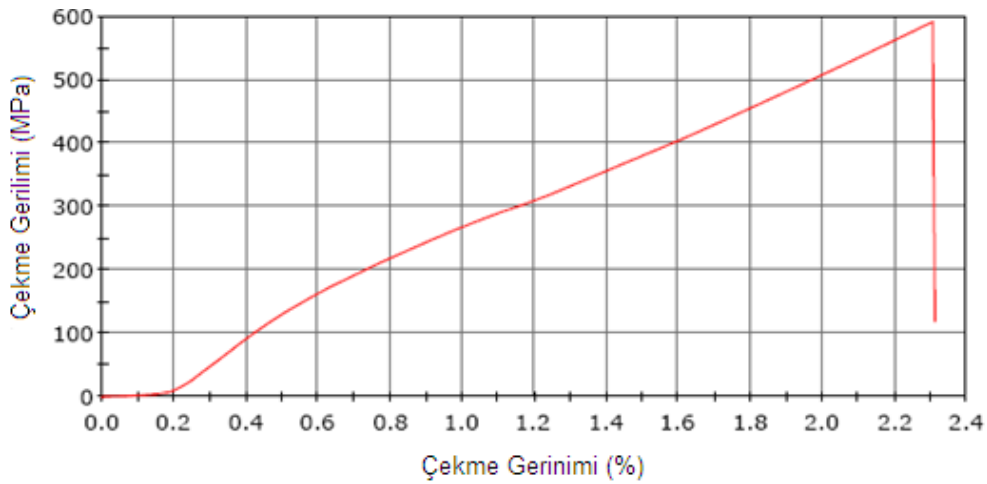
<i>Effect Tests S/N Ration</i>					
<i>Source</i>	<i>Nparm</i>	<i>DF</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>F Ratio</i>	<i>Prob > F</i>
Debi	2	2	22,72048	1,8324	0,2212
Enjeksiyon basıncı	2	2	10,28749	0,8297	0,4705
Ütüleme basıncı	2	2	11,55761	0,9321	0,4326
Enjeksiyon sıcaklığı	2	2	28,30422	2,2827	0,1643
Kalıp sıcaklığı	2	2	20,78589	1,6764	0,2466
Sinterleme sıcaklığı	2	2	207,2691	16,7163	0,0014*
Sinterleme süresi	2	2	4,53313	0,3656	0,7048
Isıtma hızı	2	2	3,38872	0,2733	0,7677
Gaz akış hızı	2	2	25,48176	2,0551	0,1904

Çizelge 7.16. Ti-6Al-4V numuneler için deney girdilerinin etki sıralaması

<i>Effect Tests S/N Ration</i>	
<i>Source</i>	<i>Prob > F</i>
Sinterleme sıcaklığı	0,0014
Enjeksiyon sıcaklığı	0,1643
Gaz akış hızı	0,1904
Debi	0,2212
Kalıp sıcaklığı	0,2466
Ütöleme basıncı	0,4326
Enjeksiyon basıncı	0,4705
Sinterleme süresi	0,7048
Isıtma hızı	0,7677

7.9. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb + %31 Bağlayıcıdan Hazırlanan Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb alaşım tozu içeren besleme stokundan kalıplanan ve sinterlenen numunelerin çekme testi sonuçları Ek-1 deki Çizelge 1.3'de verilmiştir. Elde edilen sonuçların büyükten küçüğe sıraladığımızda (Ek-1 Çizelge 1.4) en yüksek çekme dayanımı değerinin 590,59 MPa olarak birinci satırdaki deney şartlarında elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 7.23, Çizelge 7.17).

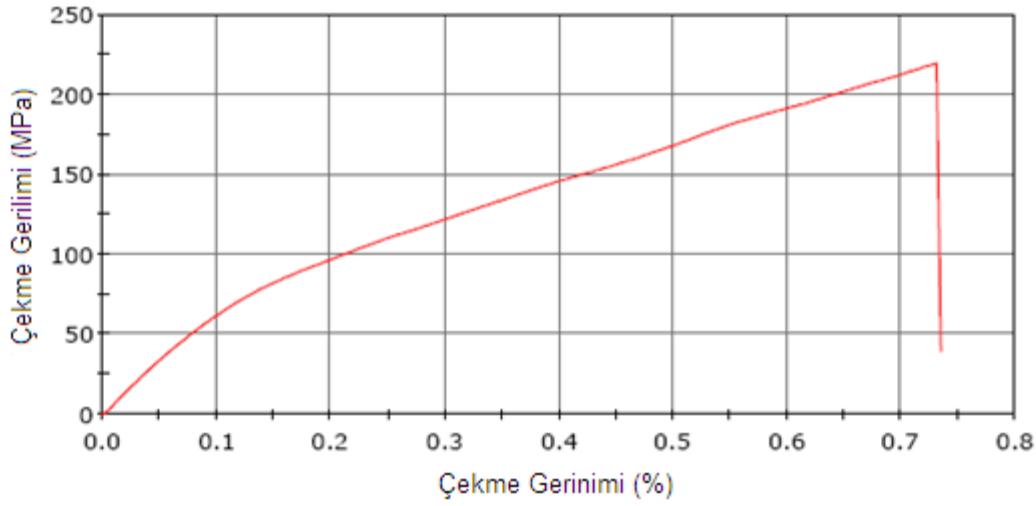


Şekil 7.23. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı

Çizelge 7.17. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en yüksek çekme dayanımı için parametreler

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütuleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/ °C)	Gaz Akış hızı (l/min)	Çekme Dayanımı (MPa)	Teorik Yoğunluk (%)
20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	590,59	97,06

Ti-6Al-7Nb besleme stokundan hazırlanan numuneler içerisinde en düşük çekme dayanımı değeri 210,50 MPa olarak ikinci satırdaki deney şartlarında elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 7.24, Çizelge 7.18).

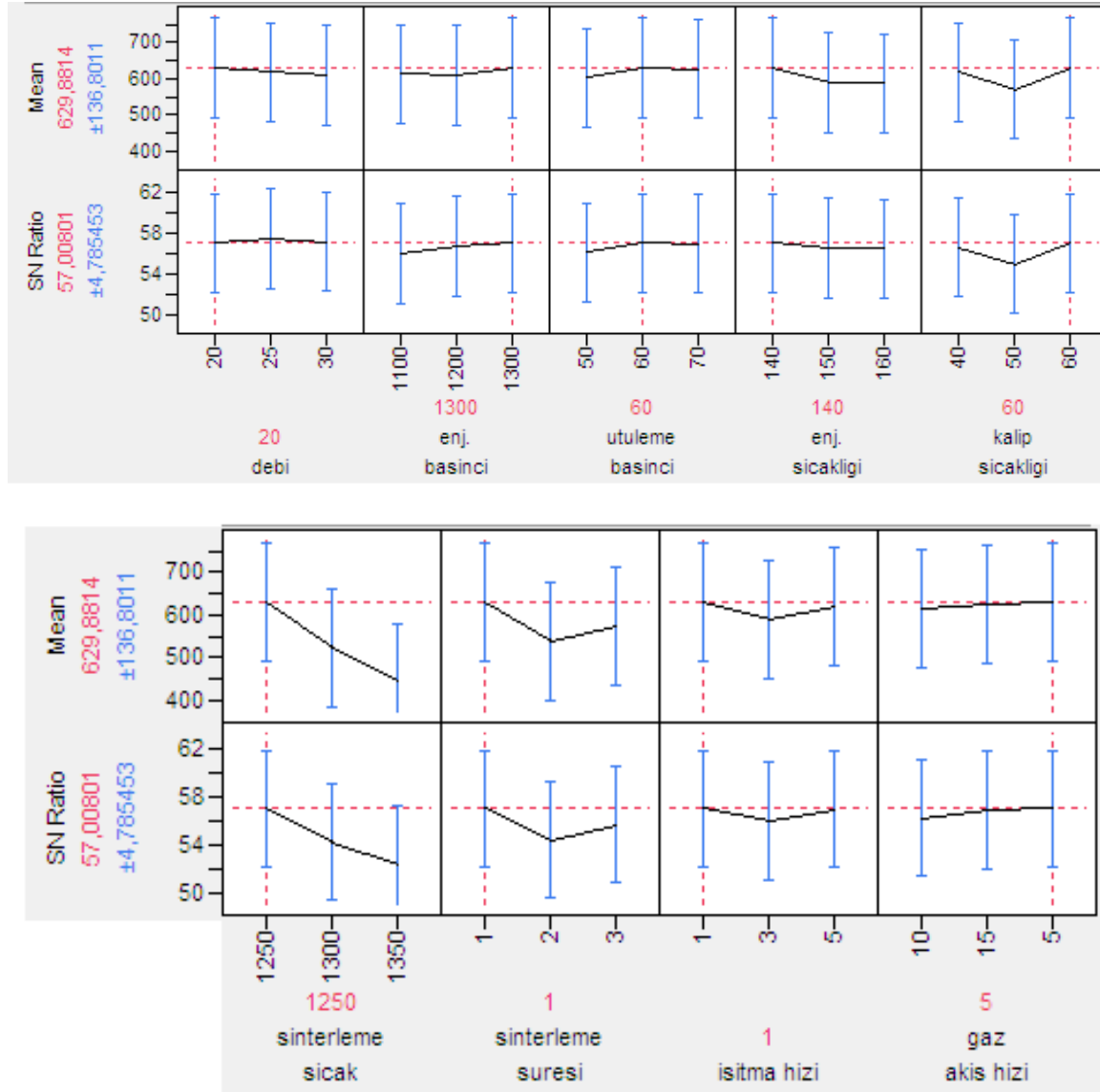


Şekil 7.24. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı

Çizelge 7.18. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilen en düşük çekme dayanımı

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütuleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/ °C)	Gaz Akış hızı (l/min)	Çekme Dayanımı (MPa)	Teorik Yoğunluk (%)
20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	210,50	96,72

Ti-6Al-7Nb besleme stokundan kalıplanan numunelerin üretim parametrelerinin çekme dayanımına etkileri belirlenmiştir (Resim 7.13).



Resim 7.13. Hacimce % 69 Ti-6Al-7Nb toz yüklemeli besleme stokundan kalıplanan numunelerin deney girdilerinin çekme dayanımına etkileri

Resim 7.13'deki deney girdilerinin analiz sonucu hacimce %69 Ti-6Al-7Nb + %31 Bağ'dan üretilen numunelerden en yüksek çekme dayanımını elde etmek için Çizelge 7.19'daki optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Çizelge 7.19. Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stokunun optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri

Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütölleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/ °C)	Gaz Akış hızı (l/min)
20	1300	60	140	60	1250	1	1	5

Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb besleme stoku için deney girdilerinin etki analizi (ANOVA) sonuçları Çizelge 7.20’de verilmiştir. Ti-6Al-7Nb besleme stoku için deney girdilerinin etki sıralaması Çizelge 7.21’de verilmiştir. Çizelge 7.20’ye bakıldığında en küçük Prob>F değerindeki sinterleme sıcaklığının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.20. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan hazırlanan numunelerin ANOVA analizi

<i>Effect Tests S/N Ration</i>					
<i>Source</i>	<i>Nparm</i>	<i>DF</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>F Ratio</i>	<i>Prob > F</i>
Debi	2	2	0,850565	0,0695	0,9334
Enjeksiyon basıncı	2	2	4,786460	0,3911	0,6886
Ütölleme basıncı	2	2	4,467965	0,3650	0,7052
Enjeksiyon sıcaklığı	2	2	1,475088	0,1205	0,8880
Kalıp sıcaklığı	2	2	20,13062	1,6447	0,2522
Sinterleme sıcaklığı	2	2	95,52679	7,8047	0,0132*
Sinterleme süresi	2	2	29,59225	2,4178	0,1509
Isıtma hızı	2	2	6,177719	0,5047	0,6217
Gaz akış hızı	2	2	3,352586	0,2739	0,7673

Çizelge 7.21. Ti-6Al-7Nb numuneler için deney girdilerinin etki sıralaması

<i>Effect Tests S/N Ration</i>	
<i>Source</i>	<i>Prob > F</i>
Sinterleme sıcaklığı	0,0132
Sinterleme suresi	0,1509
Kalıp sıcaklığı	0,2522
Isıtma hızı	0,6217
Enjeksiyon basıncı	0,6886
Ütölleme basıncı	0,7052
Gaz akış hızı	0,7673
Enjeksiyon sıcaklığı	0,8880
Debi	0,9334

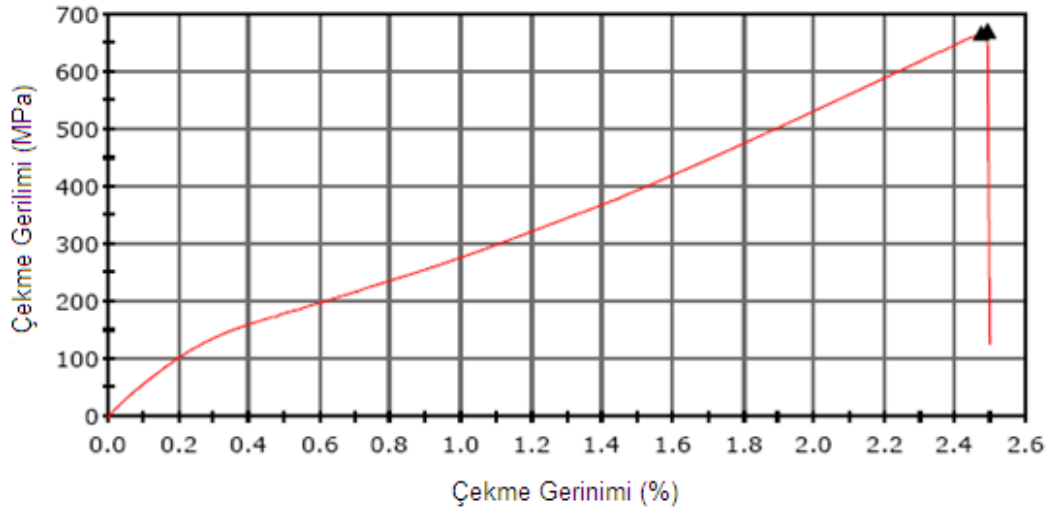
7.10. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb Besleme Stoklarının Optimum Üretim Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Çalışmamızda yapılan birçok deneyler ve analizler sonucunda Çizelge 7.22’de belirtilen optimum kalıplama ve sinterleme şartlarında tekrar numuneler hazırlanmış ve gerekli testler yapılmıştır.

