

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK HADDELENMİŞ AA3105 SACLARDA  
TERMAL ANALİZLE YENİDEN KRİSTALLENME  
KİNETİĞİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İon GRECU**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan YILDIZ**

**Haziran 2021**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ion GRECU

25.05.2021

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca fikir ve önerilerinden yararlandığım, tezin araştırılması-planlanması ve yazılma konusunda yardım eden, yardımlarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kenan Yıldız'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında hoşgörü ve anlayışla yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Tuba YENER'e, SUBÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm başkanı Prof. Dr. Özkan ÖZDEMİR'e, Arş. Gör. Mustafa DURMAZ'a ve Bartın Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı'nda görevli Yük. Müh. Volkan Murat YILMAZ'a teşekkür ederim.

Ek olarak maddi ve manevi olarak beni her türlü destekleyen annem Stela GRECU, kız kardeşlerim Asiye KOÇ ve İlayda YOKUŐ ve eniştem Taha YOKUŐ'a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Alüminyum ve Alaşımaları .....	3
2.1.1. Alaşım elementlerinin etkisi .....	6
2.1.2. Alüminyum alaşımalarının sınıflandırılması .....	8
2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri .....	13
2.2.1. Dövme .....	16
2.2.2. Haddeme .....	18
2.2.3. Ekstrüzyon .....	19
2.2.4. Çekme .....	20
2.2.5. Derin çekme .....	21
2.3. Yeniden Kristallenme .....	22
2.3.1. Toparlanma .....	25
2.3.2. Yeniden kristallenme .....	26
2.3.2.1. Yeniden kristallenmeye deformasyonun etkisi .....	29

2.3.2.2. Yeniden kristallenmeye başlangıç tane boyutunun etkisi	30
2.3.2.3. Yeniden kristallenmeye metal saflığının etkisi . . . . .	31
2.3.2.4. Yeniden kristallenmeye zaman ve sıcaklığın etkisi .	32
2.3.2.5. Tavlama sıcaklığı . . . . .	32
2.3.3. Tane büyümesi . . . . .	33
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM . . . . .	36
3.1. Materyal . . . . .	36
3.2. Yöntem . . . . .	37
3.2.1. Deformasyon analizi . . . . .	37
3.2.2. Kinetik analiz . . . . .	37
3.3. Kullanılan Cihazlar . . . . .	39
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA . . . . .	41
4.1. Metalografik Çalışmalar . . . . .	41
4.2. Yeniden Kristallenme Kinetiği . . . . .	44
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR . . . . .	54
KAYNAKÇA . . . . .	55
ÖZGEÇMİŞ . . . . .	
.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alüminyum Birliği
Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alümina
ANSA	: Amerikan Ulusal Standartlar Birliği
$\beta$	: Isıtma Hızı
Cu	: Bakır
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
$\epsilon$	: Deformasyon Miktarı
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
T	: Sıcaklık
T <sub>def</sub>	: Deformasyon Sıcaklığı
T <sub>erg</sub>	: Ergime Sıcaklığı
T <sub>p</sub>	: Pik Sıcaklığı
T <sub>yk</sub>	: Yeniden Kristallenme Sıcaklığı
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
Zn	: Çinko

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Metal şekil verme proseslerinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.2. Plastik deformasyonun ilerleme durumu .....	15
Şekil 2.3. Haddelme işleminin şematik gösterimi .....	18
Şekil 2.4. %99,9 saflıkta alüminyumun; (a) %0, (b) %45 ve (c) %95 soğuk haddelenmiş mikroyapı görüntüsü .....	19
Şekil 2.5. Çekme boyunca deformasyon bölgesinde meydana gelen değişimin şematik gösterim.....	21
Şekil 2.6. Derin çekme işleminin şematik gösterimi .....	22
Şekil 2.7. Tavlama prosesinin şematik diyagramı; (a) deforme olmuş durumu, (b) toparlanmış, (c) kısmen yeniden kristallenmiş, (d) tamamen yeniden kristallenmiş, (e) tane büyümesi, (f) anormal tane büyümesi .....	23
Şekil 2.8. Soğuk işlem sonucu %99,99 saflıktaki bakırın depolanan enerji durumu.....	24
Şekil 2.9. Plastik deforme olmuş malzemenin toparlanma sırasındaki çeşitli kademeleri .....	26
Şekil 2.10. Toparlanma ve yeniden kristallenmenin tane yapısındaki etkilerinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.11. 350 °C'de tavllanmış alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği.....	29
Şekil 2.12. %93 oranında soğuk haddelenmiş bakırın başlangıç tane boyutunun etkisi .....	31
Şekil 2.13. Saf bakırın %50 yeniden kristallenme durumuna göre mutlak sıcaklığın tersinin ilişkisi .....	32
Şekil 2.14. %60 deforme edilmiş Fe-%3,5Si'nin tavlmasına tavlama sıcaklığının etkisi .....	33
Şekil 2.15. Tane büyümesi esnasında tane sınırlarının değişimi.....	34
Şekil 2.16. Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterimi.....	35

Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AA3105 alüminyum saclar.....	36
Şekil 3.2. Metalografik çalışmalarda kullanılan AA3205 alüminyum sac numuneleri.....	37
Şekil 3.3. Denejde kullanılan zımparalama ve parlatma makinesi.....	39
Şekil 3.4. Dağlama için kullanılan %3 Nital solüsyonu.....	40
Şekil 4.1. AA3105 alaşımının 0,56 mm kalınlığındaki numunenin çeşitli büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.....	41
Şekil 4.2. AA3105 alaşımının 1,02 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d)500x.....	42
Şekil 4.3. AA3105 alaşımının 1,51 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.....	42
Şekil 4.4. AA3105 alaşımının 1,76 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x .....	43
Şekil 4.5. AA3105 alaşımının 2,89 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x .....	43
Şekil 4.6. AA3105 alaşımının 3 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x .....	44
Şekil 4.7. $\epsilon T = 1,078$ olan AA3105 sacların DSC analiz.....	45
Şekil 4.8. $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği (Kissenger modeli).....	46
Şekil 4.9. $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli).....	46
Şekil 4.10. $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli).....	47
Şekil 4.11. $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli).....	47
Şekil 4.12. Y - 1000/T grafikleri (Y = Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$ ; Boswell için $\ln(\beta/T)$ ; Ozawa için $\ln(\beta)$ ; Starink için $\ln(\beta/T^{1.92})$ ).....	48
Şekil 4.13. $\epsilon T = 1,678$ olan AA3105 sacların DSC analizi.....	49
Şekil 4.14. $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$ grafiği (Kissenger modeli).....	50

Şekil 4.15. $\ln(\beta/T) - 1000/T$ grafiği (Boswell modeli).....	50
Şekil 4.16. $\ln(\beta) - 1000/T$ grafiği (Ozawa modeli).....	51
Şekil 4.17. $n(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$ grafiği (Starink modeli).....	51
Şekil 4.18. $Y - 1000/T$ grafikleri ( $Y =$ Kissenger için $\ln(\beta/T^2)$ ; Boswell için $\ln(\beta/T)$ ; Ozawa için $\ln(\beta)$ ; Starink için $\ln(\beta/T^{1.92})$ ).....	52



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. 3105 alüminyum alaşımlarının kimyasal analizi.....	1
Tablo 2.1. İşletilebilir boksit rezervi.....	4
Tablo 2.2. Saf alüminyum metalinin özellikleri.....	5
Tablo 2.3. ANSA standardına göre alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması.....	9
Tablo 2.4. AA standardına göre alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması.....	11
Tablo 2.5. Alüminyum alaşımlarının temel temper serisi.....	12
Tablo 2.6. H temper kodları.....	13
Tablo 2.7. T temper kodları.....	13
Tablo 2.8. Yeniden kristallenme sıcaklığı üzerine saflığın etkisi.....	31
Tablo 4.1. $\epsilon T = 1,078$ olan AA3105 sacı için kinetik veriler.....	45
Tablo 4.2. $1,078$ olan AA3105 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.....	48
Tablo 4.3. $\epsilon T = 1,678$ olan AA3105 sacı için kinetik veriler.....	49
Tablo 4.4. $\epsilon T = 1,678$ olan AA3105 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri.....	52

## ÖZET

Anahtar kelimeler: AA3105 Alüminyum alaşımı, yeniden kristallenme, izotermal olmayan kinetik

Akyazı/Sakarya’da bulunan ASAŞ Alüminyumdan temin edilen soğuk haddelenmiş AA3105 alüminyum alaşım levhalarının izotermal olmayan yeniden kristallenme kinetiği diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) kullanılarak incelenmiştir. AA3105 alüminyum alaşımı levhalarından elde edilen soğuk haddelenmiş numunelerin termal analizi, farklı ısıtma hızlarında (5 – 7,5 – 10 °C/dak) yapılmıştır. Yeniden kristallenme kinetiği, Kissinger, Boswell, Ozawa ve Starink metotları gibi izotermal olmayan kinetik metotlarla yapılmıştır. Bunlar modelsiz yöntemlerdir. Farklı ısıtma hızlarındaki diferansiyel tarama kalorimetri dataları kullanılarak yeniden kristallenme sıcaklıkları tespit edilmiş ve aktivasyon enerjileri  $Y - 1/T$  diyagramlarındaki eğimlerden hesaplanmıştır. Burada Y, Kissinger metodu için  $\ln(\beta/T^2)$ , Boswell metodu için  $\ln(\beta/T)$ , Ozawa metodu için  $\ln(\beta)$  ve Starink metodu için  $\ln(\beta/T^{1.92})$  ‘dir. Sonuçlar göstermiştir ki %107,8 deforme olmuş AA3105 levha için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisi 210 – 222 kJ/mol aralığında ve %167,8 deforme olmuş AA3105 için bu değer 235 – 247 kJ/mol aralığındadır.

# INVESTIGATION OF RECRYSTALLIZATION KINETICS OF COLD ROLLED AA3105 SHEETS BY THERMAL ANALYSIS

## SUMMARY

Keywords: AA3105 Aluminum alloy, recrystallization, non-isothermal kinetics

The non-isothermal recrystallization kinetics of cold rolled AA3105 aluminum alloy sheets obtained from ASAŞ Aluminum in Akyazı/Sakarya was studied by using differential scanning calorimetry (DSC). The thermal analysis of cold rolled samples from AA3105 aluminum alloy sheets were performed with different heating rates (5 – 7.5 – 10 °C/min). The recrystallization kinetics was performed by using non-isothermal kinetics methods such as Kissinger, Boswell, Ozawa and Starink methods. These are model – free methods. Using differential scanning calorimetry data at different heating rates ( $\beta$ ), recrystallization temperatures were deduced and activation energies were calculated from the slopes from  $Y - 1/T$  diagrams.  $Y$  is  $\ln(\beta/T^2)$  for Kissinger method,  $\ln(\beta/T)$  for Boswell method,  $\ln(\beta)$  for Ozawa method and  $\ln(\beta/T^{1.92})$  for Starink method. The results showed that the activation energy of recrystallization for 107,8% deformed AA3105 sheet is in the range of 210 – 222 kJ/mol and this value for 167,8% deformed AA3105 is in the range of 235 – 247 kJ/mol.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

19. yüzyıl sonlarına kadar saf alüminyum üretimi mümkün olmamıştır. Alüminyum sahip olduğu elektronegativite ve oksijene karşı afinitesinden dolayı saf halde üretimi ergime sıcaklığı çok fazla olduğu için keşfedilmesi uzun sürmüştür. İsmi geliştirenlerden alan Hall-Heroult prosesiyle alüminyum sektöründe oldukça önemli bir gelişme kaydedilmiştir. Hall-Heroult prosesiyle altın kadar değerli olan alüminyumun geniş ölçekli üretimine imkan sağlanmıştır.

Alüminyumun saf haldeyken sahip olduğu özellikleri geliştirmek veya yeni özellikler kazandırmak amacıyla alaşımlama yapılır. Alüminyum 3105 alaşımı korozyona karşı dirençli, kolay şekillendirilebilir ve hafiftir. 3105 alüminyum alaşımı daha çatı ve cephe kaplamalarında, savunma ve ulaşım sanayi, elektrik tesisatı ve konektörler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Tablo 1.1.'de 3105 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1.1. 3105 alüminyum alaşımının kimyasal analizi (Ataşen, 2015)

Al	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Diğer
96,15-97,45	0,3-0,8	0,2-0,8	0,6	0,7	0,1-0,3	0,2	0,4	0,05

Şekillendirme amaçlı metallere hacminde herhangi bir değişiklik meydana getirmeden haddeleme gibi çeşitli deformasyon işlemiyle son ve ara ürün elde edilmesi sağlanabilir. İşlem sıcaklığına bağlı olarak haddeleme sıcak veya soğuk olarak uygulanabilir. Haddeleme sonrası haddeleme yönünde yönlenmiş, mukavemet kazanmış parça şekil verilebilerek yeteneğini kaybetme eğilimindedir. Yeniden Şekil verilebilirlik kazandırmak amacıyla yeniden kristallenme işlemi uygulanır. Yeniden kristallenmede yeni taneler oluşarak süneklik ve elektriksel iletkenliğin artırılması sağlanır.

İzotermal olmayan şartlarda termal analiz incelenmesinin pik sıcaklıklarının keşfedilmesinde soğuk şekil verme işlemi görmüş metalik malzemelerde yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesinde başlıca kullanılan dört yöntem Kissenger, Ozawa, Boswell ve Starink yöntemleridir.

Bu çalışmada Sakarya Akyazı’da bulunan ASAŞ Alüminyum fabrikasından soğuk haddelenmiş farklı kademelerdeki AA3105 alüminyum saclarında kristallenme kinetiği Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink gibi izotermal olmayan yöntemlerle incelenmiştir.



## BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Alüminyum ve Alaşımaları

Alüminyum yeryüzünde en çok bulunan metaldir (Yılmaz ve Şen, 1996). Metal olan alüminyum yer kabuğunda saf olarak bulunmaz ancak oksijen (%45,5) ve silisyumdan (%27,2) sonra en fazla bulunan elementtir (%8,2). Alüminyum doğada bileşikler halinde bulunduğu için saf olarak üretiminin bulunması 19. yüzyılın ortalarına kadar mümkün olmamıştır (Ataşen, 2015). Alüminyum kuvvetli bir elektronegatif metal ve oksijene karşı afinitesi çok iyidir. Yeryüzünde bulunan en fazla altı metalden biri olan alüminyum, oksitli formunu bozmak için yüksek sıcaklıklar gerektiğinden 19. yüzyılın sonlarına kadar izole edilememiştir (Sheasby ve Pinner, 2001).

Hemen hemen aynı yıllarda (1880) endüstriyel düzeyde alüminyum üretim yöntemlerini bulan Hall ve Heroult, ilerleyen yıllarda ekonomik düzeyde alüminyum üretimi için kayda değer gelişme göstermişlerdir. Hall-Heroult prosesi boksit cevherinden ucuz alümina ( $Al_2O_3$ ) üretiminde önemli rol oynamıştır. Alüminyum boksit mineralinden çıkarılır. Boksit Bayer prosesiyle alüminyum okside dönüştürülür ve alüminyum okside Hall-Heroult prosesi ve elektrolitik hücreler kullanılarak alüminyum metali elde edilir. Bu keşif alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üretiminin geniş ölçekli olmasına izin vermiştir (Sheasby ve Pinner, 2001; Okumuş, 2003; Doğan 2006).

Dünya’da ekonomik olarak metalik alüminyum boksit cevherlerinden çıkarılmaktadır. Kullanılabilecek boksit rezervleri 55-75 milyar ton olmakla birlikte rezervin 30 milyar tonu işletilebilir durumdadır. 7,4 milyar ton ile Gine, boksit rezervi bakımından en zengin ülkedir. Bu durumu 6 milyar ton ile Avusturya, 3,7

milyar ton ile Vietnam gibi ülkeler izlemektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Tablo 2.1.'de Dünya'da işletilebilecek boksit cevherlerinin rezervi ve dünya payı gösterilmiştir.