Çizelge 7.22. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb alaşım tozları ile hazırlanmış besleme stoklarının optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri

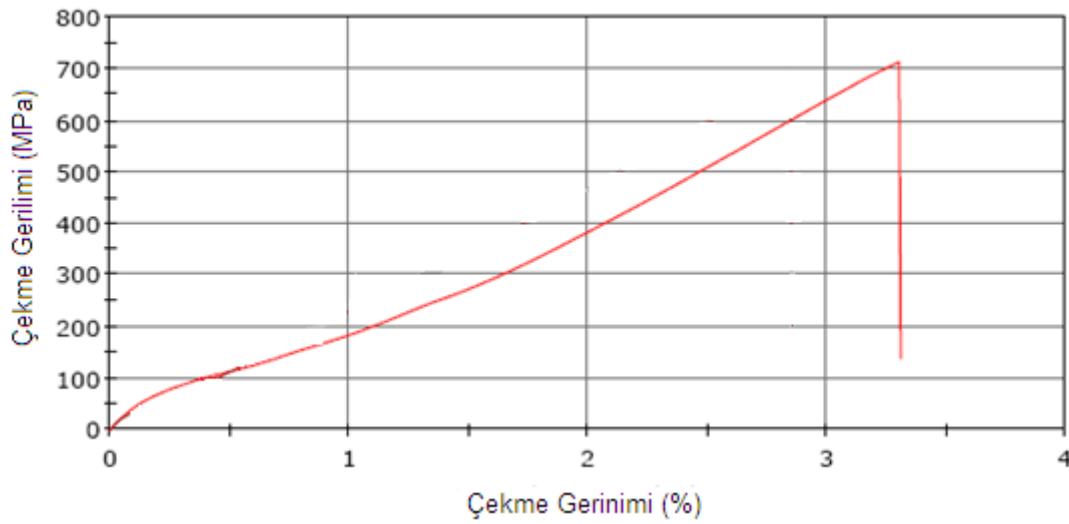
Toz cinsi	Debi ₃ (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütölleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (min/°C)	Gaz Akış Hızı (l/min)
Ti-6Al-7Nb	20	1300	60	140	60	1250	1	1	5
Ti-6Al-4V	20	1100	60	140	60	1250	1	1	10

Çizelge 7.22’de verilen parametrelerle üretilen Ti-6Al-7Nb numunenin çekme dayanımı sonucu Şekil 7.25’de görülmektedir. Yapılan deney sonucu Ti-6Al-7Nb numunede 631,12 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 7.25. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde üretilmiş numunenin çekme dayanımı

Çizelge 7.22’de verilen parametrelerle üretilen Ti-6Al-4V numunenin çekme dayanımı sonucu Şekil 7.26’de görülmektedir. Yapılan deney sonucu Ti-6Al-4V numunede 711,79 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 7.26. Ti-6Al-4V besleme stokundan optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde üretilmiş numunenin çekme dayanımı

Taguchi deney tasarımı (L27) ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen çekme dayanımı sonuçları, optimum parametrelerde üretilmiş numunelerin çekme dayanımı sonuçları ile karşılaştırıldığında tespit edilen parametrelerin en yüksek çekme dayanımı elde etmek için uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 7.23).

Çizelge 7.23. Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Besleme Stoku Cinsi	Taguchi Deney Tasarımı İle Elde Edilen En Yüksek Çekme Dayanımı (MPa)	Optimum Parametrelerde Elde Edilen En Yüksek Çekme Dayanımı (MPa)	Hadde Malzemenin Çekme Dayanımı Sonuçları (MPa)
Ti-6Al-4V	683,97	711,79	860 (ASTM F1108-04)
Ti-6Al-7Nb	590,59	631,12	900 (ASTM F1295-11)

Resim 7.19 - 7.20’de görüldüğü gibi hazırlanan besleme stoklarından üretilen numunelerin dökme demir gibi davrandığı görülmektedir. Toz metalurjisi parçaların dökme demir gibi hareket ettiği bilinmektedir (Karataş 1997).

Ferri ve diğerleri (2009) Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanarak TEK yöntemi ile parça üretmişlerdir. Besleme stokuna hacimce %68 toz yüklemesi yapmışlardır. Çalışmalarında sinterleme işlemini numuneleri 10^{-5} mbar vakum altında 1250°C de 2 saat tutarak gerçekleştirmişlerdir. Sinterleme işlemi sonrası numunelere bilyeleme işlemi uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda numunelerde elde ettikleri en yüksek çekme gerilmesi 800 MPa’dır. Obasi ve arkadaşları (2010) Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanarak TEK yöntemi ile parça üretmişlerdir. Besleme stokunda hacimce %69 toz yüklemesi kullanmışlardır. Çalışmalarında sinterleme işlemini numuneleri 10^{-4} mbar vakum altında 1250°C ile 1400°C arasında değişen sıcaklıklarda ve farklı sinterleme süreleri ve ısıtma hızlarında gerçekleştirmişler ve en yüksek çekme gerilmesini 806 MPa bulmuşlardır. Shibo ve diğerleri (2006) Ti-6Al-4V alaşımın Toz Enjeksiyonla Kalıplanması isimli çalışmalarında besleme stoku içinde %90 gaz atomize (GA Ti-6Al-4V) tozu ile %10 karmaşık şekilli (HDH Ti-6Al-4V) tozu kullanmışlardır. Hazırladıkları besleme stokunda hacimce %72 toz yüklemesi uygulamışlardır. Çalışmalarında numunelerin sinterleme işlemini 10^{-5} mbar vakum altında 1230°C de 3 saat de yapmışlardır. Deneyler sonucunda numunelerde 835 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Nora ve diğerleri (2013) çalışmalarında Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK ile ürettikleri numunelerin

sinterleme parametrelerini optimize etmişlerdir. Numuneleri yüksek vakum altında (10^{-6} mbar) sinterlemiştir. Nora ve diğerleri yaptıkları deney tasarımı sonucunda; en yüksek çekme dayanımına (934,33 MPa), 1200 °C sinterleme sıcaklığında, 1 saat sinterleme süresinde ulaştıklarını rapor etmişlerdir. Bu çalışmamız da %65 Ti-6Al-4V toz yüklemeli besleme stoklarında en yüksek çekme gerilmesi 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunelerde 711,79 MPa olarak elde edilmiştir. Ferri ve arkadaşları 800 MPa değerini numuneleri bilyeleterek ve vakum altında 2 saat süre ile sinterleme sonucunda elde edebilmişlerdir. Çalışmamızda numuneler bilyelenmeden ve vakum altında değil kontrol atmosferde sinterlenmiştir. Vakum altında yapılan sinterlemenin kontrol atmosferde yapılandan daha iyi olduğu ve toz yüklemesi arttıkça numunenin mekanik özelliklerinde bir artış olacağı bilinmektedir (Qian 2010). Ayrıca numunelere uygulanan bilyeleme işlemi de mukavemeti arttırmıştır.

Ergül ve diğerleri (2009) TEK yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım tozundan ürettikleri numunelerin sinterleme parametrelerinin parçanın mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kullandıkları besleme stoklarının toz yüklemesi hacimce % 67,5 dir. Numuneleri 1150, 1200, 1260, 1275 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta ve 1, 2, 5, 7,5, 10 saat olmak üzere beş farklı sürede sinterlemiştir. Sinterleme işlemini 10^{-3} mbar vakum atmosferinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda 1275 °C de 10 saat sinterlenmiş numunede 704 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Çalışmamızda atmosfer kontrollü ortamda 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunelerde 711,79 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Ergül ve diğerleri 10^{-3} mbar vakum altında sinterledikleri numunelerde ancak 10 saat sinterleme sonucunda 704 MPa çekme dayanımı elde edebilmişlerdir. Elde edilen değerler karşılaştırıldığında düşük vakum altında sinterleme yerine atmosfer kontrollü ortamda sinterlemenin daha ekonomik ve yüksek çekme dayanımı elde etmede etkili olduğu tespit edilmiştir.

Shibo ve diğerleri (2009) çalışmalarında ağırlıkça %85 gaz atomize (GA Ti) tozu ile ağırlıkça %15 karmaşık şekilli (HDH - Ti) tozlarının karışımını kullanmışlardır. Isıl bağlayıcı giderme işlemini 10^{-5} mbar vakum gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin sinterleme işlemlerini 10^{-7} mbar vakum atmosferinde 1150 °C de 2-4 saat bekleterek yapmışlardır. Çalışmalarında % 67 toz yüklemeli besleme stoklarından

ürettikleri numunelerde 389-419 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Bu çalışmamız da %65 Ti-6Al-4V toz yüklemeli besleme stoklarında üretilen numunelerde 1250 °C de 1 saat sinterleme işlemi sonucunda 711,79 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Değerler arasındaki fark tozların farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Limberg ve diğerleri (2012) TEK yöntemi ile, gaz atomizasyon tekniği kullanarak elde edilmiş Ti 45Al 5Nb 0,2B 0,2C alaşım tozundan, ürettikleri numunelerin çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Numuneleri, 1500 °C de 1 ve 2 saat 10^{-5} mbar vakum altında ve üç farklı argon gazı akışında (10, 30, 80 kPa) 2 saat süre ile sinterlemişlerdir. Numunelere çekme testi öncesinde zirkonyum (ZrO_2) bilyeler ile 800 kPa basınç altında bilyeleme işlemine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda, 2 saat 10 kPa argon atmosferinde sinterlenen numunelerde 630 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Haoming ve diğerleri (2009) Ti-45Al-8,5Nb-(W, B, Y) alaşım tozundan ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcı sistem ve tozun karışımı sonu elde ettikleri besleme stoku için en uygun toz yükleme değerini %65 olarak belirlemişlerdir. Numunelerin sinterleme işlemini ise 10^{-5} mbar vakum atmosferinde 1400 – 1500 °C arasında ve 0,5 ila 3 saat arasında değişen sinterleme sürelerinde yapmışlardır. Çalışma sonucunda hazırlanan besleme stoku için 1480 °C de 2 saat sinterleme süresinin optimum sinterleme parametresi olduğunu belirlemişlerdir. Bu sinterleme parametrelerindeki numunelerde 382 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Haoming ve diğerleri ürettikleri parçalarda tam yoğunluğa sinterleme sıcaklığı ve süresinin artırılması ile ulaşılamayacağını rapor etmişlerdir. Ayrıca yüksek sinterleme sıcaklığında parçanın çarpıldığını ve uzun sinterleme süresinde ise kaba yapraksı yapının oluştuğunu belirtmişlerdir. Gerling ve Schimansky (2002) Ti - 47Al – 4 (Nb, Mn, Cr, Si, B) alaşımından ürettikleri parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kalıptan çıkan parçalara kimyasal bağlayıcı giderme işlemi uyguladıktan sonra 1410 °C de 5×10^{-5} mbar vakum altında sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Sinterleme aşamasında numuneleri 2 ve 4 saat olmak üzere iki farklı sürede sinterlemişlerdir. Sinterlemeden sonrada parçaları 1300 °C de 200 MPa basınç altında 2 saat sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda 2 ve 4 saat sinterlenen parçalarda 190 MPa çekme gerilmesi elde etmişlerdir. 2 saat sinterlenmiş ve sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulmuş

parçalarda ise 260 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Haoming (2009) ve Gerling (2002) çalışmalarında düşük çekme dayanımı elde etmelerinin nedeni olarak, gözenekli yapının parça içerisinde fazla olmasından kaynaklandığını rapor etmişlerdir. Parça içerisindeki gözenek miktarının azaltılmasında fırın atmosferinin kontrolünün çok önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Limberg ve diğerleri 630 MPa değerini numuneleri bilyeleyerek elde edebilmişlerdir. Çalışmamızda numuneler bilyelenmeden ve atmosfer kontrollü fırın ortamında sinterlenmiştir. Bilyeleme işleminin parçanın mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Ferri 2010). Çalışmamızda daha düşük sıcaklık ve daha kısa sinterleme süresinde (1250 °C / 1 saat) 631,12 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir.

Zhao ve diğerleri (2013) farklı oranlarda niyobyum (Nb) içeren titanyum alaşımlarının (ağırlıkça % 10, 16 ve 22 Nb ilaveli) ve ticari saflıktaki titanyumun mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında titanyum içerisindeki niyobyum (Nb) oranının mekanik özelliklere etkisini belirlemişlerdir. Ticari saflıktaki titanyum, Ti-10Nb, Ti-16 Nb ve Ti-22 Nb kullanarak hazırladıkları besleme stoklarında (ağırlıkça) %5 stearik asit, %35 polietilen vinil asetat ve %60 parafin mum dan meydana gelen bağlayıcı sistem kullanmışlardır. Tüm besleme stokları hacimsel % 69 toz yüklemesine sahiptir. Numunelerin ısıtıcı bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri 10^{-5} mbar vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler 1500 °C de 4 saat bekletilerek sinterlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Ti-10Nb numunelerde 638 MPa, Ti-16Nb numunelerde 687 MPa, Ti-22Nb numunelerde 754 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Besleme stokundaki Nb oranının çekme dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Bidaux ve diğerleri (2011) ağırlıkça %17 niyobyum (Nb) içeren titanyumdan hazırlanmış besleme stoklarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Deneyler için hacimce % 60 toz yüklemesine sahip besleme stokları hazırlamışlardır. Numunelerin sinterleme işlemini 1300 °C de 4 saat argon gazı atmosferinde yapmışlardır. Çalışma sonucunda numunelerde 749 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Zhao (2013) ve Bidaux (2011) numunelerdeki Nb oranının, mikro yapıdaki gözenek miktarını etkileyen önemli bir faktör olduğunu tespit etmişlerdir. Hem sinterlenmiş hem de izostatik presleme işlemi uygulanmış numunelerde Nb oranının artması ile çekme dayanımının yükseldiğini belirlemişlerdir. Çalışmamız da 1250 °C de 1 saat bekletilerek argon atmosferinde sinterlenmiş 7Nb oranına

sahip besleme stoklarında 631,12 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin Zhao (2013) ve Bidaux (2011) elde ettiği çekme dayanımı değerinden düşük olmasının nedeni olarak niyobyum oranlarının aynı olmamasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ancak bu değer daha düşük sıcaklıkta, sürede ve sadece argon atmosferinde elde edilebilmiştir.

Çalışmada Ti-6Al-4V numunelerden elde edilen sonuçların MPIF 35 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.24). Literatürde sinterlenmiş Ti-6Al-7Nb parçalar için standarda rastlanamamıştır. Ancak elde edilen 631,12 MPa çekme dayanımı, % 12,69 boyda çekme ve % 97,52 g/cm³ yoğunluk değerlerinin önceden yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Limberg 2012, Haoming 2009, Zhao 2013, Bidaux 2011).

Çizelge 7.24. Ti-6Al-4V numunelerin MPIF 35 standardındaki özellikleri

Özellik	Sinterlenmiş Ti-6Al-4V	MPIF 35
Yoğunluk (g/cm ³)	96,95	>%96
Boşluk (%)	3,05	< 5
Boyda çekme (%)	12,85	12 - 15
Çekme Dayanımı (MPa)	711,79	>700

7.10.1. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum kalıplama parametrelerinin değerlendirilmesi

TEK'de enjeksiyon parametrelerinin son ürünün özellikleri ve ham parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi çok yüksektir (Luo ve diğerleri 2009). Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum kalıplama parametreleri değerlendirildiğinde besleme stokları arasında sadece enjeksiyon basıncı değerlerinde farklılık olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.25).

Çizelge 7.25. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum kalıplama parametreleri

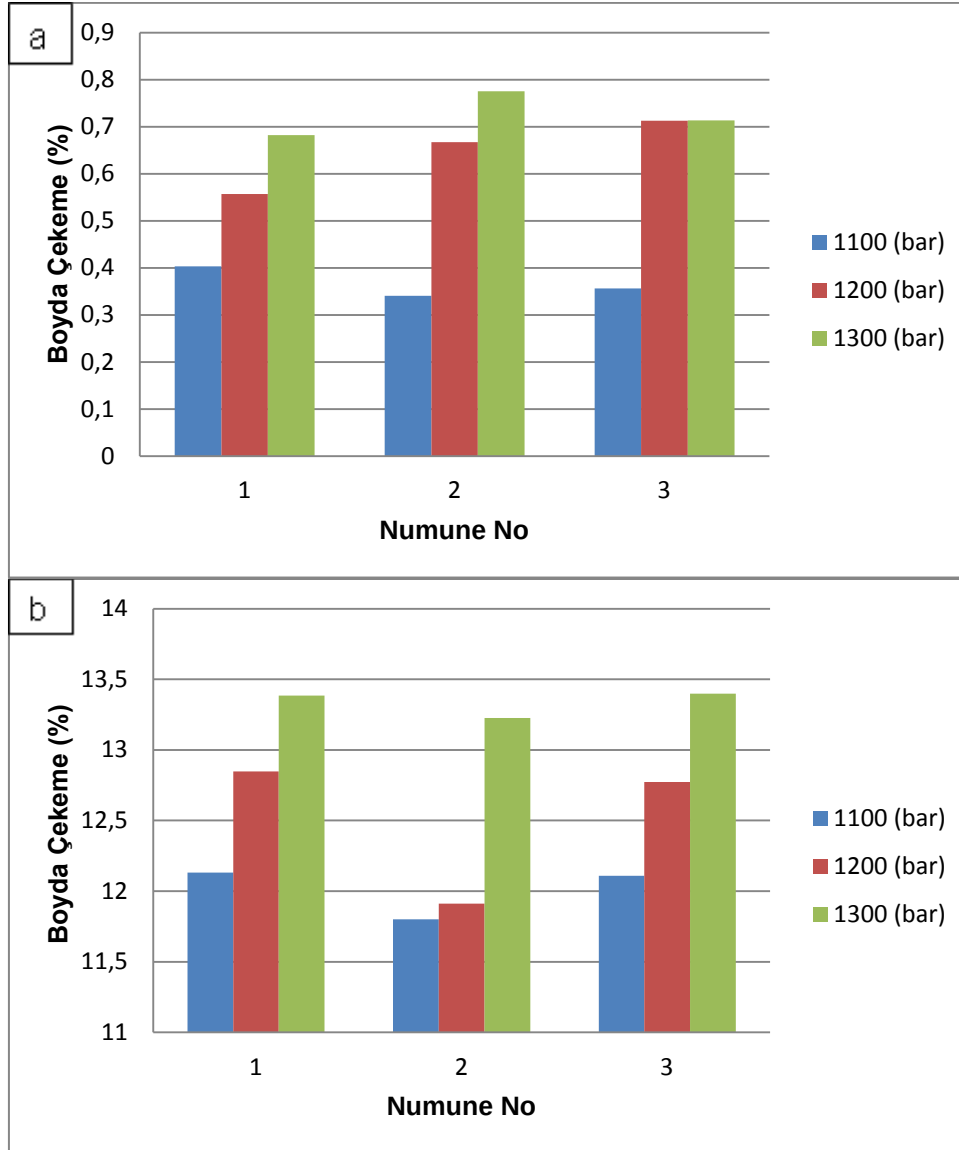
Toz cinsi	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)
Ti-6Al-7Nb	20	1300	60	140	60
Ti-6Al-4V	20	1100	60	140	60

Kalıplama esnasında yanlış seçilecek enjeksiyon basıncı değeri parçaların kusurlu çıkmasına sebep olur. Eğer enjeksiyon basıncı yüksek olur ise kalıp boşluğunun çok hızlı dolmasına dolayısı ile üründe gaz boşluklarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca enjeksiyon basıncının yüksek olması besleme stokunun püskürerek kalıp boşluğunu doldurmasına ve parçada kaynama çizgileri hatalarının oluşmasına neden olur. Parça üzerinde oluşan istenmeyen bu durumlar mekanik özelliklerin de azalmasına sebep olur (Lee ve diğerleri 2011). Yüksek enjeksiyon basıncı büyük gerilmelere ve parçada büyük oranda toz bağlayıcı ayrışması gibi bozulmalara neden olur (Luo ve diğerleri 2009). Ayrıca kalıplama esnasında enjeksiyon basıncı yüksek olur ise kalıpta oluşan kayma gerilmesi değerinde de artış meydana gelir. Kalıplama esnasında maksimum kayma gerilmesi girişlerde ve kalıp duvarlarında ortaya çıkar. Eğer oluşan kayma gerilmesi çok yüksek olur ise bağlayıcı sistemdeki polimer zincirinde kırılmalar meydana gelir (Lee ve diğerleri 2011). Bu durum da numunelerin mekanik özelliklerini azaltır. Bu çalışmada 1100 – 1200 – 1300 bar enjeksiyon basıncı değerlerinde parçalar üretilmiştir. Hacimce % 69 toz yüklemeli Ti-6Al-7Nb ve % 65 toz yüklemeli Ti-6Al-4V besleme stoklarında en yüksek çekme dayanımı için enjeksiyon basıncı değerleri sırası ile 1300 ve 1100 bar olarak tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan besleme stoklarında farklı enjeksiyon basınçlarının elde edilmesinin nedeni viskoziteleri arasındaki farktır (Çizelge 7.26). Viskozitelerin arasındaki fark ise besleme stoklarındaki toz yükleme oranlarından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 7.26. Besleme stoklarının enjeksiyon basıncı değerleri

Toz cinsi	Enj. Basıncı (bar)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Viskozite (Pa.s)
Hacimce %69 Ti-6Al-7Nb	1300	140	975,817
Hacimce %65 Ti-6Al-4V	1100	140	906,761

TEK esnasında kullanılan enjeksiyon basıncı parametresinin bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemi esnasında numunenin boyut değişimlerine etkisi çok fazladır (Luo ve diğerleri 2009). Yapılan deneylerde literatürde belirtildiği gibi bağlayıcı giderme işleminde ve sinterleme işleminde enjeksiyon basıncının artması ile boyutsal değişimin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7.27). Şekil 7.27'deki grafikte görüldüğü gibi Ti-6Al-7Nb numunelerde bağlayıcı giderme ve sinterleme işleminden sonra parçadaki ortalama boyda çekme oranı sırası ile % 0,36, % 12,01 (1100 bar), % 0,64, % 12,51 (1200 bar), % 0,72, %13,33 (1300 bar) olarak elde edilmiştir.



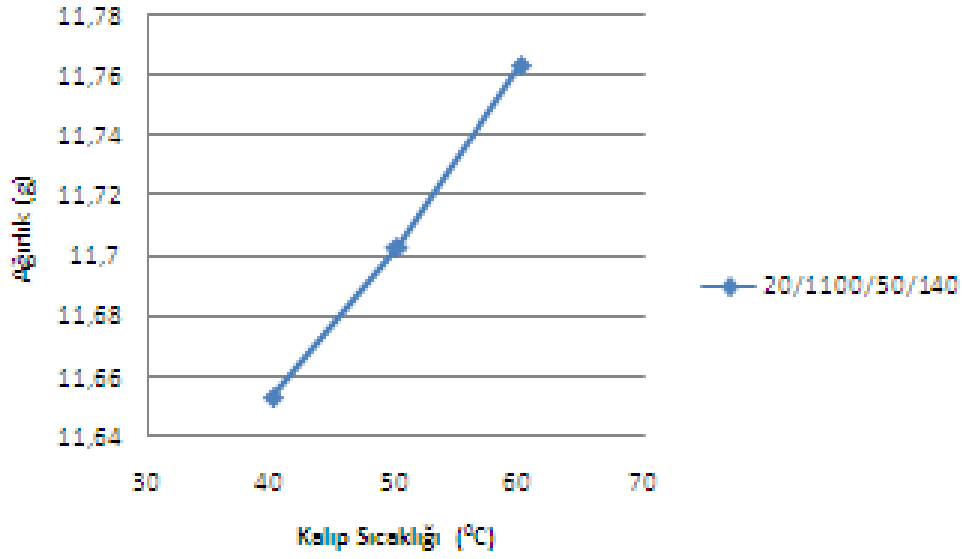
Şekil 7.27. % 69 Ti-6Al-7Nb toz yüklemeli besleme stokundan hazırlanmış numunelerin, a) Bağlayıcı giderme işleminden sonraki boyda çekme değerleri, b) Sinterleme işleminden sonraki boyda çekme değerleri

Besleme stoklarının yüksek debi ve enjeksiyon basınçlarında kalıplanmaları numunelerde toz ve bağlayıcı ayrışmasının oluşmasına da sebep olur. Eğer enjeksiyon debisi artar ise kalıplanan parçada yüzey gerilimleri yükselir ve parçada istenilmeyen çarpımların oluşmasına neden olur (Lee ve diğerleri 2011). Bu çalışmada 20 – 25 – 30 cm³/s debi değerinde üretilen parçalarda istenilmeyen çarpımlar oluşmamıştır. Ancak deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı 20 cm³/s debi değerinde elde edilmesinden dolayı bu değer uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