Tablo 2.1. İşletilebilir boksit rezervi (Eroğlu ve Şahiner, 2018)

Ülke	Rezerv-ton	Dünya Payı-%
Gine	7400000000	25
Avustralya	6000000000	20
Vietnam	3700000000	12
Brezilya	2600000000	9
Jamaika	2000000000	7
Endonezya	1000000000	3
Çin	1000000000	3
Guyana	850000000	3
Hindistan	830000000	3
Rusya	500000000	2
Yunanistan	250000000	1
Kazakistan	160000000	1
Malezya	110000000	0
ABD	2000000	0
Diğer Ülkeler	320000000	11
Toplam	30000000000	100

Saf alüminyum; mavimsi beyaz, yumuşak, korozyona dirençli ve yüksek elektriksel iletkenliği vardır. Başka uygulamalarda kullanılabilmesi için daha yüksek mukavemete ihtiyacı olduğundan alaşımlandırılması gerekir. Günümüzde endüstride kullanılan 300'ün üzerinde alüminyum alaşımı bulunmaktadır (Yılmaz ve Şen, 1996; Doğan 2006).

Alüminyumun saflık oranı arttıkça iletkenlik ve korozyon direnci durumu artmaktadır. Alüminyum oksijenle temas ettiğinde  $Al_2O_3$  tabakasını oluşturur. Bu tabaka korozyonu önlemekte ve oluşturduğu pasif tabaka sayesinde metal korunmuş olmaktadır. Alüminyumun hafifliği ve demirin yoğunluğuna göre karşılaştırıldığında üçte biri olmasından dolayı mukavemet artırma işlemi olan alaşımlandırma ve yaşlandırma işlemlerinden sonra çeliklere yakın dayanımlara sahip olmaktadır.

Alüminyum sahip olduğu hafiflik ve mukavemet/ağırlık oranı sayesinde uçak gibi hava taşıtlarında ve çeşitli kara taşıtlarında kullanılmaktadır (Ak, 2012).

Alüminyum birçok kimyasal sistem, tuzlu su dahil olmak üzere sulu ortam ve atmosfer ortamında mükemmel korozyon direnci göstermektedir. Alüminyumun yüzeyi radyan enerjisi, görünür ışığı, radyan ısısını ve elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde yansıttığından iyi bir yansıtıcı olarak görülür. Alüminyumun ferromanyetik olmaması elektrik ve elektronik endüstrisi için önemlidir. Yanmayan veya patlayıcı malzeme uygulamalarında kullanılabilir. Alüminyumun toksit olmaması sürekli olarak içecek ve yiyecek kaplarında kullanılmasını sağlamaktadır (Doğan, 2006; Eşit 2006; Ataşen 2015).

Alüminyumdan ürün elde edilmesi için döküm ve dövme yöntemleri kullanılabilir. Dövme yöntemiyle, sıcak ve soğuk haddelenmiş levha, sac, çubuk, tel veya folyo şeklindeki ürünler elde edilebilir. Dökümle ürün üretiminde kum, döküm, mum döküm, kalıba döküm gibi yöntemler kullanılmaktadır (Eşit, 2006).

Tablo 2.2. Saf alüminyum metalinin özellikleri (Yılmaz ve Şen, 1996)

Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)
Yoğunluk	2,7 gr/cm <sup>3</sup>
Yeniden Kristallenme Sıcaklığı	150-300°C *
İşlem Sıcaklığı	300-500°C
Ergime Sıcaklığı	660°C
Çekme Dayanımı	39-85 MPa *
Akma Dayanımı	10-30 MPa *
Sertlik (BHN 2,5)	12-20 HB *
Elastik Modül	7,06x10 <sup>6</sup> MPa *
Kayma Modülü	2,65x10 <sup>6</sup> MPa *
Kopma Uzaması	%30-40

\*: Saflik derecesine bağlıdır.

Alüminyumu diğer metallere göre daha üstün kılan ve hadde, ekstrüzyon ve döküm uygulamalarında seçilme sebebi şu özelliklerinden dolayıdır (Okumuş, 2003);

#### 1. Hafifliği,

2. Alaşımlandırıldığında yeterli mukavemete sahip olması;
3. Tekrar kullanılabilirlik;
4. Korozyon direncinin yüksek olması;
5. İşlenebilirliği,
6. Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği,
7. Gümüşümsü görünüm,
8. Düşük sıcaklıkta tokluk,
9. Yüksek yansıtma özelliği,
10. Dövülebilirliği.

### 2.1.1. Alaşım elementlerinin etkisi

Alüminyum ve alüminyum alaşımları birçok özelliklerinden dolayı günlük hayatta kullanılan önemli yapı ve mühendislik malzemesinden birisidir. Saf alüminyumun günlük hayatta kullanımı elektriksel uygulama hariç oldukça sınırlıdır. Alaşımlama alüminyumun saf halindeyken sahip olduğu korozyona direnç, elektrik iletkenliği gibi özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Uygulanacak olan şekil verme yöntemi ve ısıl işleme bağlı olarak kimyasal bileşimi benzeyen ancak özellik bakımından farklı olan çeşitli alaşımlar üretilebilmektedir. Alüminyum için genel olarak kullanılan elementler bakır, silisyum, çinko, magnezyum ve mangandır. Eklenen bu ve bunun gibi alaşımlar yapı içerisinde ya çözünür ya da form oluşturur (Yılmaz ve Şen, 1996; Okumuş 2003; Ataşen, 2015; Aydın ve ark., 2019). Kullanılan alaşım elementleri incelenecek olursa;

1. Bakır, kullanım oranı en yüksek olan alaşım elementidir. Al-Cu alaşımlarına dökülebilirlik özelliği kazandırmak amacıyla silisyum katılır. Bakırın katılması, alüminyumun düşük ısı işlem sıcaklığında dayanımının yüksek olmasını ve aynı zamanda sertliğini de arttırmaktadır. Al-Cu ikili denge diyagramında bakır oranı %12'ye kadar olması dayanıklılığı arttırmaktadır. %12'den yüksek olması durumu alaşımın gevrek olmasını sağlamaktadır. %5,5'e kadar bakırın eklenmesi mukavemeti sürekli olarak arttırmakta ancak sünekliği düşürmektedir. Bakır dövme alaşımlarında %3-5 arasında

kullanılmaktadır. Sıcaklık artışının olması, bakırın alüminyumdaki çözünürlüğünü arttırmaktadır. Bu sebeple çökeltme sertleşmesinin uygulanması bakırlı alüminyum alaşımları için uygundur (Yılmaz ve Şen, 1996; Doğan, 2006; Eşit, 2006; Ak, 2012; Stano ve ark., 2010; Ataşen, 2015).

2. Silisyum, alaşım elementi olarak bakır sonrası oran olarak en çok kullanılandır. Alüminyum alaşımlarına akışkanlık, korozyon direnci, mukavemet ve kaynak kabiliyeti kazandırır. Sıcak çatlama eğilimini azaltır. Si, alüminyuma cevherden gelen en fazla miktardaki empürite elementidir. %13'ten fazla olması işleme kabiliyetini azaltır. Alüminyum-silisyum alaşımlarının mukavemeti önemli ölçüde morfolojisine bağlıdır. Ötektiküstü alaşımlar, sıcaklığın önemli olduğu uygulamalarda ve aşınmanın yüksek düzeyde beklenen yerlerde kullanılır. Modifikasyon işlemiyle ötektik yapıda silisyum kristallerinin yapıları değiştirilebilmekte ve işlenebilirlikleri artırılabilir.
  3. Magnezyum, alüminyuma alaşım elementi olarak katıldığında mukavemeti artmakta, sünekliği normalden iyi duruma gelmekte, korozyon direnci ve kaynaklanabilirliği artmaktadır. Döküm alaşımlarında magnezyum ilave oranı %10'a kadar, diğer metotlarda %7'ye kadar çıkılabilmektedir. Magnezyum ayrıca soğuk işlem uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Mg içeriğinin %8'den fazla olduğu durumlarda alaşıma ısıl işlem uygulanabilmekte ve mekanik özellikleri artırılabilir.
    4. Çinko, alüminyum alaşımlarına katkısı işlenebilirliği, mukavemeti arttırmasıdır. Al-Zn alaşımları mukavemeti çok iyi olan alaşımlardır. Zn oranının %10'dan fazla olması gerilim korozyonuna sebep olur. Zn'nin yanında Mg eklenmesi de darbe mukavemetini yüksek derecede arttırmaktadır. Zn eklenmiş Al alaşımının ayrıca haddelenebilme özelliği artmaktadır (Yılmaz ve Şen, 1996; Doğan, 2006; Eşit, 2006; Ak, 2012; Ataşen, 2015).
      5. Manganez, alüminyum alaşımına en fazla %1,8 oranında eklenmesi ile Al-Mn alaşımı üretilebilmektedir. %1,8 değerinden fazla eklenilmesi durumunda intermetalik bir bileşik olan  $MnAl_6$  oluşturarak sünekliği düşürebilmektedir.

Fe varlığında Mn'nin alüminyum içerisindeki çözünürlüğü %1,2'ye kadar gerilemektedir. Mn ilavesi mekanik özellikleri arttırmaktadır. Korozyon direncinin etkilemeden yeniden kristallenme sıcaklığını 50-60°C'ye kadar arttırabilmektedir (Yılmaz ve Şen, 1996; Doğan, 2006; Eşit, 2006; Ataşen, 2015).

6. Demir, genelde alüminyum alaşımında arzu edilmeyen ve alüminyum cevherinden gelen bir elementtir. Fe, genelde empürite elementi olarak sayıldığından miktarının mümkün olduğunca az olması istenir. Sertliği artırır. Al-Mg alaşımlarında tane küçültücü görevi görürken, Al-Cu-Ni alaşımlarında yüksek sıcaklıklarda mukavemeti ve korozyon direncini artırır (Yılmaz ve Şen, 1996; Doğan, 2006; Eşit, 2006; Ak, 2012; Ataşen, 2015).
7. Nikel, mukavemetin yüksek sıcaklıkta düşmemesi amacıyla eklenen bir elementtir. Al-Ni alaşımlarında termal genişleme katsayısı düşüktür (Yılmaz ve Şen, 1996; Eşit, 2006).
8. Titanyum, alaşımlandırmada tane küçültücü olarak katılmaktadır. Tane küçüldükçe mekanik özellikleri arttıracaktır. %20 oranına kadar alüminyuma ilave edilebilir (Yılmaz ve Şen, 1996; Eşit, 2006; Ak, 2012).

### 2.1.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Dünya'da ülkeler alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında şekil verme proseslerinden olan işlem (dövme) ve dökümü kullanarak genel olarak iki grupta sınıflandırmışlardır (Yılmaz ve Şen, 1996). Dövme ve döküm şekillendirme yöntemlerine göre geliştirilen birçok standart vardır. Bunlar; ANSA (Amerikan Ulusal Standartlar Birliği), AA (Aluminium Association), ALCOA, ASTM, DIN gibi standartlardır (Doğan, 2006; Ataşen, 2015).

Alüminyum işlem alaşımlarının sınıflandırılmasında ANSA standardı kullanılmaktadır. ANSA standardı Tablo 2.3.'te de belirtildiği üzere dört rakamdan oluşmaktadır. Dört rakamdan oluşan sınıflandırmanın ilk rakamı alüminyum alaşımında bulunan temel alaşım elementini göstermektedir. İkinci rakam alaşım elementinin varyasyonunu içermektedir. Üçüncü ve dördüncü rakam, %99 saflıkta

alaşımın virgülden sonraki yüzdesini vermektedir. ANSA standardı alaşım elementine göre 1 ile 9 arasında değişmektedir (Doğan, 2006; Ataşen; 2015).

Tablo 2.3. ANSA standardına göre alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması (Mukhopadhyay, 2012)

Simge	Temel Alaşım Elementi
1XXX	Saf Alüminyum (%99 veya daha yüksek)
2XXX	Bakır
3XXX	Manganez
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve Silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer Elementler
9XXX	Kullanılmayan Seri

İşlem alaşımlarında 1XXX serisi, minimum %99,00 saflıktan başlayan 1100 serisine dayandırılarak başlar. Şekillenebilirliği, korozyon direnci ve elektrik iletkenliği yüksektir. Gerilimi sertleştirilebilir olsa da mukavemetin ön plana çıktığı uygulamalarda kullanılması tercih edilmez. Kimyasal ekipmanlarda, tanker veya kamyon gövdelerinde, folyo ambalajında kullanılabilir.

2XXX serisindeki ana alaşım elementi bakırdır. Isıl işlem uygulanabilen, sertliği iyi, bazı kombinasyonları özellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet gösterebilen, kaynaklanabilirliği olan, atmosferik korozyona dirençli olmadığından boyama yapılarak kullanılır. Kamyon gövdelerinde, yakıt tanklarında, uçak endüstrisinde kullanılabilir.

3XXX serisinde manganez, en önemli alaşım elementidir. Korozyon direnci ve şekil verilebilirliği çok yüksektir. Mukavemeti orta derecededir. Kolayca kaynaklanabilir. 3XXX serisinin varyasyonları enerji santralleri ve araçlarda levha ve boru şeklinde ısı eşanjörü olarak kullanılabilir.

4XXX serisi, silisyumun temel alaşım elementi olarak kullanıldığı gruptur. Yüksek silisyum içeriği sayesinde iyi akış sağlanır. Dövme durumunda karmaşık kalıplarda

tamamen dolması sağlanabilmektedir. Sertlik durumu çok yüksek olmasa da orta düzeydedir. Pistonlarda, buzdolabı soğutma sirkülasyon sistemi gibi kompleks şekilli parçalarında dövülmesinde kullanılır.

5XXX serisinin ana alaşım elementi magnezyumdur. Sertleştirilebilir, kaynaklanabilir ve mükemmel korozyon direncine sahiptir. Magnezyumun %3'ten fazla olması durumunda 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerilmeli korozyon görülür. Bu sebeple 5454 ve 5754 alaşımlarının yüksek sıcaklık gereken uygulamalarda kullanılması tavsiye edilir. 5XXX serisi otomotiv parçalarında, depolama tanklarında, kutularda kullanılabilir.

6XXX serisi magnezyum yanında aynı zamanda silisyum içeren bir seridir. Mükemmel korozyon direncine, orta derece mukavemete ve kolay kaynaklanabilirliğe sahiptir. Otomotiv ve kamyon gövde çerçevelerinde, köprü parmaklıklarında kullanılabilir.

7XXX serisi ısıtılabilir uygulanabilen bir alaşımdır. Temel alaşım elementi çinkodur ve ilave edilen miktarı %1-8 arasındadır. Al-Zn-Mg-Cu alaşımı, bütün alüminyum alaşımları arasında en yüksek mukavemete sahip olan alaşımdır. Yüksek mukavemetin yanı sıra yüksek sertleştirilebilirliğe de sahiptir. Atmosferik korozyon direnci 5XXX ve 6XXX alaşımlarına göre daha kötüdür. Uçak yapılarında kullanılabilir.

8XXX serisi Li, Fe ve Ni gibi daha az oranda kullanılan alaşım elementleri için oluşturulan bir seridir. Her biri alaşıma belirli karakteristikleri kazandırmak amacıyla katılır. Fe ve Ni, elektrik iletkenliğinde küçük bir kayıpla mukavemeti artırır. Isıl işlem uygulanabilen bu seri aynı zamanda yüksek iletkenlik, mukavemet ve sertliğe sahiptir. Uzay ve elektrik uygulamalarında, kaplamalarda kullanılabilir (Eşit, 2006; Ataşen, 2015).

Döküm alaşımları, işlem alaşımlarına göre bakır ve silisyum gibi daha fazla oranda alaşım elementi içermektedir. Çoğu döküm ürünlerinde, özellikle yorulma, uzama ve

mukavemet döküm ürünlerine göre nispeten daha düşüktür. Döküm alaşımları Tablo 2.4.'te gösterildiği gibi işlem alaşımları gibi dört rakamla sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma türündeki fark üçüncü rakamdan sonra nokta konulmasıdır. 3xx.x örneğinde, serideki ilk rakam temel alaşım elementini, ikinci ve üçüncü rakam alüminyumun saflığı, son rakam döküm parçasını veya dökümhanede kullanılan ingotu belirtir (Yılmaz ve Şen; 1996; Doğan, 2006; Güner; 2013). 0-Döküm, 1-İngot, 2-Modifiye edilmiş ingotu simgelemektedir.

Tablo 2.4. AA standardına göre alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması (Mukhopadhyay, 2012)

Seri Numarası	Alaşım Elementi
1xx.x	Saf alüminyum (%99 veya daha fazla)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum ilaveli bakır veya magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Yaygın kullanılmayan elementler
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

2xx.x serisinde bakır öne çıkan alaşım elementidir. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahiptir. Bu serinin en yaygın kullanılan alaşımı ısıtıl işlem görmüş AlCu<sub>4</sub>Ti alaşımıdır. Bu alaşım mikroporozite ve sıcak yırtılmadan dolayı hassas dökümle üretilmektedir. Sahip olduğu yüksek sertlik, elektriksel mühendislik, uçak ve makine araçlarının üretiminde kullanılabilmesini sağlamaktadır.

3xx.x silisyumla birlikte bakır veya magnezyum içeren alaşımdır. Bu seri yüksek silisyum içeriğinden dolayı döküm sırasında sağladığı esneklikten dolayı dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Silisyum aynı zamanda akışkanlığı arttırdığından yüksek mukavemet de elde edilebilmektedir. Otomotiv parçalarında, pistonlarda, tekerlerde kullanılmaktadır.

4xx.x serisinin temel alaşım elementi silisyumdur. Mükemmel akışkanlığa ve karmaşık dökümler için çok iyidir. Daktilo çerçeveslerinde, dişçilikte kullanılmaktadır.

5xx.x serisi magnezyum içeriği ön plana çıkan bir alaşımdır. Mükemmel korozyon direncine ve işlenebilirliğine iyidir. Mutfak eşyalarında, uçak parçalarında kullanılmaktadır.

7xx.x serisi çinkonun ana alaşım elementi olduğu seridir. Görünüşü ve işlenebilirliği mükemmeldir. Dökümü zor olan bir alaşımdır. Fırınlarında, bahçe aletlerinde, ofis makinelerinde, madencilik ekipmanlarında kullanılmaktadır.

8xx.x serisinin ana alaşım elementi kalaydır. İşlenebilirliği mükemmel ancak dökümü zor bir alaşımdır. Her türlü burçta kullanılmaktadır (Yılmaz ve şen; 1996; Doğan, 2006).

Alüminyum alaşımlarının ısı ve mekanik işlemlerin uygulanması korozyon direnci, elektriksel iletkenlik gibi özelliklerini iyileştirmektedir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan mekanik veya ısı işlem temper durumuyla ifade edilmektedir. Döküm veya işlem alaşımları fark etmeksizin temper durumu her ikisi için de geçerlidir (Ak 2012; Güner, 2013). Uygulanan temper işlemleri Tablo 2.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Alüminyum alaşımlarının temel temper serisi (Mukhopadhyay, 2012)

Temper	İşlem	Kullanım
F	Üretilmiş	Soğuk işlem veya aşırı işlem sıcaklığına çıkmadan soğuk şekil, sıcak şekil veya döküm ürünler üretilir.
O	Tavlanmış	Tavlanmış ürünlerin sünekliği ve boyutsal kararlılığı artmaktadır.
H	Soğuk işlem uygulanmış	Tamamen veya kısmen soğuk işlenmiş döküm ürünleri aşırı işlem sıcaklıklarında düşük mukavemette istenilen sünekliği gösterir.
W	Çözeltiye alınmış	Bu seri sadece yaşlandırma zamanı başladığında kullanılmaktadır.
T	Kararlı temper	Isıl işlemle veya soğuk işlem tamamlanmadan kararlı temper gösteren ürünleri kapsar.

Temel olarak tanımlanan temper kodlarının yanında H ve T harflerinden sonra gelen rakam temper işlemlerinin alt basamaklarını gösterir.

Tablo 2.6. H temper kodları (Mukhopadhyay, 2012)

Kod	İşlem	Kullanım
H1	Soğuk işlenmiş	Yüksek işlem sıcaklığına çıkılmadan soğuk işlem uygulanmış ürünleri kapsar. H1'den sonraki kısım soğuk işlem derecesini gösterir.
H2	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavllanmış	Soğuk işlem uygulanmış ürünleri sonradan tavlarken mukavemetinde azalış görülür. H2 soğuk işlem sonrası kısmi tavlama gösterir.
H3	Soğuk işlenmiş ve kararlaştırılmış	Soğuk işlem uygulanmış ürünler, düşük işlem sıcaklığıyla veya üretim sırasındaki ısıyla kararlaştırılır.

Tablo 2.7. T temper kodları (Mukhopadhyay, 2012)

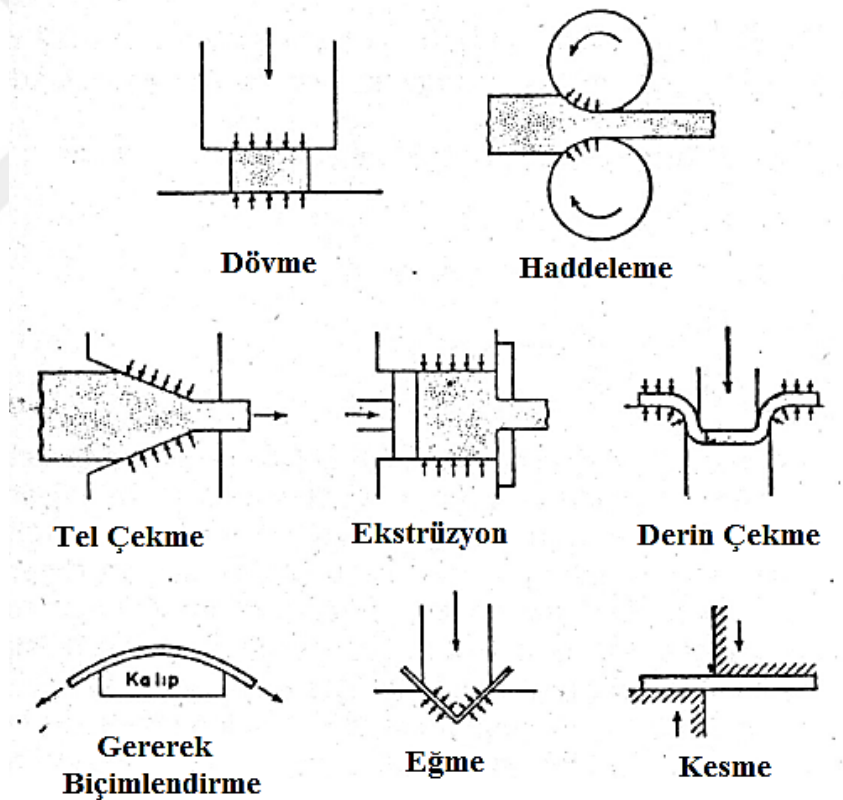
Kod	İşlem
T1	Yüksek sıcaklıkta üretim prosesi sonrası kararlı yaşlanma temperi uygulanır.
T2	Yüksek sıcaklıkta üretimden sonra oda sıcaklığında işlem ve kararlı temper yaşlandırması uygulanır.
T3	Çözelti alma, soğuk işlem ve kararlı durum sonrası yaşlanma uygulanır
T4	Soğuk işlem uygulanır ve kararlı durum oluştuktan sonra yaşlanma uygulanır.
T5	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme prosesinden sonra soğutulur ve yapay olarak yaşlandırılır.
T6	Çözeltiye alma ve sonrasında yapay yaşlandırılır.
T7	Çözeltiye alma ve aşırı yaşlandırma uygulanır.
T8	Çözeltiye alma, oda sıcaklığında işlem uygulanır ve yapay yaşlandırılır.
T9	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma ve sonrasında soğuk işlenir.
T10	Yüksek sıcaklık şekillendirme prosesinden soğutulur, soğuk işlem ve sonrasında yapay yaşlandırılır.

## 2.2. Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Plastik şekil verme (PŞV), katı halde olan metale hacminde herhangi bir değişiklik olmadan yapılan bir deformasyon işlemidir. PŞV, ana ürün veya yan ürün imalindeki ana yöntemdir. Ergitilmiş ürünlerin %90'dan fazlası çeşitli PŞV yöntemleri kullanılarak işlenir. Şekillendirme sırasında malzemenin; sıcak ve soğuk durumda basınç altında boyut veya şekil değişimine uğramadan plastik özellikleri kullanılarak

işlem uygulanır. Şekillendirme işleminin amacı; metal ürününü istenilen boyut ve şekilde elde etmek, ana metaldeki mikroyapısal bileşenleri yeniden dağıtmak, ana metaldeki tane yapılarını küçültmek ve ana metale deformasyon sertleşmesi yeteneği kazandırmaktır (Doğan 2006; Danchenko, 2007; Bhaduri, 2018).

Şekil verme prosesleri, çalışma sıcaklığına, deformasyon sırasındaki çizgilerin yönüne, deformasyon sırasındaki üretilen gerilmeye göre sınıflandırılabilir de bu yöntemlerden en çok kullanılanı metalin deformasyon sırasında uygulanan gerilmeye dayanır. Proseste deformasyon tek veya çift eksenli olmasına bağlı olarak ön gerilme uygulanır. Bunun için alete göre iş parçası veya kalıp kullanılır. Aynı zamanda mekanik işlem olarak da adlandırılabilen PŞV yönteminde şekillendirme amaçlı kullanılan yöntemler Şekil 2.1.'de gösterilmiştir (Bhaduri, 2018).

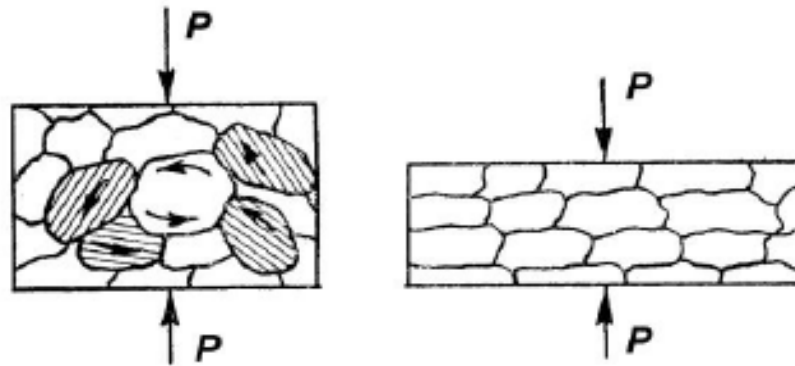


Şekil 2.1. Metal şekil verme proseslerinin şematik gösterimi (Doğan, 2006)

Metalin plastik deformasyonu sadece derin çekme, haddeme gibi plastik deforme edilen parçanın boyut ve şekline değil, aynı zamanda metalin fiziksel-mekaniksel

özelliklerinin yanında kimyasal özelliklerini de değiştirmektedir. Mukavemet, deformasyon derecesinin artırılması ve plastisitenin azalmasıyla artar. Elektriksel direnç artmakta; korozyon direnci, termal iletkenlik ve manyetik iletkenlik azalmaktadır. Plastik deformasyonla proses sırasında değişen mekanik ve fiziksel-kimyasal özellikler sertleştirme veya deformasyon sertleştirme olarak isimlendirilir (Danchenko, 2007). Deformasyon sertleşmesi, malzemenin ergime noktasından çok daha düşük sıcaklıklarda ( $T < 0,4.T_{erg}$ ) plastik deformasyonla mukavemet ve sertliklerinin artmasıdır (Doğan, 2006).

Sertleşirmenin temeli dislokasyon teorisinden gelir. Dislokasyon metallerde, arayer atomlarından, tane bağlarından, kayma düzlemlerin kesişmesi, diğer fazların olması gibi nedenlerden dolayı özgürce hareket edemezler. Dislokasyonun etrafındaki gerilme alanı engellerle ensek bir şekilde etkileşime girer ve düzlemde kayma kısa bir süre içerisinde durmaktadır. Deformasyona devam edilmesi için gerilmenin artırılması ve kaymanın kristal düzlem boyunca devam yönlenmesi gerekir.



Şekil 2.2. Plastik deformasyonun ilerleme durumu (Danchenko, 2007)

Soğuk işlem, uygulanan deformasyon sıcaklığı malzemenin erime sıcaklığının 0,3 ( $T_{def} < 0,3.T_{erg}$ ) katı olduğu anlamına gelmektedir. Soğuk işlemle mukavemeti normalden 2-3 katı arttırmak mümkündür. Malzemenin plastik şekil verilebilirliğini azalmakta ve plastik özelliklerin yenilenmesi ve gerilme direncinin azaltılması için ısıl işlem uygulanması gerekliliğini getirmektedir.

Sıcaklık artışı ergime sıcaklığının 0,3-0,4 katından daha fazla olmadığında yapıda değişiklik meydana getirmez ancak difüzyon prosesinin hızlanması yapı kusurlarının

iyileşmesini ve iç gerilmelerin azalmasına katkı sağlamaktadır. Sıcaklık, ergime sıcaklığının 0,4 katından daha fazla olması durumunda proseste tane büyümesi ön plana çıkmaktadır. Yeni tanenin çekirdekleri, deforme edilmiş taneler arasında şekillenir. Yeni taneler deforme olmuş tanelerin absorpsiyonu ve su vermeden dolayı büyümektedir.

Sıcak işlem, deformasyon sıcaklığının ergime sıcaklığına göre 0,7 katı veya üstünde olması durumunda gerçekleşir. Ergime sıcaklığının 0,3-0,7 katı arasındaki sıcaklık tamamlanmamış sıcak veya soğuk işlem olarak adlandırılır. Soğuk veya sıcak işlem sırasındaki deformasyon mekanizması tanelerde ikizlenme veya kaymadır. Yüksek sıcaklıklarda mekanizmaya ek olarak amorf-difüzyon, taneler arasında yeniden kristallenme gibi mekanizmalar da gerçekleşebilir (Danchenko, 2007).

### **2.2.1. Dövme**

Dövme, muhtemelen en eski ve genişçe kullanılan metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Çalışılan parçaya güç yüklü çekiçlerle tekrarlı darbeler uygulanarak şekillendirme yapılır. Dövme, çekiç ya da basmadan birinin tercih edilmesiyle malzemenin iki kalıp arasına konularak istenilen deformasyonla konfigürasyonun elde edilmesidir. Uygulanan gerilme hızlı veya yavaş bir şekilde olabilir. Dövme, uygulanan ekipmanlara bağlı olarak iki ana gruba ayrılabilir (Danchenko, 2007; Bhaduri, 2018):

1. Kalıpta dövme veya darbeli dövme yönteminde malzeme yüzeyine hızlı bir şekilde darbe uygulanır ve çok kısa bir sürede deformasyon oluşur. İstenilen boyut ve şeklin elde edilmesi için tekrarlı yüklerin uygulanması gerekir. Darbeli dövmede, çekiç malzemeye temas ettiğinde basınç maksimum yoğunluktaki doygunluğa gelir ve enerji deforme edilen metal tarafından absorbe edildiğinden hızlı bir şekilde azalır. Darbeli dövme ile çalışılan parçada deformasyon önceliği yüzey tabakası olduğundan, homojen olmayan bir yapı ve merkezden başlayarak dış tabakaya doğru üniform olmayan mekanik özellikler göstereceğinden geniş parçalar için uygun değildir.