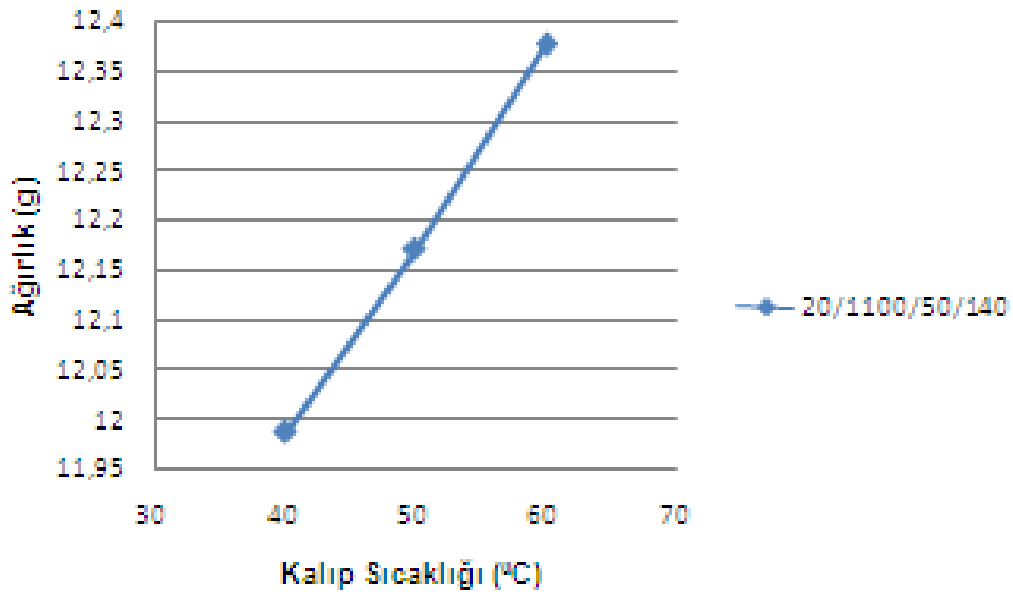
Kalıplama esnasında yüksek enjeksiyon sıcaklığı besleme stokunun taşınabilirliğini artırır ve kalıplama işlemini kolaylaştırır. Ancak yüksek enjeksiyon sıcaklığı kalıplama esnasında daha fazla enerji gereksinimi doğurur ve soğuma zamanını da arttırır (Luo ve diğerleri 2009). Yapılan bu çalışmada da seçilen enjeksiyon sıcaklıkları arasında en yüksek çekme dayanımı değeri 140 °C de tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek enjeksiyon sıcaklığı parçalarda büyük miktarda gerilmelerin oluşmasına neden olur. Oluşan bu gerilmelerde parça yüzeyinde çok fazla basit hataların meydana gelmesine sebep olur. Diğer taraftan yüksek enjeksiyon sıcaklığı sonucu oluşan gerilmeler sinterleme sonrası boyutsal değişiminde fazla olmasına neden olur (Luo ve diğerleri 2009). Bu çalışmada da 160 °C'de enjekte edilen Ti-6Al-4V (Ek-2 Şekil 1.1) ve Ti-6Al-7Nb (Ek-2 Şekil 1.2) numunelerde boyutsal değişim en yüksek seviyede olmuştur. Sonuç olarak optimum enjeksiyon sıcaklığı parametresinin 140 °C olarak tespit edilmesi kabul edilebilir bir değer olarak tespit edilmiştir.

Kalıplama parametrelerinden olan ütüleme basıncının parça üzerindeki etkisi önemlidir. Düşük ütüleme basınçları ham numunede gaz boşluğu ve çökmelere neden olmaktadır. Ütüleme basıncı; besleme stoku kalıbı doldurduktan sonra katılaşma esnasında oluşan boşlukları doldurmak için uygulanan basınç olarak tanımlanır. Ütüleme basıncı aşamasında kalıp boşluğuna gönderilmeye çalışılan ilave besleme stoku ile kalıplanan numunede soğuma esnasında görülen ısı gerilmelerin etkileri ortadan kaldırılır (Fu ve diğerleri 2005). Ancak ütüleme basıncı değerinin diğer enjeksiyon parametreleri ile ilişkili olarak değerlendirilmesi gereklidir. Örneğin ütüleme basıncının düşük olması ve kalıp sıcaklığının aşırı yüksek olması numunelerde bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada 40 – 50 – 60 °C kalıp sıcaklıkları ve % 50 – 60 – 70 ütüleme basıncı değerlerinde deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda optimum ütüleme basıncı değeri, 60 °C kalıp sıcaklığı için enjeksiyon basıncının %60'ı olarak tespit edilmiştir.

Kalıplama parametreleri içerisinde parçanın kusursuz olarak elde edilmesini sağlayan bir diğer parametre ise kalıp sıcaklığıdır. Yapılan çalışmada kalıp sıcaklığının artması ile elde edilen parçanın kütleinde artış olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.28 – Şekil 7.29).



Şekil 7.28. Ti-6Al-4V besleme stokundan 20 cm³/s / 1100 bar / % 50 / 140 °C kalıplama şartlarında üretilen parçaya kalıp sıcaklığının etkisi



Şekil 7.29. Ti-6Al-7Nb besleme stokundan 20 cm³/s / 1100 bar / % 50 / 140 °C kalıplama şartlarında üretilen parçaya kalıp sıcaklığının etkisi

Fu ve diğerleri (2005) yaptıkları çalışmada kalıp sıcaklığının artması ile kütle miktarının arttığını tespit etmişlerdir. Bunun nedeni olarak da besleme stokunun yüksek kalıp sıcaklığında erkenden donmamasından kaynaklandığını rapor etmişlerdir. Ayrıca düşük kalıp sıcaklığında besleme stokunun, enjeksiyon çevriminin ilk aşamalarında soğuk kalıp duvarı ile teması sonucu yolluk ve dağıtıcılarda erkenden donması sonucu istenilen özelliklerde parça

üretilemeyeceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da kalıp sıcaklığının artması ile kütle miktarında artış tespit edilmiştir. TEK’de kalıp sıcaklığının yüksek olması kalıplama esnasında karşılaşılan ısı dalgalanmalarını azalttığı için istenilen bir durumdur. Ayrıca kalıp sıcaklığının yüksek olması besleme stokunun reolojik özelliklerine olumlu yönde etki yapar (Wei ve diğerleri 2014). Bu çalışmada da besleme stokları ile 40 – 50 – 60 °C kalıp sıcaklıklarında yapılan deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri 60 °C’de elde edilmiştir.

7.10.2. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stoklarının optimum sinterleme parametrelerinin değerlendirilmesi

TEK yöntemi ile elde edilmiş ve sinterlenmiş parçanın mekanik özelliklerine parçanın yoğunluğunun etkisi çok fazladır. Literatürde yüksek yoğunluğa sahip parçaların en iyi mekanik özellikleri sağladığı bilinen bir gerçektir. Parçanın yoğunluğuna dolayısı ile mekanik özelliklere kalıplama parametreleri ile birlikte sinterleme sıcaklığı, süresi ve hızı gibi birçok parametre etki yapmaktadır (Luo ve diğerleri 2009).

Yapılan deneyler sonucunda Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stokları için Çizelge 7.27’deki sinterleme parametreleri optimum değerler olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 7.27. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb besleme stokları için optimum sinterleme parametreleri

Toz cinsi	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (h)	Sinterleme Hızı (°C / min)	Gaz Akış hızı (l/min)
Ti-6Al-7Nb	1250	1	1	5
Ti-6Al-4V	1250	1	1	10

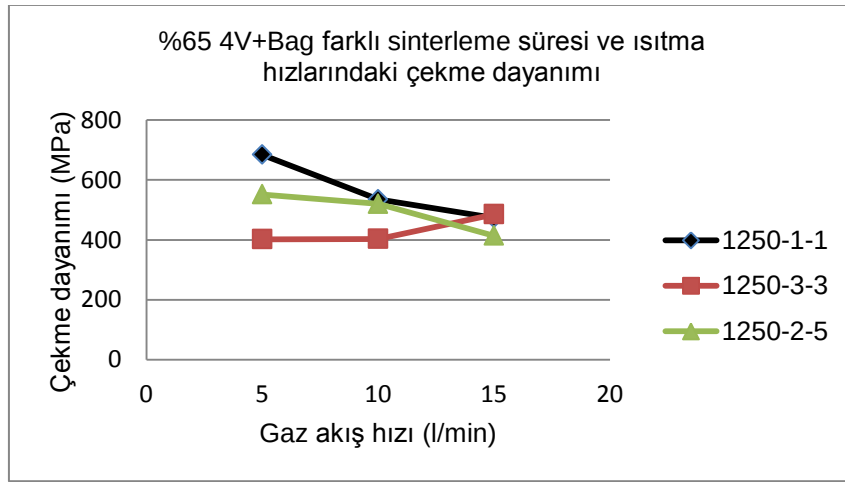
Literatürde sinterlemeye yönelik yapılan çalışmaların temel hedefi sinterleme süresi ve sıcaklığını azaltmaya yöneliktir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşmanın hızı düşer ve tane büyümesinin hızı artar ve oluşan bu yapıya sahip parçanın mekanik özellikleri azalır (German (1996/2014)). Çalışmamızda da optimum sinterleme sıcaklığı değeri 1250 °C olarak tespit edilmiş ve en yüksek çekme dayanımı değerleri bu sıcaklıkta elde edilmiştir.

Uzun sinterleme süreleri sinterleme yoğunluğunda bir düşüşe neden olur. Birleşme aracılığı ile kontrol edilen gözenek büyümesi de gözlemlenir. Daha küçük olan gözeneklerdeki ortam, büyük olanlardan daha fazla çözünürlüğe sahiptir. Farklı çözünürlüklerin bir sonucu olarak büyük gözenekler, küçük gözeneklerin aleyhine olmak üzere büyürler ve bu da ortalama gözenek boyutunda net bir artışa ve gözenek basıncında da bir düşüşe neden olur. Bu yüzden yoğunluk uzun sinterleme süreleri ile birlikte azalır (German (1996/2014)). Bu çalışmada da 1 – 2 – 3 saat olmak üzere üç farklı sürede parçalar sinterlemiş ve deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değerleri sinterleme süresi 1 saat olan numunelerde elde edilmiştir.

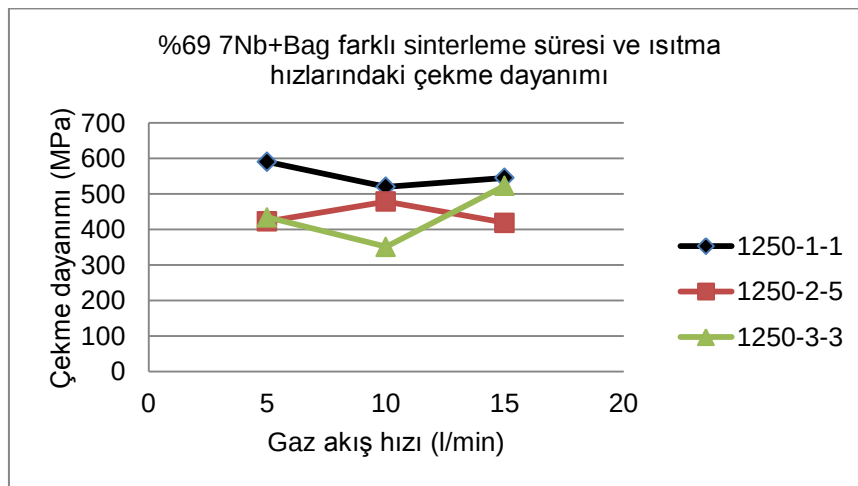
Obasi ve diğerleri (2010) yüksek sinterleme sıcaklığı ve uzun sinterleme süresinin parçanın mikroyapısında tane büyümesine neden olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında tane büyümesinin mekanik özellikleri azalttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da düşük sıcaklık (1250 °C) ve kısa sürede (1 saat) sinterlenen parçalarda en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir.