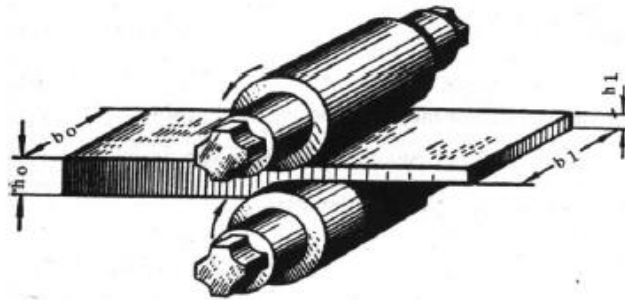
2. Preste dövme yönteminde tekrarlı yükler yerine malzemeyi, malzemenin akmasını sağlayacak şekilde yavaş hızda sıkmakta ve deforme olmuş bölgelerin derin penetrasyonunu sağlamaktadır. Proseste, işlem tek bir yükte tamamlanır ve iki kalıbın hizalanması sorunu kalıpta dövmeye göre daha önemsizdir. Preste dövmede, malzeme deforme edildiği süre boyunca basınç sürekli olarak arttırılır ve tam basınç uygulanmadan basınç maksimum değerine ulaşır. Uygulanan gerilme, çalışılan parçanın merkezine doğru penetre ettiğinden, son ürün yapısı tamamen homojen ve tüm malzemede üniform mekanik özellikler görülür.

%90 üzerindeki dövme işlemleri sıcak işlemle gerçekleştirilmesine rağmen bazı malzemeler soğuk işlenir. Sıcaklığın belirlenmesi; deformasyonu ucuzlaştırması ve kolaylaştırması, istenilen mekanik özellikleri sağlaması ve yüzeyi tamamlaması gibi faktörlerden etkilenir. Soğuk dövme işleminin uygulamasının kısıtlı olması yüksek enerji tüketimin, kalıptaki aşırı aşınma ve uygulanabilecek deformasyonun daha az olmasındandır. Dövme işlemleri genel olarak hem sıcak hem de soğuk durumda uygulanacak duruma göre iki gruba ayrılır:

1. Açık kalıba dövme, çalışılan parça iki yassı kalıp arasında veya basit şekle sahip olan kalıplar arasında deforme edilir. Proses basit şekilli geniş objeler, üretilen parça sayısı az olduğunda ve kapalı kalıpta dövme öncesi ön şekil vermek için kullanılır.
2. Kapalı kalıba dövme, çalışılan parçanın deformasyonu için istenilen konfigürasyonu, iki kalıp blok arasında parçanın sıkılmasıyla istenilen son şekli elde etmek için uygulanır. Proses normalde küçük parçaların dövülmesi için kullanılır (Bhaduri, 2018).

### 2.2.2. Haddeleme

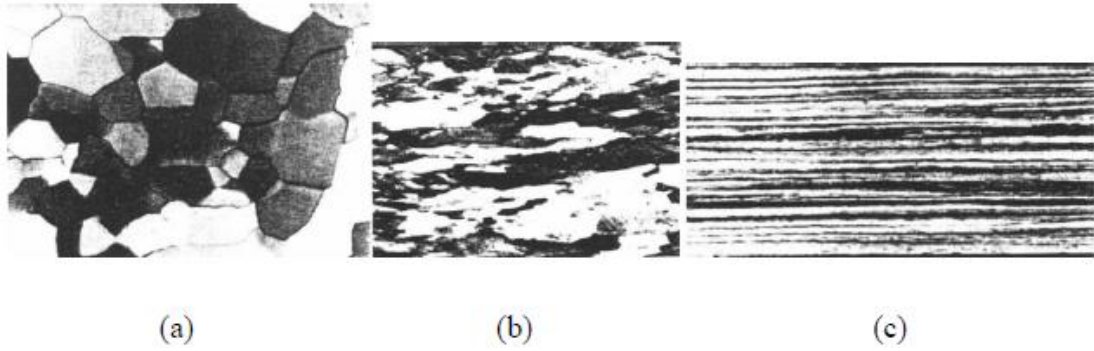
Metalik bir malzemeyi kendi eksenini etrafında dönen ve merdane olarak isimlendirilen iki silindir arasından geçirilerek yapılan plastik şekil verme işlemidir (Şekil 2.3.). Merdaneler çelikten, dökme demirden veya tungsten karbürlerden yapılır. Haddeleme, 1500'lerin sonlarına doğru geliştirilmiş, son ürüne yakınlığı, üretimdeki sürekli hızlılığı ve metal işlenmesindeki ekonomikliğı genişçe kullanılmasını sağlamıştır. Haddeleme dövme gibi birçok metal işleme yönteminden daha hızlıdır ve uzun iş parçalarında istenilen boyut ve şekilde çok hızlı bir şekilde üretimini sağlamaktadır (Baykal, 1999; Bhaduri, 2018).



Şekil 2.3. Haddeleme işleminin şematik gösterimi (Doğan, 2006)

Düz haddeleme en fazla kullanılan haddeleme operasyonudur. Bakır, alüminyum ve çeliğın %90'dan fazlası en az bir kez haddeleme prosesinden geçer. Haddelenmiş çelik araç, demiryolu ray yapımında, haddelenmiş titanyum ve alüminyum alaşımları uçak gövdesi yapımında kullanılır. Haddeleme işlemini başarısı son ürün yüzey ve profilinin kusursuz olması şartı aranır (Ataşen, 2015; Bhaduri, 2018).

İşlem sıcaklığına göre haddeleme soğuk veya sıcak haddeleme olarak sınıflandırılır. Soğuk haddeleme sıcaklığı ergime sıcaklığının 0,3 katından düşük olması veya yeniden kristallenme sıcaklığından düşük olması ( $T < T_{yk}$  veya  $T < 0,3 \cdot T_{erg}$ ) durumunda gerçekleşir. Soğuk haddeleme ile yüzeyi düzgün, ebatları mükemmel ve istenilen mukavemet özelliğı elde edilebilir. Soğuk haddelemede ürüne uygulanan ön ısıtma ve homojenleştirme işlemi metalin iç yapısını değiştirir. Folyo, sac, ince çubuk ve tel gibi kesiti küçük olan ürünlerin elde edilmesini sağlar (Baykal 1999; Doğan 2006).



Şekil 2.4. %99,9 saflıkta alüminyumun; (a) %0, (b) %45 ve (c) %95 soğuk haddelemiş mikroyapı görüntüsü (Doğan, 2006)

Haddeleme işleminde sıcaklık yeniden kristallenme sıcaklığından yüksek veya ergime sıcaklığının yarısından fazla olduğunda ( $T > T_{yk}$  veya  $T > 0,5 \cdot T_{erg}$ ) sıcak haddeleme olarak isimlendirilir. İngot ve küçük gibi geniş ürünlere kesit daralması yapıldığında sıcak haddeleme uygulanır. Sıcak haddeleme dökümle elde edilen ürünün yapısı bozularak kendisinden daha küçük boyutlu ürünler elde edilir. Sıcak haddelemede malzeme yüksek derecede plastik deformasyona uğrayabilir (Baykal, 1999).

### 2.2.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, 1700'lerin sonlarına doğru kurşun boru ve kılıf gibi metal üretimi için geliştirilen bir yöntemdir. Metalin sertlik ve mukavemeti arttıkça gereken basınç ve sıcaklık da artmaktadır. Günümüzde alüminyumun, bakırın, nikelin, kurşunun ve alaşımlarının ekstrüzyonu mümkündür (Bhaduri, 2018).

Ekstrüzyonda geniş kütüklerin kullanılması ekonomik açıdan uygundur. Geniş kütüklerin kullanılması hazırlık aşamasında zamandan tasarruf sağlamaktadır. Bir kütüğün basınçla kalıptan geçirilmesiyle uzun bir ürün elde edilebilir. Kütüğü güçlü bir kalıba yerleştirdikten sonra tokmakla basınç uygulayarak kalıbın dar bir aralığından çıkarılır. Çıkarılmış veya ekstrüze edilmiş metal kalıp ağzı dış çizgilere ve boyutlara sahiptir. Kullanılan kütüğün yüzeyi temiz ve pürüzsüz olursa ürünler yüksek kaliteli olur. Presleme sıcaklığına bağlı olarak metaller dört grupta sınıflandırılır:

1. 500 °C altı, alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun ve alaşımları,
2. 500 ile 900 °C arası, bakır alaşımları,
3. 900 ile 1300 °C arası, nikel, demir, titanyum ve deforme edilmesi zor olan diğer metal ve alaşımları,
4. 1300 °C üstü, özellikli yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller.

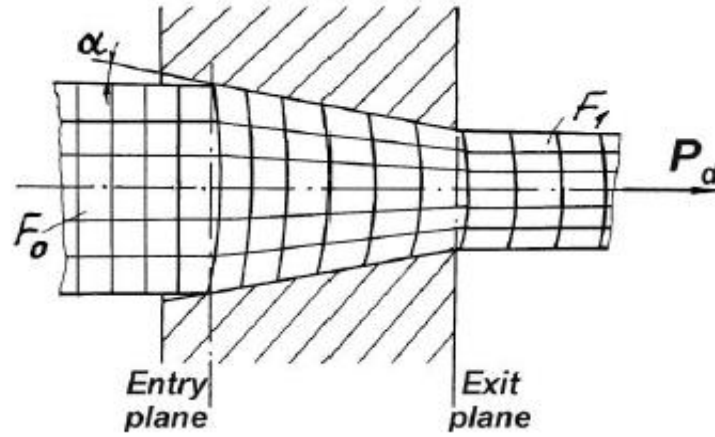
Metaller için kullanılan ekstrüzyon sıcak veya soğuk yapılabilir. Metallerin deformasyonu yüksek sıcaklıklarda daha kolay olduğundan, çoğu metalde ekstrüzyonun fazla miktarda yük uygulanması gerekliliğini azaltmak için sıcak ekstrüze edilirler. Soğuk ekstrüzyon alüminyum, bakır, kurşun gibi birçok metale uygundur. Metaller yüksek deformasyon hızlarında önemli miktarda ısı üretilerek yapılabilir (Danchenko, 2007; Bhaduri, 2018).

#### **2.2.4. Çekme**

Çekme, çalışılan parçanın kesit alanını azaltan veya şekil değişimi sağlayan bir soğuk işlemdir. Genelde düz şerit, yuvarlak boru veya çubuk kullanılarak çekme kuvvetiyle kalıp boyunca uygulanır. Kalıpta çekme mukavemetine maruz kalan malzeme, plastik deformasyona neden olan benzer iki dik basma gerilmesi oluşturur. Çekme genelde oda sıcaklığında uygulanır ancak proses sırasındaki sıcaklık deformasyon sonucu üretilen ısıdan dolayı sürekli artacaktır.

Çekme işlemi genelde tamamlayıcı bir operasyondur ve çekilmiş ürünler kullanım için hazır veya başka bir işleme tabi tutulur. Soğuk çekmenin ürünü istenilen şekil ve boyutta elde edebilmesinin yanı sıra amacı şöyledir:

1. Boyut toleranslarının yakın olması,
2. Yüzey kalitesinin artırması,
3. Çekme, metalin sertlik ve mukavemetini deformasyon sertleşmesiyle artırır.



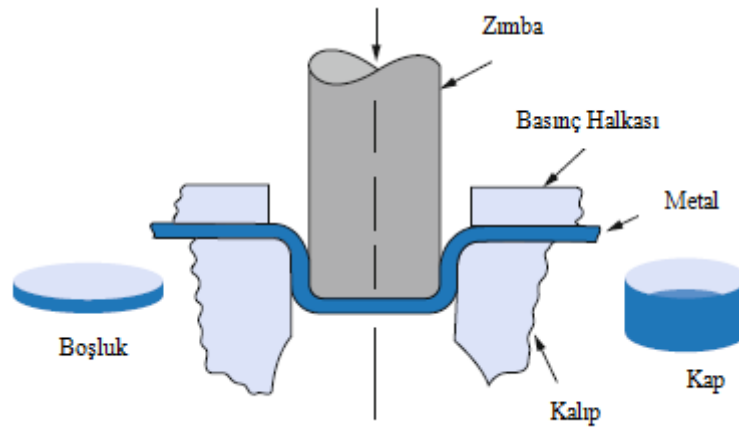
Şekil 2.5. Çekme boyunca deformasyon bölgesinde meydana gelen değişimin şematik gösterimi (Danченко, 2007)

Soğuk çekme büyük miktarda kablolarda, çubuklarda, borularda ve özel kesitlerde tamamlayıcı operasyon olarak uygulanır. Çekmede daha çok haddelenmiş, özel kesme gibi benzer uygulamalar uygulanmış demir ve demir olmayan metaller kullanılır. Çapı 150 mm'ye kadar ulaşan borulara soğuk çekmeyle bazen çapı 1,5 mm'ye düşürmek mümkün olmaktadır (Danченко, 2007; Bhaduri, 2018).

### 2.2.5. Derin çekme

En çok kullanılan çekme prosesinden biri olan derin çekme, silindirik altlıkla veya dikdörtgen kalıptan ince metal levha üretmek için kullanılır. Derin çekmede kullanılacak metal ve alaşımlarının plastik uzama göstermesi gerekir. Deformasyon kalınlığı 100 mm'den daha fazla olan levhalara soğuk durumda gerçekleştirilirken, plastikliği düşük olan alaşımlar sıcak veya ılık durumda gerçekleştirilir. Derin çekmede uygulama gerilme durumuna ve kütük şekil değişimine bağlı olarak iki grupta sınıflandırılabilir; ayırma (kesme, boşluk oluşturma, delme) ve şekil değiştirme (eğme, uzatma, azaltma, çapaklama, şekillendirme ve diğerleri).

Kesme işlemi, açık kontur boyunca kütüğün ayrılmasını içermektedir. Metalin kesilmesi için paralel veya eğimli bıçaklı makasların yanı sıra dairesel makaslar da kullanılabilir. Kapalı kontur boyunca kütüğün ayrılması işlemi boşluk oluşturma olarak isimlendirilir. Delme ve çapaklama işlemi kalıpta gerçekleştirilir.



Şekil 2.6. Derin çekme işleminin şematik gösterimi (Bhaduri, 2018)

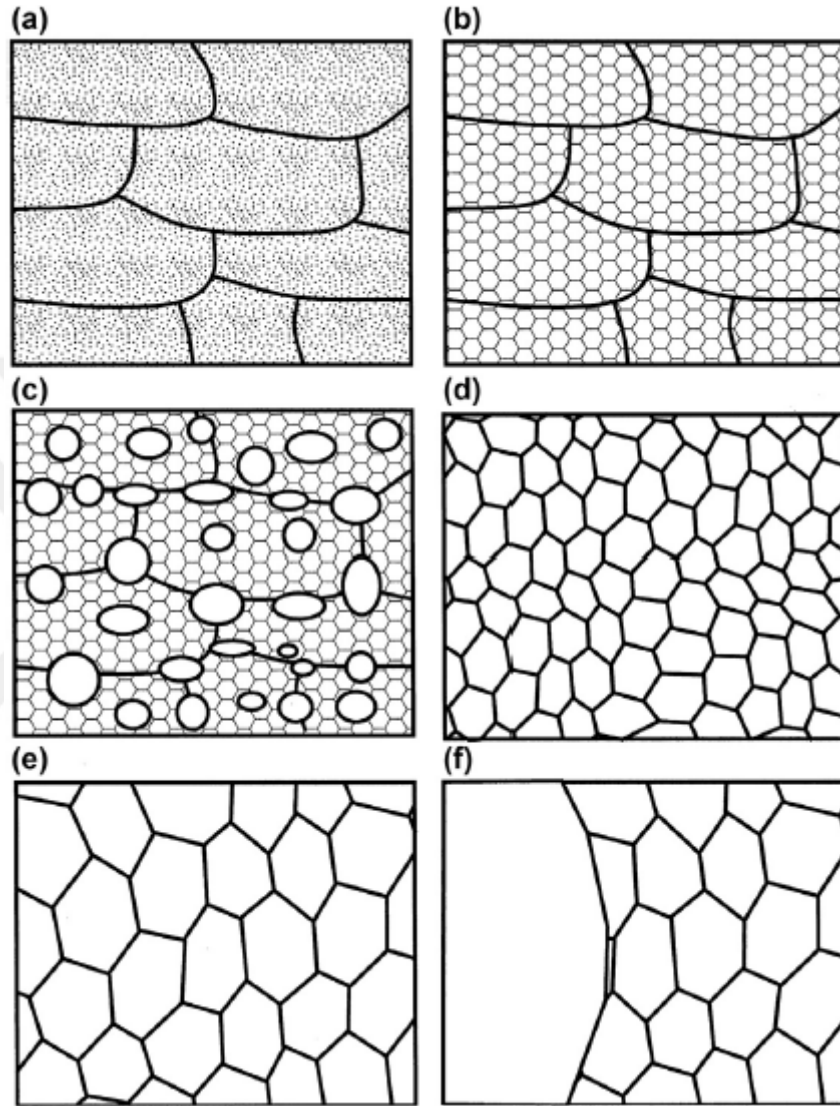
Eğme kalıplarda çeşitli ürünlerin üretimi için genişçe kullanılmaktadır. Eğme prosesi, eğilen malzemedeki dış fiberlerin uzatılması ve içtekilere basınç uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Eğilen çap azaldığı sürece deformasyon değeri nispeten artmaktadır (Danchenko, 2007).

### 2.3. Yeniden Kristallenme

Kristalin malzemenin serbest enerjisi, deformasyon sırasında arayüzey ve dislokasyonlardan dolayı artmakta ve bu kusurlardan dolayı malzeme termodinamik olarak kararsız halde gelmektedir. Malzeme daha sonra yüksek sıcaklığa (tavlama) ısıtılırsa katı durumda difüzyon gibi termal olarak aktive edilmiş proses mekanizması kusurları ortadan kaldıracaktır veya daha düşük enerji konfigürasyonu sağlayabilir (Humphreys ve ark., 2017).

Yeniden kristallenme, toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi olarak üç kademedен oluşmaktadır. Toparlanma kademesinde, deforme olmuş tanelerde herhangi bir değişiklik olmaz iken, tanelerin yapısını değiştirerek sonraki aşama için uygun halde getirir. Yeniden kristallenmede yeni eş eksenli oluşmuş taneler eski taneleri absorbe eder. Deforme olmuş metalin mekanik ve fiziksel özellikleri tavlama durumuna geri döner. Sertlik, akma ve son mukavemet gibi mekanik özellikler toparlanma süresi boyunca yavaşça değişir ancak bu özellikler yeniden kristallenme sırasında düşük bir sıcaklık aralığında hızlıca değişebilmektedir.

Elektriksel direnç ve yoğunluk gibi fiziksel özellikler toparlanma sırasında az da olsa değişim gösterse de, önemli değişim yeniden kristallenme sırasında görülür (Uyar, 2005).



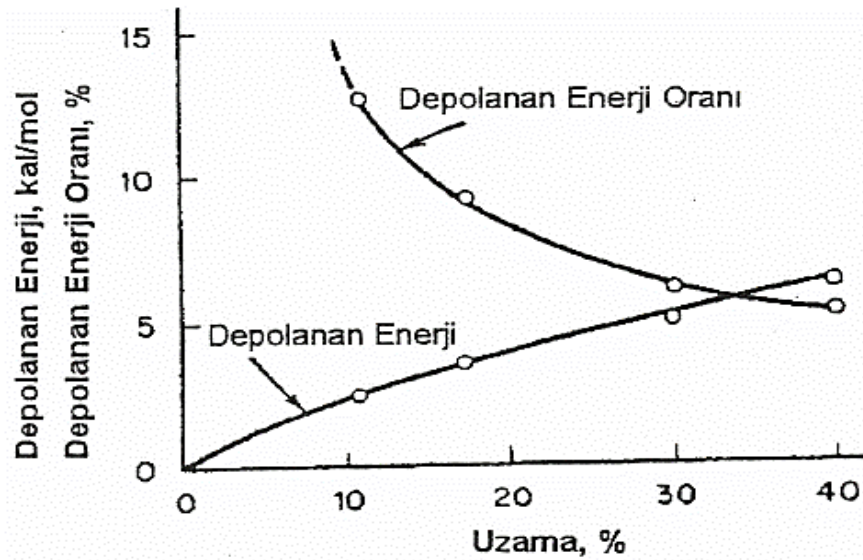
Şekil 2.7. Tavlama prosesinin şematik gösterimi; (a) deforme olmuş durumu, (b) toparlanmış, (c) kısmen yeniden kristallenmiş, (d) tamamen yeniden kristallenmiş, (e) tane büyümesi, (f) anormal tane büyümesi (Humphreys ve ark., 2017).

Metal deforme olduğunda ısı açığa çıkarır ve  $\sim\%1$  ısı malzemede depolanır. Deforme edilmiş metalin bütün özellik değişimleri depolanmış enerji tarafından sağlanır ve deformasyon sırasında üretilen nokta hataları ve diskolasyonlar, aşırı serbest enerjinin bir sonucudur. Nokta hataları, deformasyonla depolanan enerjiye büyük miktarda katkı sağlamaz ancak boşluk ve arayer hareketleri çok yüksek

olduğundan çok düşük sıcaklıklarda dahi deforme olurlar. Oda sıcaklığında deformasyonda depolanmış enerjinin neredeyse hepsi dislokasyonların birikiminden gelir ve deforme olmakla tavlama arasındaki en önemli fark dislokasyon içeriği ve ilişkisinden gelir. Toparlanma ve yeniden kristallenme sırasındaki deformasyon mikroyapısı yoğunluğa, dağılıma ve dislokasyon ilişkisine bağlıdır (Humphreys ve ark., 2017).

Deforme olmuş metalin tavlama sadece depolanan enerjiye değil, aynı zamanda uzamsal dağılımına da bağlıdır. Homojen olmayan depolanmış enerji yeniden kristallenmenin çekirdeklenmesini etkiler ve heterojenin büyük ölçekli olması yeni tanelerin büyümesine katkı sağlamaktadır (Humphreys ve ark., 2017).

Soğuk işlem uygulandığında enerjinin çoğu harcanarak ısıya dönüşmekte ancak kristalin malzemede bulunan kusurlardan dolayı yaklaşık %10'a karşılık gelen enerji metalde depolanmaktadır. Deformasyon miktarının artırılması depolanan enerjiyi arttırdığı (Şekil 2.8.) saf bakırın (%99,99) uzama miktarına bağlı olarak söylenebilir (Doğan, 2006).



Şekil 2.8. Soğuk işlem sonucu %99,99 saflıktaki bakırın depolanan enerji durumu (Doğan, 2006)

Soğuk işlem mukavemet artırma işlemlerinden biridir. Mukavemet artırma mekanizması dislokasyon yoğunluğuna bağlı olup, soğuk işlem uygulandığı sürece

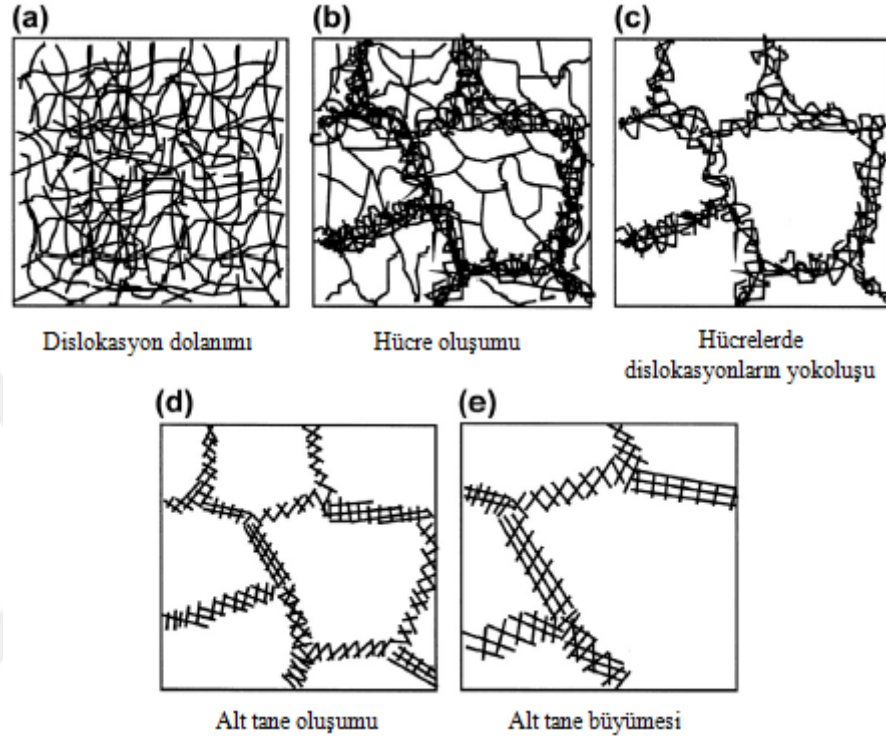
dislokasyon yoğunluğu da artmaktadır. Metalin tavllanması sonucu sahip olduğu dislokasyon yoğunluğu  $10^6$ - $10^8$  cm/cm<sup>3</sup> ve soğuk deforme edilmiş metalin dislokasyon yoğunluğu  $\sim 10^{12}$  cm/cm<sup>3</sup> olmaktadır (Doğan, 2006).

Kristallerin birçok mekanik ve fiziksel özellikleri anizotropiktir ve polikristalin özelliklerin toplanması bireysel tane veya alt tanelerin rastgele veya kristallografik yönelmesiyle olacaktır. Polikristalin yığılımının kristalitlerdeki kristallografik yönelme dağılımı malzemede tekstür olarak bilinir. Deformasyon sırasında görülen yönelmeler rastgele değildir. Deformasyonda yönelme kayma veya ikizlenme sisteminde gerçekleşir ve deforme edilmiş metal de tekstür veya yönelme tercih eder. Metal daha sonra yeniden kristallendiği zaman, mikroyapıda bölgelerdeki belirli yönelmeler çekirdeklenmeyle bazı özellikler gelişir. Çekirdeğin büyümesi, mikroyapıdaki bölgelerin yönelmesine bağlıdır. Bu özelliklerle birlikte tekstür aynı zamanda yeniden kristallenme görülmüş metalde de gelişir (Humphreys ve ark., 2017).

### 2.3.1. Toparlanma

Malzemenin soğuk işleme mukavemeti arttırıldığında yapısında var olan dislokasyonlar eski durumuna göre farklı bir düzenle yapı içerisinde bulunmaya başlar. Dislokasyonlar daha düşük iç enerji oluşturacak şekilde yeniden dizilmesi poligonizasyon olarak adlandırılır. Yeni bir düzende olan dislokasyon küçük açılı tane sınırları oluşturur. Poligonizasyon hızı, sıcaklığa bağlı olmakla birlikte sıcaklığın artması dislokasyon kaymasını kolaylaştırmaktadır. Düşük açılı sınırlarla alt taneler kenar dislokasyonlarıyla oluşmaktadır. Toparlanma mekanizmasında tane sınırlarının hareketi çok fazla görülmez. Toparlanma malzeme yapısındaki dislokasyon değişiminden dolayıdır ve en önemli kısım mikroyapıda görülen değişimlerdir. Toparlanma, tavlama sonrası oluşur ve bu durum özellikleri ve mikroyapıyı tamamen ilk durumuna getirir. Toparlanma Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi sistematik olarak bir seri olayların gelişmesiyle oluşur. Tavlama sırasında gerçekleşen bu aşamalar malzeme, saflık, gerilme, uzama oranı, deformasyon sıcaklığı ve tavlama sıcaklığı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Toparlanma ve

yeniden kristallenme, deformasyon durumunda depolanan enerji ile gerçekleştirilmektedir. Yeniden kristallenme gerçekleştiğinde ve alt yapının deformasyonu tamamlandığında toparlanma işlemi bitmiş olur (Doğan, 2006; Karcı, 2008; Humphreys ve ark., 2017).



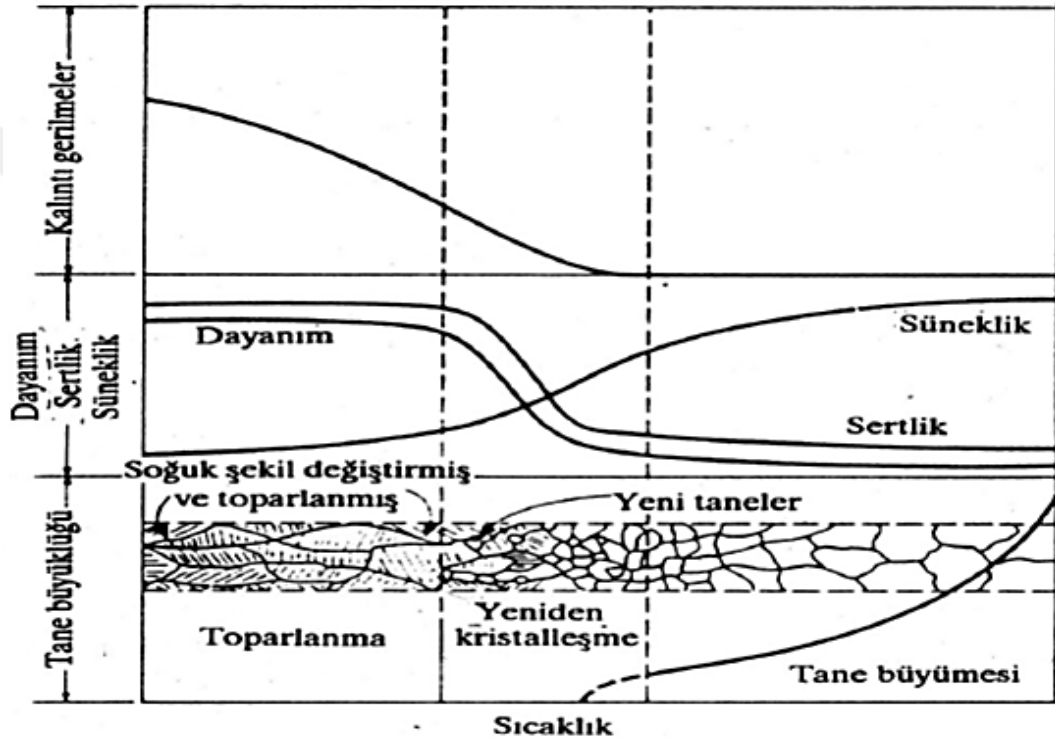
Şekil 2.9. Plastik deforme olmuş malzemenin toparlanma sürecindeki çeşitli kademeleri (Humphreys ve ark., 2017)

Toparlanma sırasında malzemede meydana gelen değişimler önemli ölçüde değildir. Mikroyapıya optik mikroskopla bakıldığında çok fazla değişim gözlenmez. Plastik deformasyon sonucu toparlanma işlemi uygulanmış malzemede elektriksel direnç hariç fiziksel özelliklerde belirgin değişim olmaz. Toparlanma sırasında mekanik özelliklerde mikroyapıda küçük değişiklik olsa da akma mukavemetinin ve sertliğinin değiştiği görülür (Humphreys ve ark., 2017).