Sinterleme esnasında ısıtma hızı mikroyapının gelişimini kontrol etmede önemlidir. Düşük sıcaklıklarda yüzey difüzyonu tipik olarak sinterlemeye baskın çıkar. Bu da yoğunlaşma olmadan bağ oluşumunu oluşturur. Yoğunlaşma olmadan bağ oluşumunu elde etmek yapıda irileşme olmadan yüksek yoğunluk elde edilmesini sağlar. Mikroyapıda bu durumun oluşması ısıtma hızı ile yakın ilişki içerisinde. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda hızlı ısıtmanın ham parçaya zarar verdiği belirlenmiştir. Hızlı ısıtma sonucunda parçanın köşelerinin düz yüzeylerden daha hızlı ısınmasına sebep olduğu ve bunun sonucunda köşelere yakın yerlerde daha fazla gerilme meydana getirdiği tespit edilmiştir. Parçada oluşacak bu gerilmelerin istenilmeyen kusurların (çatlakların v.s.) oluşmasına sebep olduğu belirlenmiştir (German (1996/2014)). Thian ve arkadaşları (2001) Ti-6Al-4V alaşım tozundan TEK yöntemi ile hazırladıkları numunelerin ısıl bağlayıcı giderme şartlarını inceledikleri çalışmalarında bağlayıcı sistemin problemsiz bir şekilde uzaklaştırılması için ısıtma hızının düşük tutulması gerektiğini rapor etmişlerdir. Literatürde titanyumun bağlayıcı sistem ile 350 °C'nin üstünde tepkimeye girerek titanyum karbür oluşturduğu belirtilmektedir. Ayrıca karbür oluşumunun yanı sıra hızlı bir şekilde bağlayıcının giderilmesi karbon kirliliği, is oluşumu, yüzey hatası

veya renk bozukluğuna yol açtığı rapor edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı yavaş ısıtma bağlayıcıyı gidermenin en iyi yol olduğu belirtilmiştir (Türker ve diğerleri 2007). Bu çalışmada da tespit edilen optimum ısıtma hızı ($1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$) değerinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stoklarından $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ sinterleme sıcaklığında, farklı sinterleme süreleri (1-2-3 saat) ve farklı ısıtma hızlarında ($1-3-5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$) elde edilen çekme dayanımı sonuçları şekil 7.30 ve 7.31’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda sinterleme süresi, ısıtma hızı ve gaz akış miktarı azaldıkça çekme dayanımının arttığı belirlenmiştir.



şekil 7.30. Ti-6Al-4V numunelerin çekme dayanımları



şekil 7.31. Ti-6Al-7Nb numunelerin çekme dayanımları

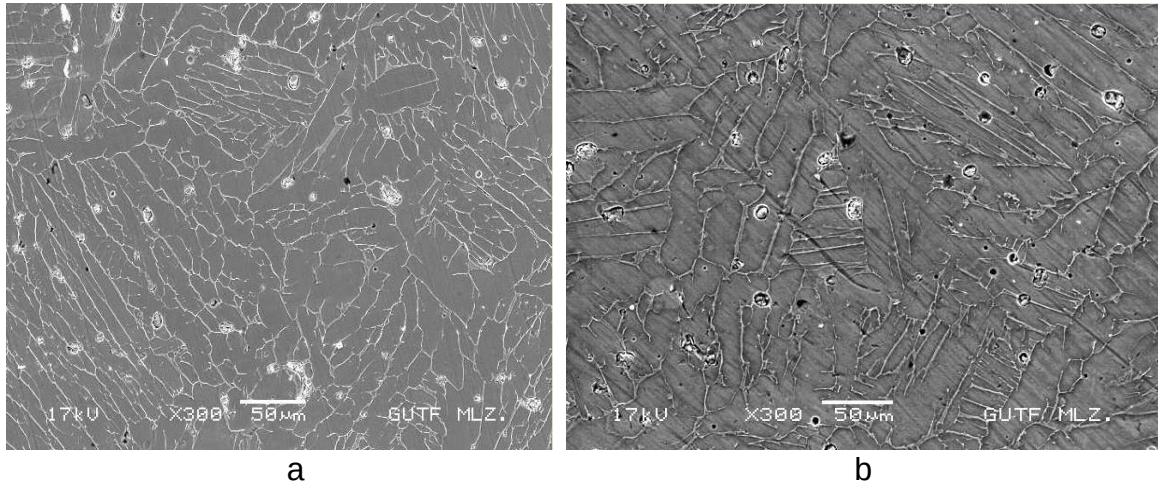
Sinterleme atmosferi, sinterleme derecesi ve besleme stokunun kimyasal yapısı ile ilişkilidir. Sinterleme esnasında ortam sabit değildir. Besleme stoku ile birlikte kirleticiler sinterleme fırınına taşınırlar. Isıtma esnasında besleme stokunda bulunan kirleticiler fırın atmosferindeki bileşimi değiştirirler. Bu yüzden sadece atmosfer türü değil aynı zamanda gazın akış hızı, sinterleme sıcaklığı, tozun türü ve kullanılan bağlayıcı sistem elemanları önemlidir çünkü bu faktörler fırın içinde oluşan ortamın anlık bileşimini belirler. Sinterleme esnasında ortama gönderilen gazın ortam kirleticilerini uzaklaştırarak temizleyici görev yapması istenir. Ayrıca sinterleme esnasında ortama gönderilen gazın maliyeti her zaman dikkate alınması gereken bir konudur (German (1996/2014)). Bu nedenlerden dolayı çalışmamızda sinterleme ortamına gönderilecek gazın optimize edilmesine çalışılmıştır. Taguchi deney tasarımı sonucu yapılan deneyler sonucunda Ti-6Al-7Nb besleme stoku için 5 l/min, Ti-6Al-4V besleme stoku için 10 l/min, gaz akış hızlarında en yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Literatürde de sinterleme ortamına gönderilen gaz miktarına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Limberg ve diğerleri (2012) TEK yöntemi ile elde ettikleri parçaları 1500 °C de ve 10 kPa, 30 kPa ve 80 kPa olmak üzere üç farklı argon atmosferinde sinterlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda en fazla boşluklu yapının 80 kPa argon atmosferinde sinterlenen parçalarda oluştuğunu belirlemişlerdir. Bunun nedeni olarak sinterleme esnasında toz partikülleri arasında argon gazının sıkışmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca sinterleme süresinin boşluklu yapının oluşmasında etkili bir faktör olmadığını rapor etmişlerdir. Çalışmamızda da fırın içerisine gönderilen gaz miktarının elde edilen çekme dayanımı değerine etkisi olduğu görülmüştür. Çalışmada optimum argon gazı değerleri Ti-6Al-7Nb besleme stoku için 5 l/min Ti-6Al-4V besleme stoku için 10 l/min olarak tespit edilmiştir. Belirlenen değerlerin besleme stoklarındaki toz oranlarının dolayısı ile bağlayıcı miktarlarının farklı olmasından, fazla bağlayıcı olanda gaz akışı da fazla olmuştur.

Gerling ve diğerleri (2006) argon gazı ile 300 ve 900 mbar basınç altında sinterleme yaptıkları numunelerdeki boşluk miktarını tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda 900 mbar basınç altında yaptıkları numunelerde yüksek miktarda boşluk olduğunu belirlemişlerdir. Bunun sebebi olarak yüksek argon basıncı altın yapılan sinterleme esnasında yapıda bulunan açık gözeneklerin çok kısa sürede kapanarak içlerinde argon gazının sıkışmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada da sinterleme ortamına gönderilen gaz miktarının numunenin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki yapmadığı tespit edilmiştir.

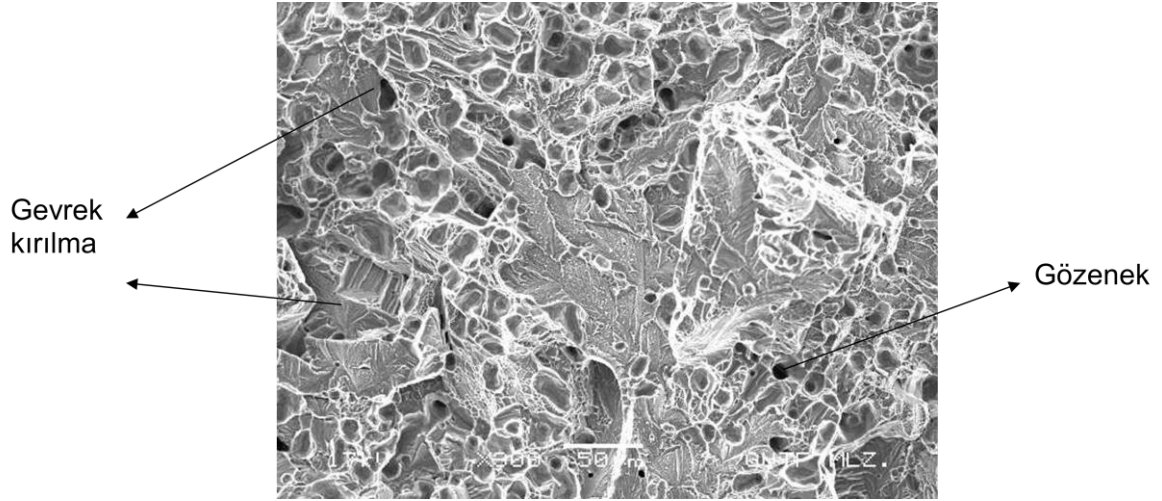
7.10.3. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Resim 7.14-7.15’de Ti-6Al-4V besleme stokundan elde edilmiş numunelerin SEM ve kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde numunelerde $\alpha+\beta$ fazının olduğu görülmektedir. Fakat çekme dayanımı 134 MPa olan numunede boşluk miktarının fazla olduğu görülmektedir. Boşluk miktarındaki farklılık çekme dayanımı değerleri arasındaki farkı net bir şekilde ortaya koymaktadır.



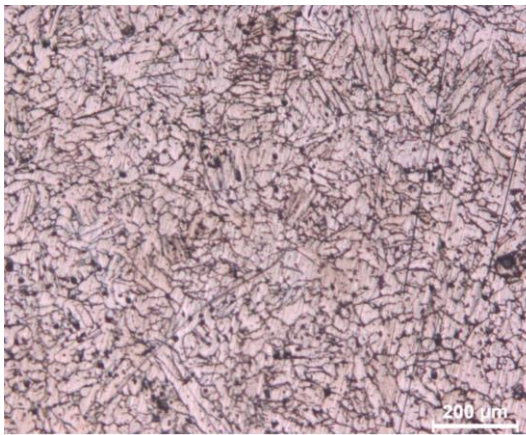
Resim 7.14. Ti-6Al-4V numunelerin SEM görüntüleri, a) Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş numune (711,79 MPa), b) En düşük çekme dayanımın elde edildiği numune (134 MPa)

Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş Ti-6Al-4V numunenin kırık yüzey görüntüsü sonucunda sinterlemenin olduğu görülmektedir. Numunenin yapısında 10 μm dan küçük gözenekler bulunmaktadır. Ayrıca tane sınırları boyunca sünek, kristal boyunca kırılma görülmektedir.

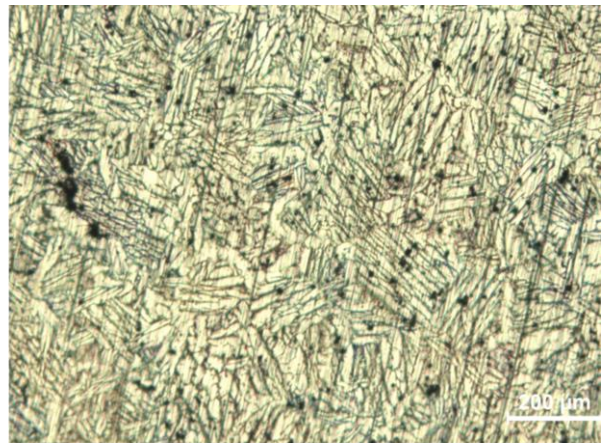


Resim 7.15. Optimum parametrelerde Ti-6Al-4V besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (711,79 MPa) kırık yüzey görüntüsü

Resim 7.16'da Ti-6Al-7Nb besleme stokundan elde edilmiş numunelerin optik mikroskop Resim 7.17-7.18'de SEM ve kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde 631,12 MPa ve 210 MPa çekme dayanımı elde edilen numunelerde $\alpha+\beta$ fazının olduğu kolonlu yapı görülmektedir. Ayrıca çekme dayanımı 210 MPa olan numunede boşluk miktarının fazla olduğu görülmektedir. Boşluk miktarındaki farklılık çekme dayanımı değerleri arasındaki farkı ortaya koymaktadır.