### 2.3.2. Yeniden kristallenme

Yeniden kristallenme toparlanma kademesinden sonra gerçekleşen bir hadisedir. Yeniden kristallenme sırasında toparlanma aşamasında oluşmuş taneler kaybolarak yeni taneler oluşur. Yeni kristaller tane sınırlarına yakın bölgeler, deformasyon

ikizlerinin ve kayma düzlemlerinin kesişmesi gibi enerji için yüksek latis gerilimlerinin olduğu noktalarda çekirdeklenir. Toparlanma sırasında düzene girmiş olan dislokasyonlar yeniden kristallenmeyle oluşan tane sınırlarına giderek dislokasyon oranını azaltmakta ve dislokasyonsuz yeni taneler oluşturmaktadır. Yeniden kristallenme katı-katı bir dönüşümdür, işlem öncesi uygulanan soğuk işleme malzeme kazandığı mukavemet gibi mekanik özelliklerini bu kademedeki kaybetmektedir (Uyar, 2005; Doğan, 2006; Karcı, 2008).



Şekil 2.10. Toparlanma ve yeniden kristallenmenin tane yapısındaki etkilerinin şematik gösterimi (Doğan, 2006)

Yeniden kristallenme, geri saçılımlı elektron mikroskobu gibi optik metalografik yöntemle tespit edilebilecek mikroyapısal bir dönüşümdür. İzotermal deneyler için yeniden kristallenme  $X_v$  ile ifade edilir ve yeniden kristallenme hızının ölçümü için %50'sinin ( $t_{0,5}$ ) tamamlanması yeterli olmaktadır. Tavlanmanın çeşitli sıcaklıklarda sabit sürede (1 saat) gerçekleştiği (eş süreli) deneylerde yeniden kristallenme sıcaklığı malzemenin %50'sinin yeniden kristallendiği sıcaklık olarak tanımlanabilir. Uygulanan sıcaklık genel olarak malzemenin ergime sıcaklığının %40-60 kadarı ( $0,4.T_{erg} < T_{yk} < 0,6.T_{erg}$ ) olmaktadır. Yeniden kristallenme sıcaklığı kimyasal bileşim, ilk tane boyutu gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğundan her seferinde farklı

olmaktadır. Yeniden kristallenme kademesi çekirdeklenme ve büyüme aşamalarından oluşmaktadır. Çekirdeklenmede, yüksek açılı tane sınırlarıyla ayrılmış tavllanmış veya deforme edilmiş malzemenin düşük iç enerjiyle kristalitte büyüme gerçekleşir. Büyüme, daha çok yeni tanelerin yeniden kristallenme sırasında çekirdeklerinin analiz edilmesiyle tespit edilir (Uyar, 2005; Karcı, 2008; Humphreys ve ark., 2017).

Yeniden kristallenmenin malzemedeki davranışının incelenmesi üzerine yapılan en öncül çalışma sırasıyla Mehl (1948), Burke ve Turnbull'un (1952) gerçekleştirmiş oldukları "Yeniden Kristallenme Kanunları" şeklindeki formülasyonudur. Uzun bir deneysel çalışmaya dayanan bu kanunlar, başlangıç tane boyutunun, tavlama sıcaklığı gibi proses parametrelerinin, yeniden kristallenme süresinin ve yeniden kristallenme sonrası tane boyutunun etkisine dayanmaktadır. Deformasyonun depolanmış enerji tarafında gerçekleştirildiği, prosesin termal aktive edildiği, yeniden kristallenmenin çekirdeklenme ve büyüme kademelerinden oluştuğu durumda gerçekleşir:

1. Yeniden kristallenmeyi başlatmak için çok düşük bir deformasyon gereklidir. Deformasyon yeniden kristallenme için yeterli çekirdek sağlamalı ve büyüme için yeterli yükte olmalıdır.
2. Tavlama süresinin artmasıyla yeniden kristallenmenin gerçekleştiği sıcaklık azalır. Yeniden kristallenme termal olarak aktive edilir ve yeniden kristallenme hızı ve sıcaklığı Arrhenius denklemiyle bulunur.
3. Yeniden kristallenmenin gerçekleştiği sıcaklık gerilmenin artmasıyla azalır. Yeniden kristallenme için önemli olan depolanmış enerji, soğuk işleme gerilmenin artmasıyla artar. Gerilmeyle oryantasyon eğilimi arttığından yeni tanelerin oluşumu teşvik edilir. Her iki durumda çekirdeklenme ve büyüme gerçekleştiğinde, malzeme daha fazla deforme olacağından düşük sıcaklıkta gerçekleşir.
4. Yeniden kristallenmiş tane boyutu başlıca deformasyon miktarına, büyük miktardaki deformasyonda daha küçük olmasına ve tavlama sıcaklığına hassas olmamasına bağlıdır. Çekirdeklerin sayısı veya çekirdeklenme hızı, deformasyon sertleşmesinden daha çok etkilenir. Bu sebeple daha yüksek

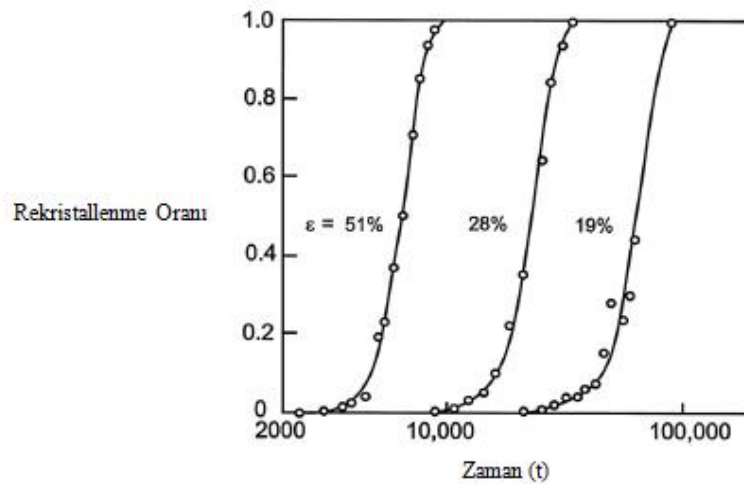
gerilim hacminde daha fazla çekirdek oluşturacak ve daha ince tane boyutu olacaktır.

- Optimum deformasyonda yeniden kristallenme sıcaklığı tane boyutunun artmasıyla ve deformasyon sıcaklığının daha yüksekte yapılmasıyla artar. Tane boyutuna bakıldığında, tane sınırları çekirdeklenme için tercih edilir. Bu sebeple daha büyük tane sınırı daha az çekirdeklenme bölgesi oluşturur ve yeniden kristallenme daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Daha yüksek deformasyon sıcaklığında deformasyon sırasında daha fazla toparlanma oluşur ve depolanan enerji daha az olur (Uyar, 2005; Humphreys ve ark., 2017).

Yeniden kristallenme termal aktive edilen bir prosestir. Yeniden kristallenmeyi etkileyen önemli parametreler; deformasyon miktarı, metalin saflığı, başlangıç tane boyutu, zaman ve sıcaklıktır.

### 2.3.2.1. Yeniden kristallenmeye deformasyonun etkisi

Deformasyon miktarı ve türü, depolanan enerjiyi ve çekirdek sayısını etkilediğinden yeniden kristallenme hızını da değiştirmektedir. Minimum uygulanabilecek %1-3 arasındaki gerilmelerde yeniden kristallenme gerçekleşmez. Bu gerilmenin üzerinde yeniden kristallenme hızı artmaktadır.



Şekil 2.11. 350 °C'de tavllanmış alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği (Humphreys ve ark., 2017)

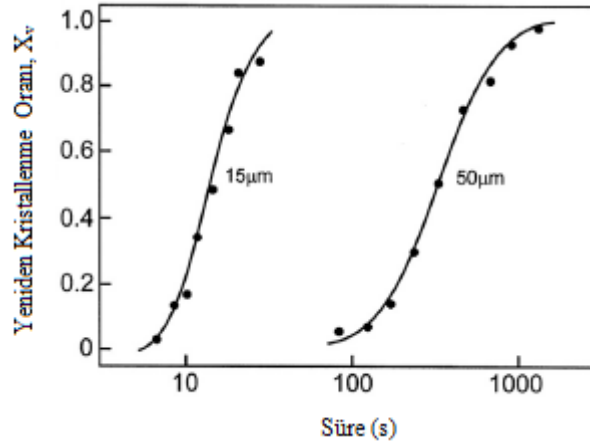
Deformasyon hatalı bölgeleri arttırarak, depolanan enerjiyi de arttırır ve çekirdeklenmeyi de kolaylaştırdığından yeniden kristallenme süresi azalır. Şekil 2.11.'de çekme gerilmesinin alüminyumun yeniden kristallenme kinetiği üzerindeki etkisi görülmektedir. Gerilmenin arttırılması yeniden kristallenmiş tane boyutunu azaltması, gerilmeyle oryantasyon farklarının kararlı bir şekilde artmasından dolayıdır (Doğan, 2006; Humphreys ve ark., 2017).

### 2.3.2.2. Yeniden kristallenmeye başlangıç tane boyutunun etkisi

Başlangıç tane boyutunun küçük olduğu bir malzemede yeniden kristallenme, kaba öğütülmüş malzemeye göre hızlı gerçekleşir (Şekil 2.12.). Başlangıç tane boyutunun yeniden kristallenme hızını etkilemesinin birden fazla yolu vardır:

1. Düşük gerilmelerde ( $\epsilon < 0,5$ ) deforme edilmiş metalin depolanan enerjisi tane boyutunun azalmasıyla artar.
2. Çekirdeklenme bölgelerinin olduğu tane sınırlarında düşük gerilmelerin olması ve ince öğütülmüş malzemelerde çekirdeklenme bölgeleri daha fazladır.
3. Deformasyon ve kayma bandı gibi homojensizlikler daha çok kaba öğütülmüş malzemelerde gerçekleşir. Tane boyutunun artmasıyla çekirdeklenme bölgeleri artar.
4. Deformasyon tekstürü başlangıç tane boyutundan etkilenir.

Yeniden kristallenmenin uygulanabilmesi için mukavemet arttırma yöntemlerinden sadece soğuk işleme yapılır. Mukavemetin arttırılması tane sınırındaki kristallerdeki kayma hareketini engelleyerek distorse olmalarını sağlar. Başlangıç tane boyutunun küçülmesiyle tane sınırları artacaktır ve böylece distorse edilen kristal kafesler de artacaktır. Başlangıç tane boyutunun küçülmesi çekirdeklenme hızını arttırır (Doğan, 2006; Humphreys ve ark., 2017).



Şekil 2.12. %93 oranında soğuk haddelenmiş bakırın başlangıç tane boyutunun etkisi (Humphreys ve ark., 2017)

### 2.3.2.3. Yeniden kristallenmeye metal saflığının etkisi

Yeniden kristallenme hızı metalin saf olduğu durumda empüriteli durumuna göre daha hızlı gerçekleşir. Ticari malzemelerde empürite türünün miktarı kesin belirtilmediği ve bazı durumlarda ikinci faz partikülleri oluşabildiği halde metalin saf olması yeniden kristallenmeyi etkiler. Tablo 2.8.'de çeşitli metalin haddeleme öncesi ve sonrası yeniden kristallenme sıcaklık değişimleri görülebilmektedir.

Tablo 2.8. Yeniden kristallenme sıcaklığı üzerine saflığın etkisi (Humphreys ve ark., 2017)

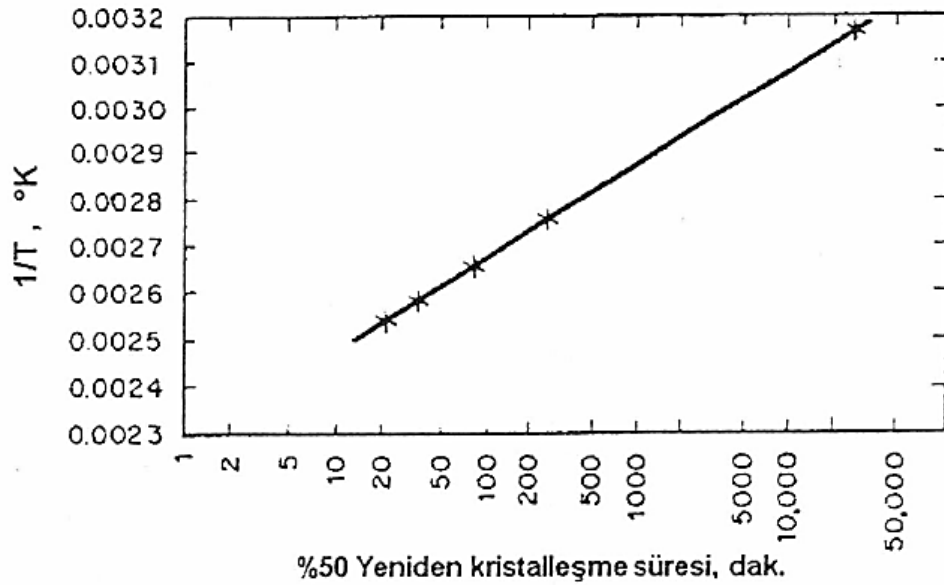
Metal	Yeniden Kristallenme Sıcaklığı, °C	
	Saflık	Artılmış Bölge
Alüminyum	200	-50
Bakır	180	80
Demir	480	300
Nikel	600	300
Zirkonyum	450	170

Empüriteler yeniden kristallenme uygulanan tanelerin büyümesini ve çekirdeklenmesini etkileyebilir. Ancak yeniden kristallenme için çekirdeklenme hızını ölçmek ve empürite etkilerini hesaplamak zordur (Humphreys ve ark., 2017).

### 2.3.2.4. Yeniden kristallenmeye zaman ve sıcaklığın etkisi

Sıcaklığın artması akma gerilmesini azalttığı halde, özellikle deformasyon sertleşmesi olacak şekilde plastik deformasyona güçlü bir etkisi vardır. Yüksek sıcaklıkta deformasyon ve düşük gerilme uygulanması depolanan enerji az olmasına ve yeniden kristallenmenin düşük sıcaklıkla daha zor gerçekleşmesine sebep olur (Humphreys ve ark., 2017).

Yeniden kristallenmede uygulanan işlemlerin hesaplanması Arrhenius eşitliğiyle yapılır. Şekil 2.13.'te sıcaklığın tersinin yeniden kristallenme süresine bağlı olarak değişimi verilmiştir.

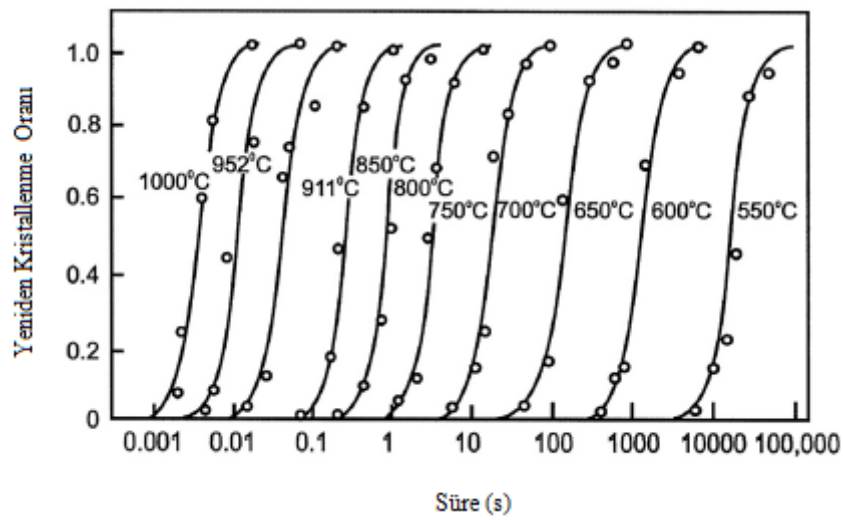


Şekil 2.13. Saf bakırmın %50 yeniden kristallenme durumuna göre mutlak sıcaklığın tersinin ilişkisi (Doğan, 2006)

### 2.3.2.5. Tavlama sıcaklığı

Tavlama sıcaklığının artması yeniden kristallenme kinetiğini değiştirmektedir ve yeniden kristallenme hızının hesaplanması için yeniden kristallenme dönüşümünün %50'sinin ( $t_{0,5}$ ) süreyi göz önünde bulundurmak önemlidir (Şekil 2.14.). Çekirdeklenme hızı sıcaklığın artmasıyla artar ve çekirdeklenme hızının hesaplanması Arrhenius denklemiyle olmaktadır.

Tavlama sıcaklığına numunenin ısıtma hızı da yeniden kristallenme hızını etkilemektedir. Isıtma hızı tavlama ve yeniden kristallenme hızını etkileyebilir. Yavaş ısıtma hızı yeniden kristallenme öncesinde toparlanmayı arttırıyorsa, yeniden kristallenme daha geç oluşur. Toparlanmanın aktivasyon enerjisi yeniden kristallenmeden daha düşükse, düşük ısıtma hızlarında toparlanmayı arttırabilir. Toparlanmanın ve yeniden kristallenmenin hızı latis difüzyonuna ve sıcaklığa bağlıdır (Humphreys ve ark., 2017).

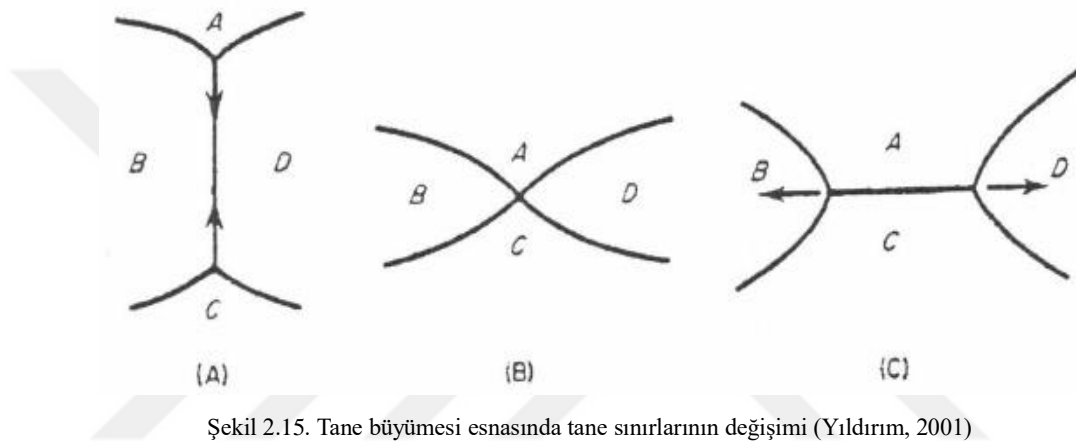


Şekil 2.14. %60 deforme edilmiş Fe-%3,5Si'nin tavlama sıcaklığının etkisi (Humphreys ve ark., 2017)

### 2.3.3. Tane büyümesi

Soğuk işlemin depolanan enerjisi tarafından gerçekleşen yeniden kristallenme tamamlandığında, yapı henüz kararlı durumda olmadığından yeniden kristallenmiş taneler büyüyebilir. Tavlamanın gerekenden daha uzun süre uygulanması yapıdaki veya yeniden kristallenmiş tanelerin büyümesine neden olabilir. Yeniden kristallenmenin tamamlandığı bir malzemedeki tane sınırlarının yüzey enerjisi tane büyümesi için başlatıcı rol oynar. Tane büyüdükçe ve sayısı azaldıkça, tane sınırlarının bölgeleri azalır ve sonucunda toplam yüzey enerjisi de azalır (Yıldırım, 2001; Uyar, 2005; Humphreys ve ark., 2017).

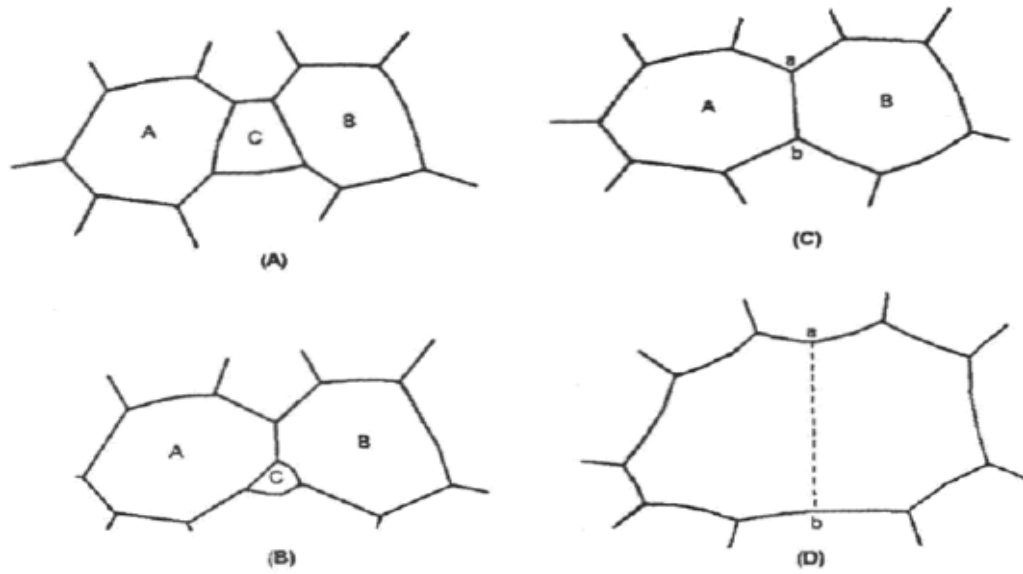
Tane büyümesinde tane sınırlarının yüzey enerjisi önemli rol oynamaktadır. Tane sınırlarının yüzey enerjisine bağlı olarak değişimi Şekil 2.15. ve Şekil 2.16.'da görülebilmektedir. Şekil 2.15.a'da yer alan tanelerden B ile D arasındaki tane sınırı gittikçe küçülerek yok olarak, Şekil 2.15.b'deki gibi A ile C tanelerini yakınlştırarak yeni bir sınır oluşturmaktadır. Şekil 2.15.c'de oluşan yeni tane sınırları büyümeye devam ettiğinde B ile D sınırları gittikçe uzaklaşır ve A ile C sınırları oluşur. Tane büyümesi sırasındaki tane sınırlarının küçülmesi durumu yüzey enerjisi ile ilişkilendirilebilir (Yıldırım, 2001; Doğan, 2006).



Şekil 2.15. Tane büyümesi esnasında tane sınırlarının değişimi (Yıldırım, 2001)

Şekil 2.16.'daki tane birleşmesi mekanizması tane sınırlarının enerjisine bağlı olarak küçülmesi veya büyümesi durumunu açıklamaktadır. Düşük enerjiye sahip tane sınırı yüksek enerjili tane sınırıyla birleşerek tane büyük taneler oluşturur (Yıldırım, 2001).

Tane büyümesi, normal tane büyümesi ve anormal tane büyümesi olarak iki gruba ayrılmaktadır. Anormal tane büyümesi aynı zamanda ikincil yeniden kristallenme olarak isimlendirilebilir. Tane boyut dağılımının ve şeklinin zamandan bağımsız olduğu çok düşük bir aralık vardır. Kısa süreli bir büyümeden sonra tane boyut dağılımı sabit olan mikroyapı yarı-kararlı bir durumda olur. Anormal büyüme sırasında, mikroyapıdaki birkaç tane büyür ve küçük matriksli taneleri tüketerek çift modlu tane boyut dağılımı oluşturmaktadır. Ancak belirli bir süre sonra büyük tanelerin büyümesi durur ve normal tane büyümesi devam eder (Uyar, 2005; Humphreys ve ark., 2017).



Şekil 2.16. Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterimi (Doğan, 2006)

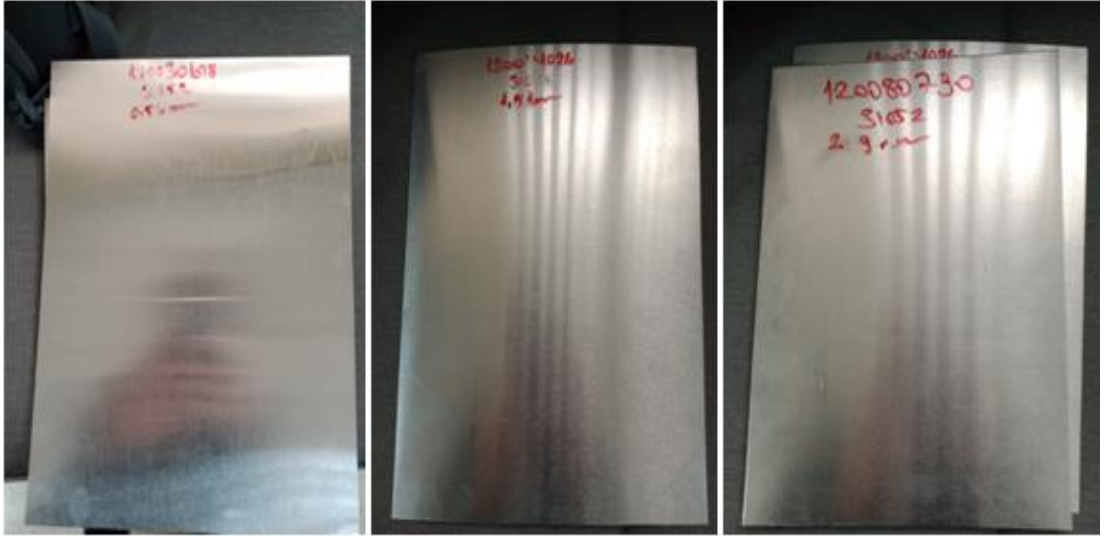
Tane büyümesini etkileyen ana faktörler sıcaklık, numune boyutu, tekstür ve tanelerdir:

1. Sıcaklık; tane büyümesi için başlatıcı güç (depolanan enerji) genel çok düşük olduğundan, önemli derecedeki tane büyümesi sadece yüksek sıcaklıklarda görülebilir.
2. Partikül; tane sınırlarının çözünen maddeyle sabitlenmesi ve ikinci faz partikülleri gibi faktörler tane büyümesini kısıtlandırır.
3. Numune Boyutu; tane büyüme hızı, tane boyutunun numune kalınlığından daha büyük olması durumunda azalır.
4. Tekstür; malzeme güçlü bir tekstüre sahip olduğunda geniş kısımdaki düşük enerjiyle düşük açılı sınırlar oluşturarak, tane büyümesi için başlatıcı gücü azaltır (Uyar, 2005).

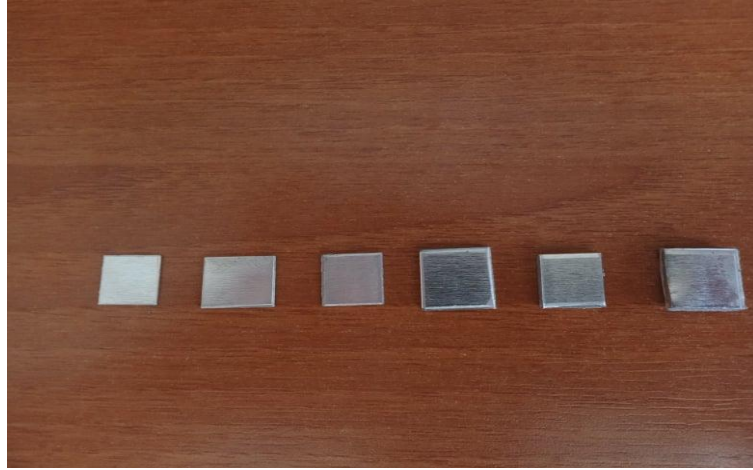
## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Materyal

Farklı haddeleme aşamalarından geçmiş 25 cm x 50 cm ebatlarında olan AA3105 alüminyum alaşım sacları, Akyazı - Sakarya'da bulunan ASAŞ Alüminyum firmasından temin edilmiştir. Sacların kalınlıkları sırasıyla 0,56, 1,02, 1,51, 1,76, 2,89 ve 3,0 mm'dir. Bu saclar Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Bu saclardan Şekil 3.2.'de gösterilen 1 cm x 1 cm ebatlarında numuneler metalografik inceleme için hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AA3105 alüminyum saclar



Şekil 3.2. Metalografik çalışmalarda kullanılan AA3205 alüminyum sac numuneleri

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Deformasyon analizi

Kademeli olarak soğuk haddelenmiş saclarda deformasyon miktarı ( $\varepsilon$ ) Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır. Bu denklemde  $t_0$  başlangıç kalınlığı,  $t_s$  ise sacların haddeleme sonrası kalınlığıdır. Bu çalışmada kinetik inceleme 1,02 mm ve 0,56 mm kalınlığındaki saclar için yapıldığından her bir kademenin deformasyon miktarı ayrı ayrı hesaplanıp Denklem 3.2.'de verildiği gibi toplanmıştır.

$$\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_s} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n \quad (3.2)$$

Buna göre 1,02 mm kalınlığındaki deformasyon yüzdesi %107,8 ( $\varepsilon_T = 1,078$ ) ve 0,56 mm kalınlığındaki sac için deformasyon yüzdesi %167,8 ( $\varepsilon_T = 1,678$ ) olarak hesaplanmıştır.

### 3.2.2. Kinetik analiz

Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC) özellikle alüminyum bazlı alaşımlar olmak üzere hafif metallerin analizinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Çökeltme,

homojenizasyon ve yeniden kristallenme gibi katı hal reaksiyonları, ergitme ve katılaşma gibi katı – sıvı reaksiyonlarının incelenmesinde DSC analizi kullanılmaktadır. İlave olarak bu tür reaksiyonların kinetiğinin kantitatif analizinde de kullanılmaktadır. (Starink, 2004).

Soğuk haddeleme ile Alüminyum 3105 alaşımından üretilmiş levhalarda yeniden kristallenme kinetiği, bir termal analiz yöntemi olan DSC kullanılarak incelenmiştir. Farklı ısıtma hızlarında alınan DSC grafiklerindeki pik sıcaklıkları kullanılarak ve Kissenger, Boswell, Osawa ve Starink denklemleri kullanılarak yeniden kristallenme reaksiyonunun aktivasyon enerjisi tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Kissenger denklemi (Kissenger, 1957);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = k_1 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.3)$$

Boswell denklemi (Boswell, 1980);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p}\right) = k_2 - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.4)$$

Ozawa denklemi (Ozawa, 1992);

$$\ln(\beta) = k_3 - 1,051 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.5)$$

Starink denklemi (Starink, 2004);

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^{1,92}}\right) = -k_4 - 1,0008 \cdot \frac{E_a}{RT_p} \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde; T pik sıcaklığı (K),  $\beta$  ısıtma hızı (K/dak),  $E_a$  aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R gaz sabiti (8,314 j/mol.K) ve  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  sabitlerdir.

Buradan verilen 4 farklı yönteme göre, izotermal olmayan koşullar altında numunelerin sabit bir ısıtma hızı ile ısıtılması sonucu elde edilen DSC grafiklerindeki pik sıcaklıkları kullanılarak 2 farklı numune için yeniden kristallenme için gerekli aktivasyon enerjileri tespit edilmiştir.

### 3.3. Kullanılan Cihazlar

Numunelerin optik mikroskopta incelenmesi malzemenin içyapı bilimi olan metalografi işlemi uygulanmıştır. AA-3105 numunelerinin metalografiye uygun olması açısından ve optik mikroskopta incelenecek boyutta olabilmesi için levha 25 cm x 50 cm numunelerden 1 cm x 1 cm boyutlarında kesimler yapılmıştır. Kesim işlemi için DURMA SB-2506 CNC makinesi ile kesim yapılmıştır.

İstenilen boyutta hazırlanan numunelerin yüzeyleri giyotin kaynaklı kesim izleri kalmakta ve kesim sırasında numune bir miktar deforme olmaktadır. Numunenin ilk durumdaki yapısına göre analiz alabilmek için zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi için (ekil 3.3.) TRD Grinder-Polisher cihazı kullanılmıştır.