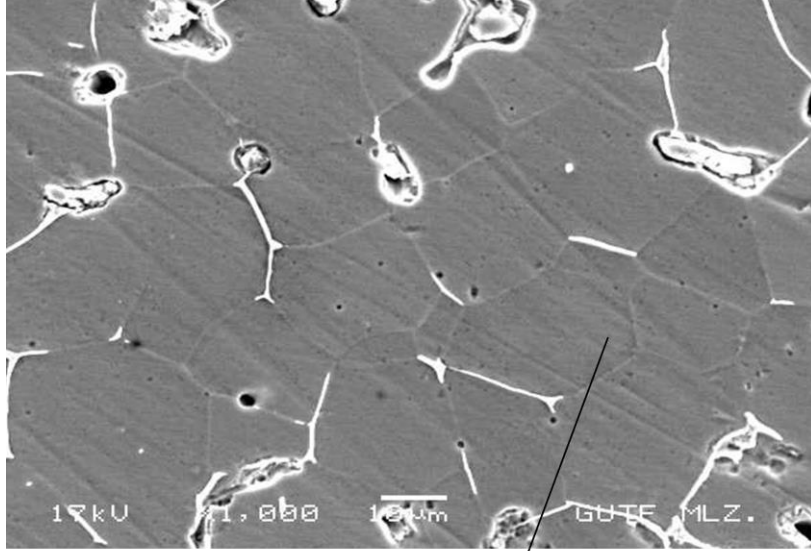
(a)



(b)

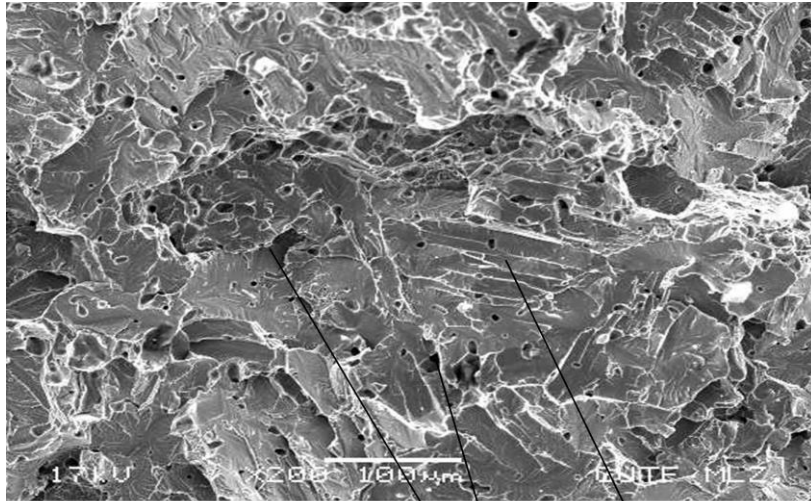
Resim 7.16. Ti-6Al-7Nb numunelerin optik mikroskop görüntüleri, a) Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş numune (631,12 MPa), b) En düşük çekme dayanımının elde edildiği numune (210 MPa)

Optimum parametrelerde kalıplanmış ve sinterlenmiş Ti-6Al-7Nb numunenin kırık yüzey ve SEM görüntüleri sonucunda sinterlemenin olduğu görülmektedir.



Sinterleme sonrası
tanelerin birleşmesi

Resim 7.17. Optimum parametrelerde Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (631,12 MPa) SEM görüntüsü



Gözenek

Tabakalar
arası kırılma

Resim 7.18. Optimum parametrelerde Ti-6Al-7Nb besleme stokundan üretilmiş ve 1250 °C de 1 saat sinterlenmiş numunenin (631,12 MPa) kırık yüzey görüntüsü

Literatürde yapılan çalışmalarda da Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşım tozları kullanılarak üretilen parçalarda gevrek kırılma olduğu rapor edilmiştir (Sidambe 2010, Haoming 2009, Zhao 2013). Ayrıca Obasi ve diğerlerinin (2010) Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanarak yaptıkları çalışmada parçaların mikro yapılarında beyaz kısımların β fazı, siyah kısımların ise α fazı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da aynı α ve β fazına sahip mikro yapı elde edilmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşım tozlarından besleme stokları hazırlanmıştır. Bu stoklar kullanılarak TEK yöntemi ile çekme deney numuneleri üretilerek optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda;

- TEK işleminde kullanılan bağlayıcı sistemin çok elemanlı olması parçanın deformasyona uğramadan üretim adımlarını geçmesini sağlamıştır.
- Geliştirilen bağlayıcıda viskozitesinin düşük olması ($< 20 \text{ Pa.s}$) besleme stoklarındaki toz miktarını arttırmıştır.
- Ti-6Al-4V numunelerden elde edilen çekme oranı ve çekme dayanımı sonuçları MPIF 35 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir.
- 13 ila 1154 s^{-1} arasında değişen kayma hızlarında ve $130 - 140 - 150 - 160 - 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lerde yapılan reoloji deneyleri sonucunda hazırlanan besleme stokları için en uygun enjeksiyon sıcaklıklarının $140 - 150 - 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu belirlenmiştir.
- Reoloji deneyleri sonucu Ti-6Al-4V besleme stokları için kritik toz yükleme değerleri % 67, optimum toz yükleme değerleri % 65 olarak tespit edilmiştir.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerini veren enjeksiyon sıcaklığının $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu tespit edilmiştir.
- Reoloji deneyleri sonucu Ti-6Al-7Nb besleme stokları için kritik toz yükleme değerleri % 71, optimum toz yükleme değerleri % 69 olarak tespit edilmiştir.
- Ti-6Al-4V besleme stokunun optimum toz yükleme değeri hacimce % 65 için elde edilen viskozite $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $906,7 \text{ Pa.s}$, akış davranış indeksi 0,699, akış aktivasyon enerjisi $18,28 \text{ kJ/mol}$, kalıplanabilirlik indeksi $189 \text{ Pa}^{-1}.\text{K}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.
- Ti-6Al-7Nb besleme stokunun optimum toz yükleme değeri hacimce % 69 için elde edilen viskozite $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $975,8 \text{ Pa.s}$, akış davranış indeksi 0,533, akış aktivasyon enerjisi $67,97 \text{ kJ/mol}$, kalıplanabilirlik indeksi $525 \text{ Pa}^{-1}.\text{K}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

- Hazırlanan besleme stokları için en uygun çözücünün heptan olduğu belirlenmiştir.
- Parça üretiminde farklı toz oranlarından dolayı oluşan viskozite farkları enjeksiyon basıncını da değiştirmiştir. Hacimce % 65 Ti-6Al-4V besleme stoku viskozitesi (906,7 Pa.s) için 1100 bar en uygun enjeksiyon basıncı olarak belirlenirken; hacimce % 69 Ti-6Al-7Nb besleme stoku viskozitesi (975,8 Pa.s) için 1300 bar olduğu belirlenmiştir.
- Besleme stokları kalıplanırken enjeksiyon basıncı arttıkça çekme oranı artmıştır. 1100 bar için çekme oranı % 12,85 olurken, 1300 bar için % 15,01 olduğu tespit edilmiştir.
- Besleme stoklarındaki toz oranı arttıkça enjeksiyon basıncı değeri artmaktadır.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerini veren enjeksiyon debisi değerinin $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ olduğu tespit edilmiştir.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerini veren ütüleme basıncı değerinin enjeksiyon basıncının % 60'ı olduğu tespit edilmiştir.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerini veren kalıp sıcaklığı değerinin 60°C olduğu belirlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile yapılan deney tasarımında sinterleme sıcaklığının en önemli parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Sinterleme işleminin yüksek sıcaklıkta yapılmasının istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesine fayda sağlamadığı belirlenmiştir.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerine 1250°C 'de ve 60 dakika sinterleme süresinde ulaşılmıştır.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stokları için en yüksek çekme dayanımı değerini elde etmek için sıcaklık artış hızının $1^\circ\text{C}/\text{min}$ olması gerektiği tespit edilmiştir.
- Bağlayıcı oranı arttıkça sinterleme ortamına gönderilecek gaz miktarının artması gerektiği belirlenmiştir. % 31 bağlayıcı içeren besleme stokunda 5 l/min, % 35 bağlayıcı içeren besleme stokunda 10 l/min gaz akış hızı kullanılması ile en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir.

- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stoklarından optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerinde hazırlanan numunelerde sırası ile en yüksek 711,79 MPa ve 631,12 MPa çekme dayanımları elde edilmiştir.
- Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb tozu ile hazırlanan besleme stoklarından üretilen parçalarda bağlayıcı giderme sonrası boyda çekme sırası ile % 0,59 ve % 0,53 olduğu belirlenmiştir.
- Yüksek saflıkta argon gazı ile sinterleme yapılarak Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb besleme stoklarından çekme dayanımı yüksek parçalar elde edilebileceği tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda;

- Çekme dayanımına sinterleme sonrası soğutma hızının etkisinin araştırılması,
- Yeni bir bağlayıcı sistem ile optimum kalıplama ve sinterleme parametreleri araştırılabilir,
- Argon gazından farklı bir atmosferde sinterleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aggarwal, G., Park, S. J. and Smid, I. (2006). Development of niobium powder injection molding: Part I. feedstock and injection molding. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 24, 253-262.
- Aggarwal, G., Smid, I., Park, S.J. and German, R. M. (2007). Development of niobium powder injection molding. Part II: debinding and sintering. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 25, 226-236.
- Ahn, S., Park, S.J., Lee, S., Atre, S.V. and German, R.M., (2009). Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process. *Powder Technology*, 193, 162-169.
- Ahn, S., Chung, S.T., Atre, S.V., Park, S.J. and German, R.M. (2008). Integrated filling, packing, and cooling cae analysis of powder injection molding parts. *Powder Metallurgy*, 51(4), 318-326.
- Aust, E., Limberg, W., Gerling, R., Oger, B. and Ebel, T. (2006). Advanced TiAl6Nb7 bone screw implant fabricated by metal injection moulding. *Advanced Engineering Materials*, 8 (5), 365-370.
- Bidaux, J.-E., Closuit, C., Rodriguez-Arbaizar, M. and Carreño-Morelli, E. (2011). Metal injection moulding of ti-nb alloys for implant application. *European Cells and Materials*, 22 (4), 32.
- Carreau, P.J., Kee, D.C.R.D. and Chhabra, R.P. (1997). *Rheology Of Polymeric Systems*.(1). Cincinnati/USA:Hanser/Gardner Publications, 1-132.
- Chen, G., Cao, P., Wen, G. and Edmonds, N. (2013). Debinding behaviour of a water soluble PEG/PMMA binder injection molding. *Materials Chemistry and Physics*, 139, 557-565.
- Chen, L., Li T., Li, Y., He, H. and Hu, Y. (2009). Porous titanium implants fabricated by metal injection molding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 1174-1179.
- Chen, R.H., Ho, C.H. and Fan, H.C. (2004). Shrinkage properties of ceramic injection moulding part with a step-contracted cross-section in the filling direction. *Ceramics International*, 30, 991-996.
- Chunxiang, C., BaoMin, H., Lichen, Z. and Shuangjin, L. (2011). Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials and Design*, 32, 1684-1691.
- Edirisinghe, M.J., Evans, J.R.G. (1987). Properties Of Ceramic Injection Moulding Formulations, Part 1 Melt Rheology. *Journal Of Material Science*, 22, 269-277.

- Ergül, E., Gülsoy, H.Ö. and Günay, V. (2009). Effect of sintering parameters on mechanical properties of injection moulded Ti-6Al-4V alloys. *Powder Metallurgy*, 52(1), 65-71.
- Ergüney, M. S. (2005). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Kullanılan Besleme Stoklarının Kalıplanabilirliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-59.
- Ferri, O.M. (2010). *Optimisation of Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Alloy Components Fabricated by Metal Injection Moulding*, Doktora Tezi, Technischen Universität Hamburg GKSS Research Center, Hamburg, 1-19.
- Ferri, O.M., Ebel, T. and Bormann, R. (2010). Influence of surface quality and porosity on fatigue behaviour of Ti-6Al-4V components processed by MIM. *Materials Science and Engineering A*, 527, 1800-1805.
- Ferri, O.M., Ebela, T. and Bormann, R. (2009). High cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V fabricated by metal injection moulding technology. *Materials Science and Engineering A*, 504, 107-113.
- Fine, L.W. and Beall, H. (1990). *Chemistry For Engineers And Scientists*.(1). Chicago/ABD:Saunders College Publishing, 1006-1007.
- Froes, F.H.S., Chen, E.Y., Boyer, R.R., Taleff, E.M., Lu, L., Zhang, D.L., Ward-Close, C.M. and Eliezer, D.(Editörler). (2002). *High Performance Metallic Materials For Cost Sensitive Applications*, Seattle, Washington:TMS, 129-136.
- Fu, G., Loh N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. and Maeda, R. (2005). Effects of injection molding parameters on the production of microstructures by micropowder injection molding. *Materials and Manufacturing Processes*, 20, 977-985.
- Galio, A.F. and Schaeffer, L. (2006). Characteristics of titanium parts produced by powder injection moulding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220, 783-786.
- Geçkinli, A.E. (1992). *İleri Teknoloji Malzemeleri*.(1). İstanbul/Türkiye:İ.T.Ü. Matbaası, 10-50.
- Gerling, R., Schimansky, F.P. (2002). Prospects for metal injection molding using a gamma aluminide based alloy powder. *Materials Science and Engineering A*, 329(331), 45-49.
- Gerling, R., Aust, E., Limberg, W., Pfuff M. and Schimansky F.P. (2006). Metal injection moulding of gamma titanium aluminide alloy powder. *Materials Science and Engineering A*, 423, 262-268.

- German, R.M. (1990). *Powder Injection Molding*.(1). Pennsylvania/USA: Metal Powder Industries Federation, 50-300.
- German, R.M. (2013). Progress in Titanium Metal Powder Injection Molding. *Materials*, 6, 3641-3662.
- German, R.M. (2014). *Sintering Theory And Practice*. (Çev. H. Ö. Gülsoy). Ankara:Nobel. (Eserin orijinali 1996'da yayımlandı), 1-534.
- German, R.M. and Bose, A. (1997). *Injection Molding of Metals and Ceramics*.(1). New Jersey/USA: Metal Powder Industries Federation, 25-219.
- Gökten, M., (2003). *Steatit ve 316L Paslanmaz Çelik Tozları ile PEG Ağırlıklı Reçinelerden Meydana Gelen Besleme Stoklarının Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 39-42,53-60.
- Guo, S., Qu X, Xiang, J., Zhang, R., He X., Li, M, Duo, S. and Li, W. (2006). Effect of annealing processing on microstructure and properties Of Ti-6Al-4V alloy by powder injection molding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 701-704.
- Hamzaçebi, Ç. (2000). *Kalite Yönetiminde Taguchi Felsefesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-120.
- Haoming, Z., Xinbo, H., Xuanhui, Q. and Liming, Z. (2009). Microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl alloy parts fabricated by metal injection molding. *Materials Science and Engineering A*, 526 (), 31-37.
- Hartwig, T., Veltl, G., Petzoldt, F., Kunze, H., Scholl, R. and Kieback, B. (1998). Powders for metal injection molding. *Journal of the European Ceramic Society*, 18, 1211-1216.
- Heaney, F.D.,(Editörler) (2012). *Handbook of Metal Injection Moulding*,Cambridge:Woodhead Publishing, 27-441.
- Henriquesa, V.A.R., Camposa, P.P., Cairoa, C.A.A. and Bressiani, J.C. (2005). Production of titanium alloys for advanced aerospace systems by powder metallurgy. *Materials Research*, 8(4), 443-446.
- Huang, B. and Qu, X. (1999). Viscosity and melt rheology of metal injection molding feedstocks. *Powder Metallurgy*, 42, 86-90.
- Huang, B., Liang, S. and Qu, X. (2003). The rheology of metal injection molding. *Journal Of Material Processing Technology*, 137, 132-137.
- Ibrahim, R., Azmirruddin, M., Jabir, M., Ismail, M.R., Muhamad M., Awang R. and Muhamad S. (2010). Injection molding of titanium alloy implant for biomedical application using novel binder system based on palm oil derivatives. *American Journal of Applied Sciences*, 7(6), 811-814.

- Ivasyshyn, O.M., Aleksandrov, A.V. (2008). Status of the titanium production, research, and applications in the CIS. *Materials Science*, 44(3), 311-327.
- Karataş, Ç. (1997). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 212-239.
- Karataş, Ç. ve Sarıtaş, S. (2001). Effect of powder hardness and particle size on the densification of cold isostatically pressed powders. *International Journal of Powder Metallurgy*, 37(8), 39-44.
- Karataş, Ç. ve Türker, M. (2004). Investigation of rheological properties of mechanically alloyed and turbula processed composite powder PIM feedstock by capillar rheometer. *Powder Metallurgy*, 47(1), 49-54.
- Karataş, Ç., Koçer, A., Ünal, H.İ. ve Sarıtaş, S. (2004). Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders. *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 77-83.
- Karataş, Ç., Sarıtaş, S., (1998). Toz Enjeksiyon Kalıplama : Bir ileri teknoloji imalat metodu. *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der.*, 13,(2),193.
- Khakbiz, M., Simchi, A. and Bagheri, R. (2005). Analysis of the rheological behavior and stability of 316L stainless steel-TiC powder injection molding feedstock. *Materials Science and Engineering A*, 407, 105-113.
- Kobayashi, E., Wang, T.J., Doi, H., Yoneyamat, T. and Hamanaka, H. (1998). Mechanical properties and corrosion resistance of Ti-6Al-7Nb alloy dental castings. *Journal Of Materials Science: Materials In Medicine*, 9, 567-574.
- Lee, S.W., Ahn, S., Whang, C.J., Park, S.J., Atre, S.V., Kim, J. and German, R.M. (2011). Effects of process parameters in plastic, metal, and ceramic injection molding processes. *Korea-Australia Rheology Journal*, 23(3), 127-138.
- Leyens, C., Peters, M. (2003). *Titanium And Titanium Alloys*.(1). Weinheim/Germany:Wiley-VCH, 1-36.
- Li, Y., Chou, X.M. and Yu, L. (2006). Dehydrogenation debinding process of MIM titanium alloys by TiH₂ powder. *Powder Metallurgy*, 49(3), 236-239.
- Li, Y., Li, L. and Khalil, K.A. (2007). Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 432-439.
- Limberg, W., Ebel, T., Pyczak, F., Oehring, M. and Schimansky, F.P. (2012). Influence of the sintering atmosphere on the tensile properties of MIM-processed Ti 45Al 5Nb 0.2B 0.2C. *Materials Science and Engineering A*, 552, 323-329.

- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B. and Khor, K.A. (2003). Characterization of powder injection molding feedstock. *Materials Characterization*, 49, 313-320.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B., Khor, K.A., Murakoshi Y. and Maeda R. (2001). Binder system for miropowder injection molding. *Materials Letters*, 48, 31-38.
- Loh, N.H., Tor, S.B., Tay, B.Y., Murakoshi, Y. and Maeda, R. (2007). Fabrication of micro gear by micro powder injection molding. *Microsyst Technol*, 14, 43-50.
- Loh, N.H., Tor, S.B. and Khor, K.A. (2001). Production of metal matrix composite part by powder injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 398-407.
- Luo, T.G., Qu, X.H., Qin, M.L. and Ouyang, M.L. (2009). Dimension precision of metal injection molded pure tungsten. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27, 615-620.
- Maron, S.H., Pierce, P.E. (1956). Application of ree-eyring generalized flow theory to suspensions of spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 11, 80-95.
- MPFI Standart 35 (2000). Materials Standards for Metal Injection Molded Parts, *Metal Powder Industries Federation*, Approved 2007.
- MPFI Standart 50 (1992). Metal Enjeksiyon Kalıplamada Bağlayıcı Giderme Ve Sinterlemede Çekme Testi Specimenleri İçin Metot, *Metal Powder Industries Federation*, Approved 1991.
- Niinomi, M. (2003). Fatigue Performance And Cyto-Toxicity Of Low Rigidity Titanium Alloy, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr. *Biomaterials*, 24, 2673-2683.
- Nora, N.H.M., Muhamad, N., Ihsan, A.K.A.M. and Jamaludin, K.R. (2013). Sintering parameter optimization of ti-6al-4v metal injection molding for highest strength using palm stearin binder. *Procedia Engineering*, 68, 359-364.
- Nyberg, E., Miller, M., Simmons, K. and Weil, K.S. (2005). Microstructure and mechanical properties of titanium components fabricated by a new powder injection molding technique. *Materials Science and Engineering C*, 25, 336-342.
- Obasi, G.C., Ferri, O.M., Ebel, T. and Bormann, R. (2010). Influence of processing parameters on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by MIM. *Materials Science and Engineering A*, 527, 3929-3935.
- Oshida, Y. (2007). *Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials*.(1). Oxford/United Kingdom:Elsevier Science, 11-20.
- Qian, M. (2010). Cold compaction and sintering of titanium and its alloys for near-net-shape or preform fabrication. *International Journal of Powder Metallurgy*, 46(5), 29-44.

- Ratner, B.D., Johnston A.B. and Lenk T.J. (1987). Biomaterials surfaces. *Journal of Biomedical Materials Research*, 21, 59-90.
- Razaa, M.R., Ahmad, F., Omar, M.A. and German, R.M. (2012). Effects of cooling rate on mechanical properties and corrosion resistance of vacuum sintered powder injection molded 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 164-170.
- Reddy, J.J., Ravi, N. and Vijayakumar, M. (2000). A simple model for viscosity of powder injection moulding mixes with binder content above powder critical binder. *Journal of the European Ceramic Society*, 20, 2183-2190.
- Rhee, B.O. (1992). *Processing Behavior of Powder/Binder Mixture in Powder Injection Molding Binder Separation and Quick Freezing*, Doktora Tezi, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 10-166.
- Setasuwan, P., Bunchavimonchet, A. and Danchaivijit, S.(2008). The effects of binder components in wax/oil systems for metal injection molding. *Journal Of Materials Processing Technology*, (196), 94-100.
- Shibo, G., Bohua, D., Xinbo, E. and Xuanhui, Q. (2009). Powder injection molding of pure titanium. *Rare Metals*, 28 (3), 261-265.
- Shibo, G., Xuanhui, Q., Xinbo, H., Ting, Z. and Bohua, D. (2006). Powder injection molding of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 173, 310-314.
- Sidambe, A.T., Figueroa, A., Hamilton, H. and Todd, I. (2009, 12 - 14 October). *Sintering Study of CP-Ti and Ti6V4Al Metal Injection Moulding Parts Using Taguchi Method*. Euro PM2009, Copenhagen.
- Sidambe, A.T., Figueroa, I.A., Hamilton, H. And Todd, I. (2010). Metal injection moulding of Ti-64 components using a water soluble binder. *Powder Injection Moulding International*, 4(4), 56-62.
- Sidambe, A.T., Figueroa, I.A., Hamilton, H.G.C. and Todd, I. (2011). Taguchi optimization of MIM titanium sintering. *International Journal of Powder Metallurgy*, 47(6), 21-27.
- Sotomayor, M.E., Várez, A. and Levenfeld, B. (2010). Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks. *Powder Technology*, 200, 30-36.
- Supati, R., Loh, N.H., Khor, K.A. and Tor, S.B. (2000). Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding. *Materials Letters*, 46, 109-114.
- Subaşı, M., Karataş, Ç. (2012). Titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme. *Politeknik Dergisi*, 15(2), 81-97.

- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y. (2005). Taguchi's Quality Engineering Handbook.(1). New Jersey/USA:John Willey & sons inc., 15-120.
- Thavanayagam, G., Pickering, K.L., Swan, J.E. and Cao, P. (2015). Analysis of rheological behaviour of titanium feedstocks formulated with a water-soluble binder system for powder injection moulding. *Powder Technology*, 269, 227-232.
- Thian, E.S., Loh, N.H., Khor, K.A. and Tor, S.B. (2001). Effects of debinding parameters on powder injection molded Ti-6Al-4V/HA composite parts. *Advanced Powder Technology*, 12(3), 361-370.
- Thian, E.S., Loh, N.H., Khor, K.A. and Tor, S.B. (2002). Ti-6Al-4V/HA composite feedstock for injection molding. *Materials Letters*, 56, 522-532.
- TS 2305 (1976). Sinterlenmiş Geçirgen Metal Malzeme-Yoğunluk ve Açık Gözenekliliğin Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*,1-3.
- TS EN (1999). İleri Teknoloji Seramikleri-Monolitik Seramikler-Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*,1-7.
- Türker, M., Sarıtaş, S. ve Durlu, N.(Editörler). (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*,Ankara:Uyum Ajans, 2-500.
- Uluer, O. (2008). *Enjeksiyonla Kalıplamada Üç Boyutlu Polimer Ergiyik Akışların Sayısal Analizi Ve Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 80-100.
- Ulutan, D. ve Özel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 250-280.
- Urtekin, L. (2008). *Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Steatit Seramiklerin Özelliklerine Kalıplama Ve Sinterleme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26-164.
- Wang, J., Shi, Q., Wu, C. and Xi, J. (2013). Rheological characteristics of injection molded titanium alloys powder. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 23, 2605-2610.
- Wei, F., Xinbo, H., Ruijie, Z., Shidi, Y. and Xuanhui, Q. (2014). The effects of filling patterns on the powder-binder separation in powder injection molding. *Powder Technology*, 256, 367-376.
- Weil, K.S., Nyberg, E., Simmons, K. (2006). A new binder for powder injection molding titanium and other reactive metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 176, 205-209.

- Wen, G., Cao, P., Gabbitas, B., Zhang, D. and Edmonds, N. (2013). Development and design of binder systems for titanium metal injection molding: An Overview. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 44(3), 1530-1547.
- Yalçın, B. (2007). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 72-84.
- Yalçın, B., Varol, R. (2009). Sinterlenmiş titanyum alaşımlarının aşınma performansı ve bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24, 63-72.
- Yang, W., Yang, K., Wang, M. and Hon, M. (2002). Effect of PEG molecular weights on rheological behaviour of alumina injection moulding feedstocks. *Materials Chemistry and Physics*, (78), 416-424.
- Zhao, D., Chang, K., Ebel, T., Qian, M., Willumeit, R., Yan, M. and Pyczak, F. (2013). Microstructure and mechanical behavior of metal injection molded Ti–Nb binary alloys as biomedical material. *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, 28, 171-182.

EKLER

EK-1. Optimum Toz Yükleme Besleme Stokları İle Üretilmiş Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

Çizelge 1.1. %65 Ti-6Al-4V Besleme Stokundan Hazırlanmış Numunelerin Çekme Dayanımları

	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütöleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Hızı (dak./ °C)	Gaz Akış Hızı (litre/dak.)	1	2	3	ort	S/N
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	674,88	691,21	685,82	683,97	56,699
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	296,37	400,96	378,56	358,63	50,865
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15	317,04	302,95	325,9	315,3	49,963
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15	438,98	397,23	436,61	424,27	52,525
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5	204,05	271,35	156,81	210,74	45,835
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10	500,3	524,57	580,2	535,02	54,518
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10	217,59	212,4	441,72	290,57	47,922
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15	431,84	514,94	472,69	473,16	53,433
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5	284,69	442,94	418,07	381,9	51,124
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5	485,02	595,23	574,13	551,46	54,725
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10	376	397,99	550,91	441,63	52,549
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15	119,63	352,87	182,71	218,4	44,443
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15	286,69	557,92	381,65	408,75	51,299
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5	164,86	254,27	284,16	234,43	46,666
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10	467,83	611,78	480,46	520,02	54,137
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10	403,27	452,25	357,16	404,23	52,012
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15	388,85	460,61	392,91	414,12	52,266
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5	120,87	370,67	179,25	223,6	44,483
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5	382,19	473,23	350,78	402,07	51,885
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10	416,08	370,35	308,61	365,01	51,048
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	134,77	200,17	158,51	164,48	43,986
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15	167,02	375,29	211,22	251,18	46,618
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5	71,95	303,38	232,5	202,61	41,297
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10	387,17	361,68	460,21	403,02	51,975
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10	302,16	306,44	336,1	314,9	49,935
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15	578,63	451,62	425,9	485,38	53,499
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5	467,82	333,6	524,83	442,08	52,42

EK-1. (devam) Optimum Toz Yükleme Besleme Stokları İle Üretilmiş Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

Çizelge 1.2. %65 Ti-6Al-4V Besleme Stokundan Hazırlanmış Numunelerin Çekme Dayanımı Sıralaması

	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütöleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Hızı (dak./ °C)	Gaz Akış Hızı (litre/dak.)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	683,97
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5	551,46
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10	535,0233
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10	520,0233
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15	485,3833
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15	473,1567
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5	442,0833
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10	441,6333
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15	424,2733
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15	414,1233
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15	408,7533
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10	404,2267
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10	403,02
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5	402,0667
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5	381,9
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10	365,0133
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	358,63
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15	315,2967
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10	314,9
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10	290,57
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15	251,1767
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5	234,43
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5	223,5967
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15	218,4033
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5	210,7367
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5	202,61
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	164,4833

EK-1. (devam) Optimum Toz Yükleme Besleme Stokları ile Üretilmiş Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

Çizelge 1.3. %69 Ti-6Al-7Nb Besleme Stokundan Hazırlanmış Numunelerin Çekme Dayanımları

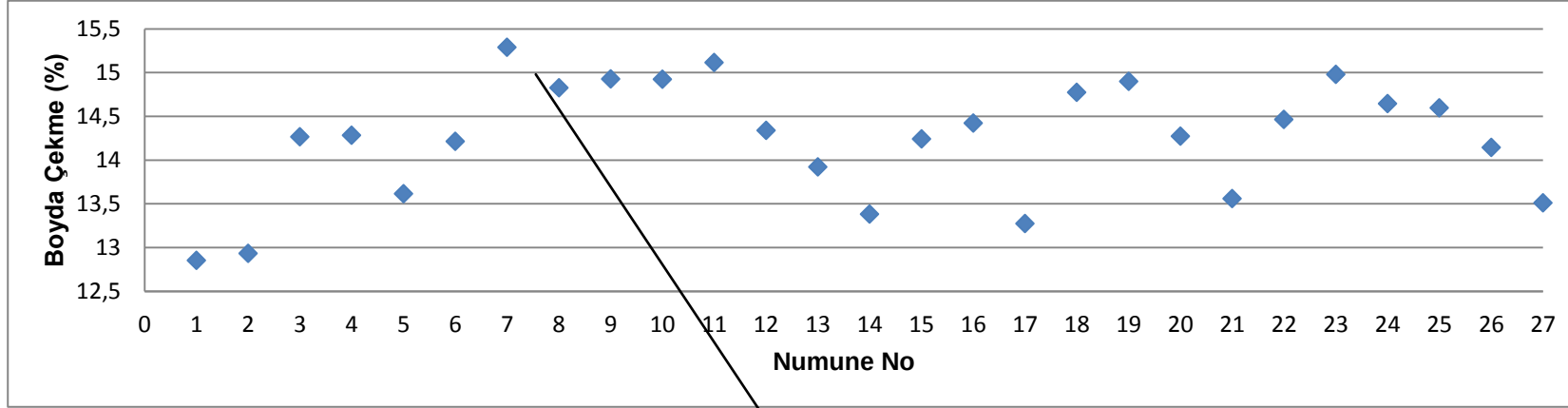
	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütölleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Hızı (dak./°C)	Gaz Akış Hızı (litre/dak.)	1	2	3	ort	S/N
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	568,97	590,86	611,96	590,59	55,41429
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	219,57	321,08	90,86	210,50	42,96499
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15	310,39	457,21	388,91	385,50	51,39164
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15	381,11	363,75	393,33	379,39	51,56841
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5	210,03	251,63	240,94	234,2	47,31355
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10	484,14	537,7	538,8	520,21	54,29077
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10	290,92	371,48	189,13	283,84	48,04854
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15	525,16	546,51	564,59	545,42	54,72319
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5	336,48	370,81	350,38	352,55	50,92396
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5	355,36	358,52	554,61	422,83	51,99516
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10	407,07	431,74	509,17	449,32	52,93657
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15	256,26	190,28	265,45	237,33	47,2095
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15	315,99	430,25	351,8	366,01	51,06108
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5	297,03	379,18	436,22	370,81	51,05226
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10	511,07	501,49	424,27	478,94	53,51306
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10	332,64	375,97	317,25	341,95	50,61352
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15	401,06	450,02	405,34	418,80	52,40553
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5	250,83	322,99	384,53	319,45	49,68687
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5	398,65	453,75	450,96	434,45	52,71196
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10	372,05	381,85	526,5	426,8	52,29392
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	171,58	225,36	245,37	214,10	46,30368
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15	380,48	338,87	359,67	359,67	51,08904
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5	230,78	309,11	304,06	281,31	48,7443
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10	357,61	377,16	319,49	351,42	50,8537
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10	236,74	243,74	332,14	270,87	48,36245
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15	535,68	488,16	546,8	523,54	54,34708
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5	433,79	467,3	468,81	456,63	53,17446

EK-1. (devam) Optimum Toz Yükleme Besleme Stokları ile Üretilmiş Numunelerin Çekme Dayanımı Sonuçları

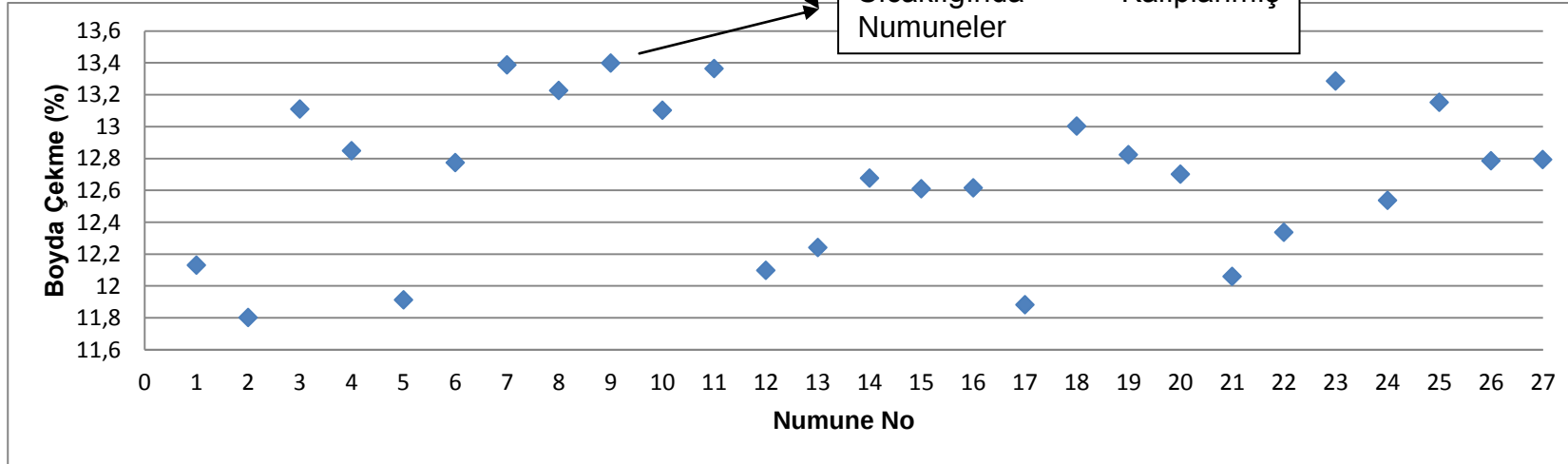
Çizelge 1.4. %69 Ti-6Al-7Nb Besleme Stokundan Hazırlanmış Numunelerin Çekme Dayanımı Sıralaması

	Debi (cm ³ /s)	Enj. Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (%)	Enj. Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Hızı (dak./ °C)	Gaz Akış Hızı (litre/dak.)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	20	1100	50	140	40	1250	1	1	5	590,5967
8	20	1300	70	160	50	1250	1	1	15	545,42
26	30	1300	60	140	60	1250	3	3	15	523,5467
6	20	1200	60	150	60	1250	1	1	10	520,2133
15	25	1200	70	140	50	1250	2	5	10	478,9433
27	30	1300	60	140	40	1300	1	5	5	456,6333
11	25	1100	60	160	40	1300	3	1	10	449,3267
19	30	1100	70	150	50	1250	3	3	5	434,4533
20	30	1100	70	150	60	1300	1	5	10	426,8
10	25	1100	60	160	60	1250	2	5	5	422,83
17	25	1300	50	150	40	1250	2	5	15	418,8067
3	20	1100	50	140	60	1350	3	5	15	385,5033
4	20	1200	60	150	40	1300	2	3	15	379,3967
14	25	1200	70	140	40	1350	1	3	5	370,81
13	25	1200	70	140	60	1300	3	1	15	366,0133
22	30	1200	50	160	50	1300	1	5	15	359,6733
9	20	1300	70	160	60	1300	2	3	5	352,5567
24	30	1200	50	160	40	1250	3	3	10	351,42
16	25	1300	50	150	60	1350	1	3	10	341,9533
18	25	1300	50	150	50	1300	3	1	5	319,45
7	20	1300	70	160	40	1350	3	5	10	283,8433
23	30	1200	50	160	60	1350	2	1	5	281,3167
25	30	1300	60	140	50	1350	2	1	10	270,8733
12	25	1100	60	160	50	1350	1	3	15	237,33
5	20	1200	60	150	50	1350	3	5	5	234,2
21	30	1100	70	150	40	1350	2	1	15	214,1033
2	20	1100	50	140	50	1300	2	3	10	210,5033

EK-2. Ti-6Al-4V / Ti-6Al-7Nb Numunelerin Çekme Yüzdeleri



Şekil 1.1. Ti-6Al-4V Numunelerin Çekme Yüzdeleri



Şekil 1.2. Ti-6Al-7Nb Numunelerin Çekme Yüzdeleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı : SUBAŞI, Mehmet
 Uyruğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :10.09.1979, İzmir
 Medeni hali :Evli
 Telefon :
 Faks :
 E-Posta :msubasi@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2001
Lise	İzmir Çınarlı Teknik Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2004-2006	Gaziantep Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2006-	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Aydin Salimi, Mehmet Subaşı, Lezgi Buldu, Çetin Karataş (2013). Prediction of flow length in injection molding for engineering plastics by fuzzy logic under different processing conditions. *Iranian Polymer Journal*, 22(33–41).
- Mehmet Subaşı Çetin Karataş (2012). Titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan

implantlar üzerine inceleme. *Politeknik Dergisi*, 2(81-97).

- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş (2010). AISI 4140 çeliğinde sertlik, yorulma dayanımı ilişkisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(21-27).
- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş (2011). AISI 4140 çeliğinde elde edilen farklı sertliklerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisinin araştırılması . *Politeknik Dergisi* , 4(289-295).
- Mehmet Subaşı, Fırat Kafkas, Çetin Karataş, 2010. AISI 4140 çeliğinde sertlik ve kalıcı gerilme ilişkisi, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi Balıkesir Üniversitesi
- M. Subaşı, A. Safarian, Ç.Karataş, 2013. Ticari plastiklerin enjeksiyon parametrelerinin akış uzunluğuna etkilerinin deneysel ve simülasyon olarak karşılaştırılması, I. Uluslararası Plastik ve Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu ve Ürün Sergisi Gazi Üniversitesi
- Safarian, M. Subaşı, Ç. Karataş, 2013. Investigation of the moldability parameters of ceramic injection molding by moldflow, 1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition Ankara
- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, 2014. Ti-6Al-7Nb alaşım tozu kullanılarak hazırlanan termoplastik bazlı besleme stokunun reolojik özelliklerinin araştırılması, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi Gazi Üniversitesi
- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, 2014. Ti-6Al-4V alaşım tozundan hazırlanmış polimerik esaslı besleme stokunun reolojik özelliklerinin araştırılması, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi Gazi Üniversitesi
- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, 2014. Jones indirgeyicisi ile titanyum esaslı parçaların sinterlenmesinin araştırılması, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi Gazi Üniversitesi
- Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, 2014. Vanadyum içerikli titanyum tozunun sinterleme parametrelerinin araştırılması, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi Gazi Üniversitesi
- Mehmet Subaşı, Asghar Safarian, Çetin Karataş, 2014. Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-7Nb alaşım tozlarının toz enjeksiyon kalıplama parametrelerinin araştırılması, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi Gazi Üniversitesi

Hobiler

Yüzme, Sinema



GAZİ GELECEKTİR..