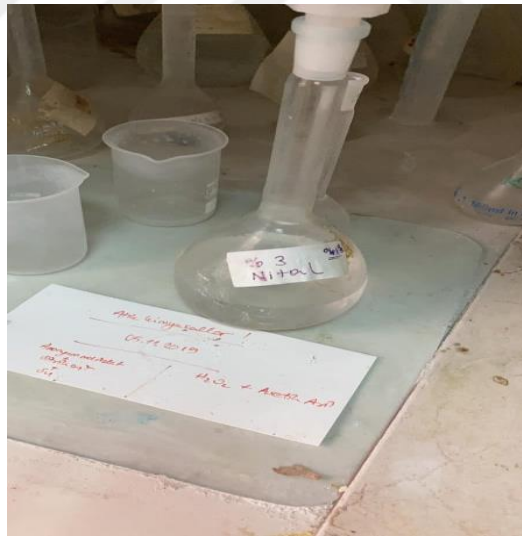


Şekil 3.3. Deneyde kullanılan zımparalama ve parlatma makinesi

Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve numuneyi bozmamak için zımpara tane numarası sırasıyla 800, 1000, 1200 ve 4000 kullanılarak parlatma işlemi için uygun hale getirilmiştir. Zımpara tane boyutunun artması her kademedeki kesme işleminden gelen deformasyon miktarını daha da azalmaktadır.

Zımparalamayla yüzey pürüzlülüğü giderilmesi ve kesme sırasındaki deformasyon azaltılmasıyla parlatma işlemi uygulanabilmektedir. Parlatma için kullanılan solüsyon alümina olmuştur. Yüzeyinin ayna kadar olduğu durumda parlatma işlemi tamamlanmıştır.

Parlatma işlemi sonrası tane sınırlarının ortaya çıkarılması ve optik mikroskoba uygun hale gelebilmesi için dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi için %3 Nital solüsyonuna (Şekil 3.4.) daldırma yöntemi uygulanmıştır. Dağlama işleminde numune kalınlığına bağlı tutma süresi her bir numune için farklı olacak şekilde yapılmıştır.



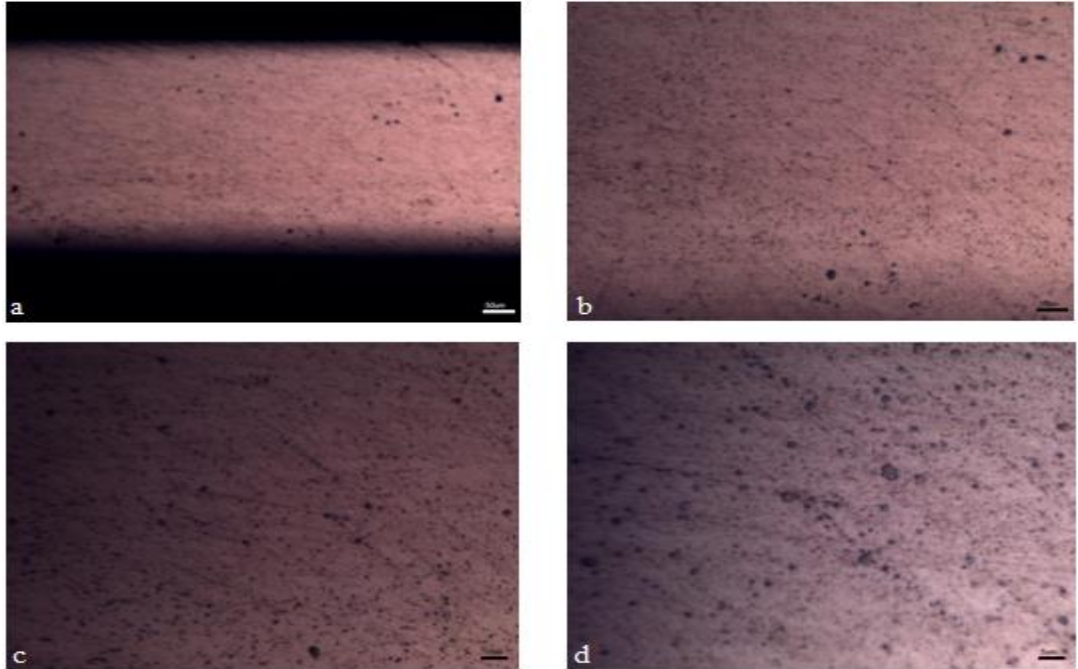
Şekil 3.4. Dağlama için kullanılan %3 Nital solüsyonu

Farklı deformasyon oranlarında soğuk haddelenmiş numunelerin termal analizleri, Bartın Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan TA Instruments SDTQ 600 cihazıyla, hava atmosferi koşulları altında 5, 7.5 ve 10 °C/dak ısıtma hızlarında alınmıştır.

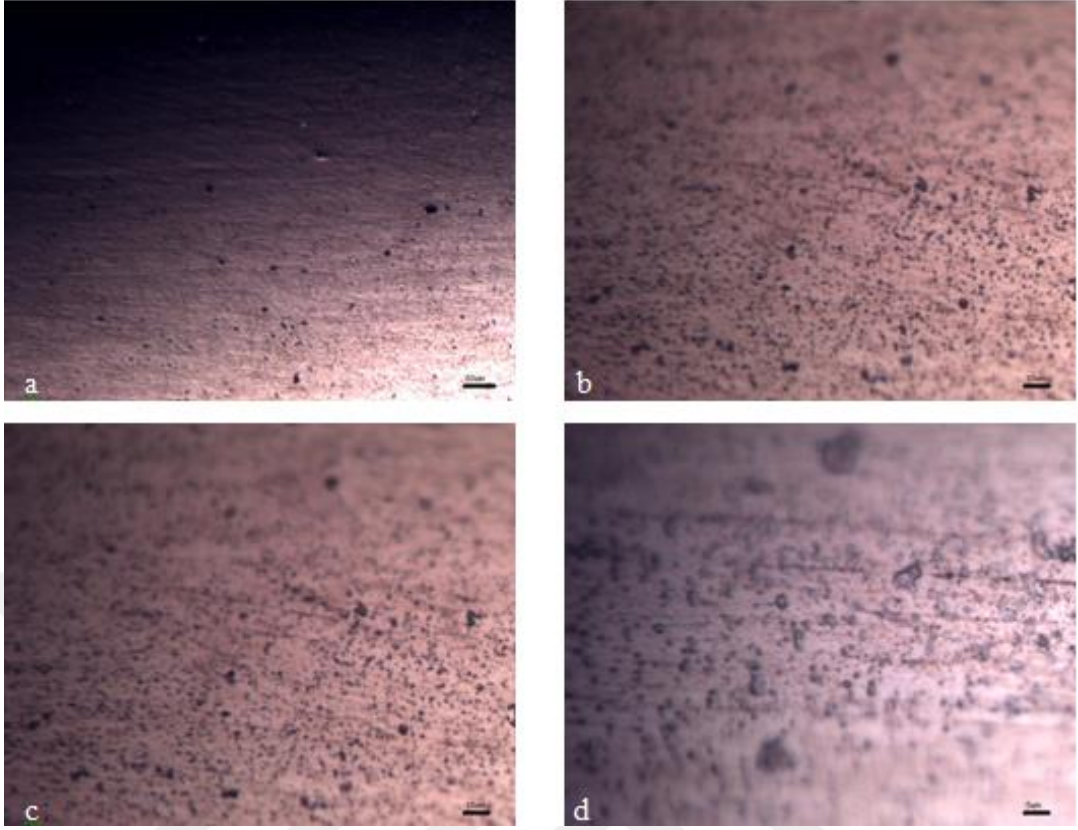
## BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Metalografik Çalışmalar

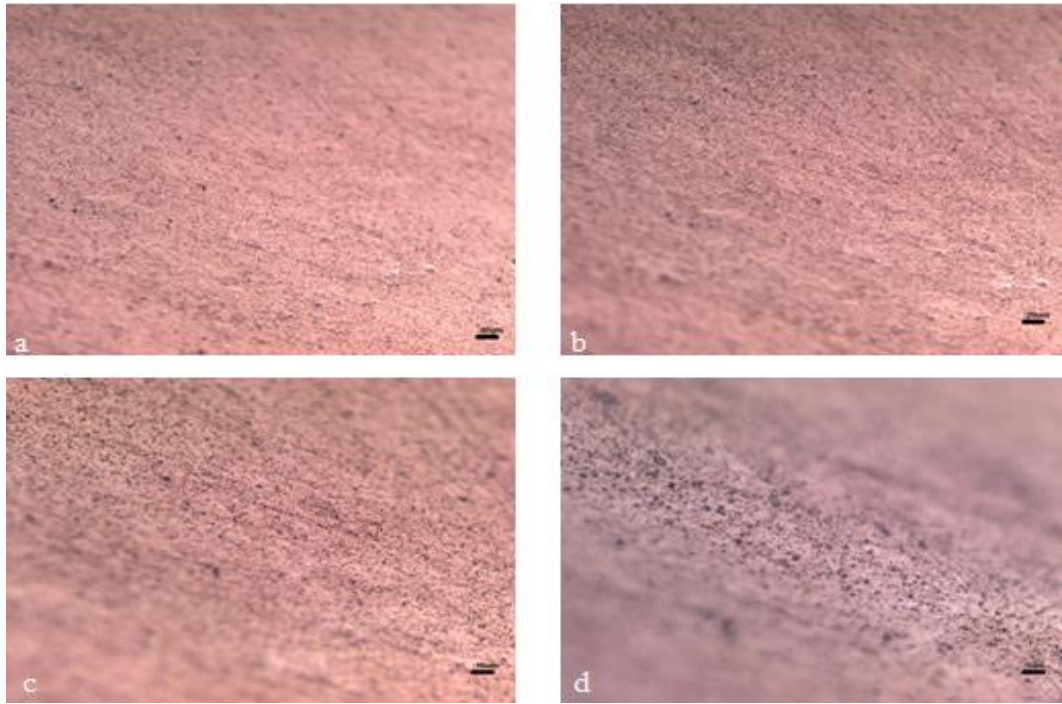
Bu bölümde AA3105 alüminyum alaşımlarında ait farklı kalınlıklardaki dağlama sonrası mikroyapıları optik mikroskopta görüntülenmiştir. Şekil 4.1.'de 0,56 mm kalınlığındaki numunenin çeşitli büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.2.'de 1,02 mm kalınlığındaki numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.3.'te 1.51 mm kalınlığındaki numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.4.'te 1,76 mm kalınlığındaki numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.5.'te 2,89 mm kalınlığındaki numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.6.'da 3 mm kalınlığındaki numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



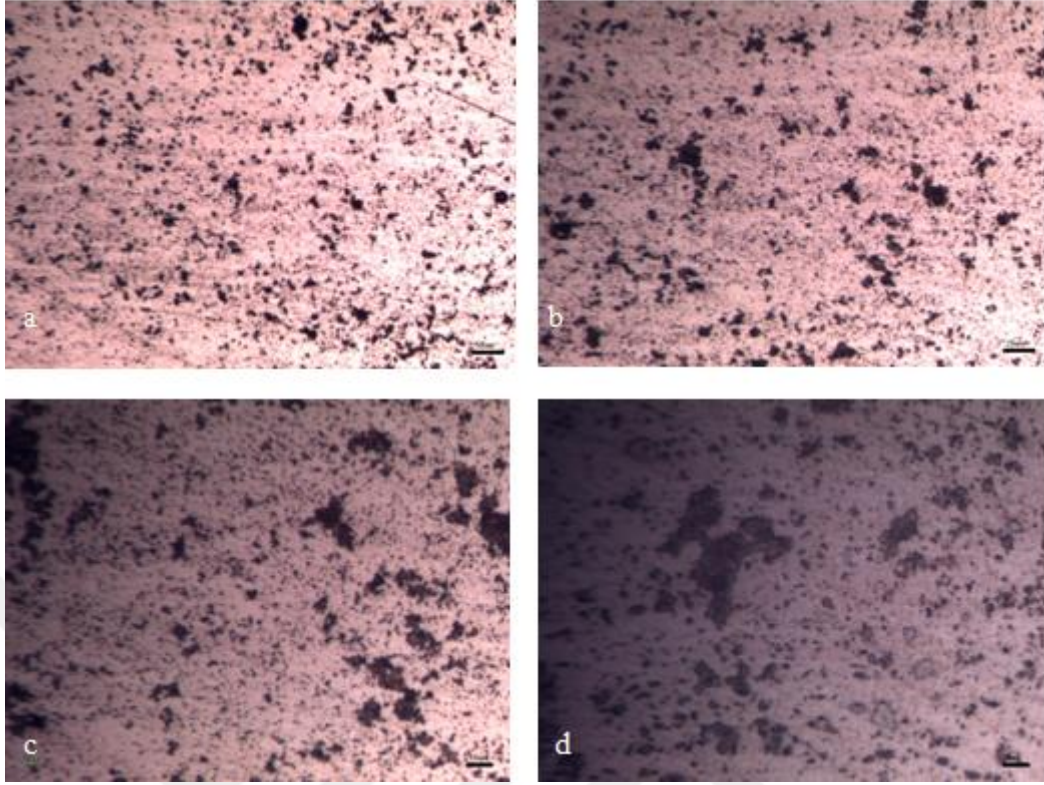
Şekil 4.1. AA3105 alaşımının 0,56 mm kalınlığındaki numunenin çeşitli büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.



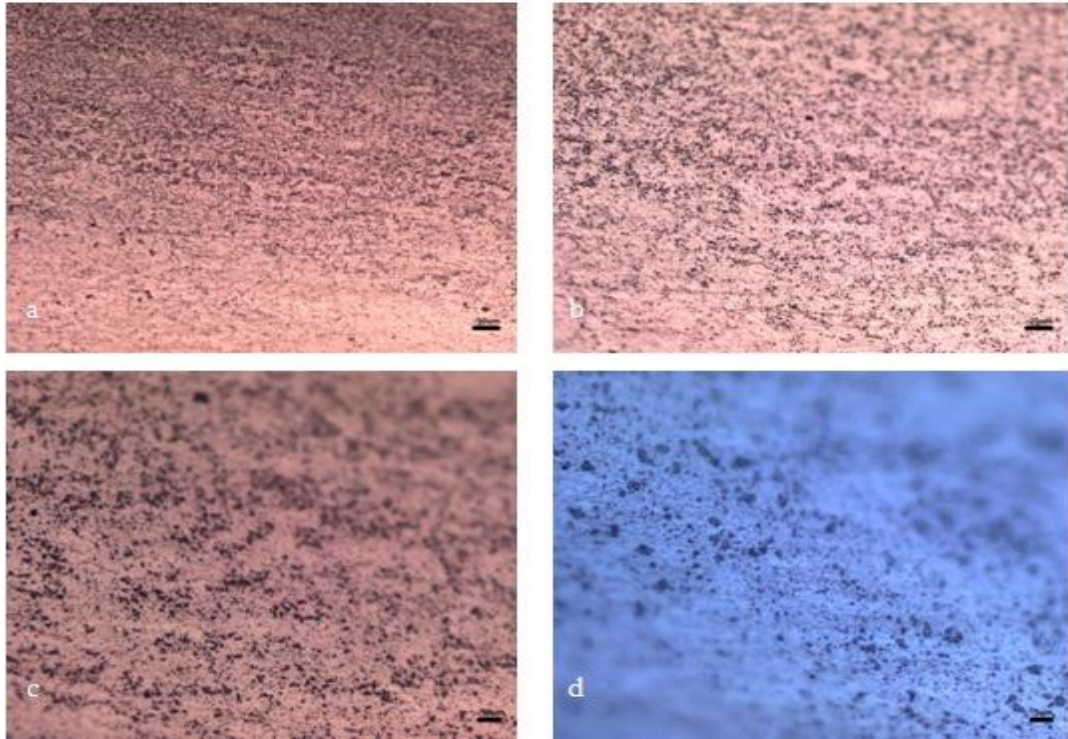
Şekil 4.2. AA3105 alaşımının 1,02 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.



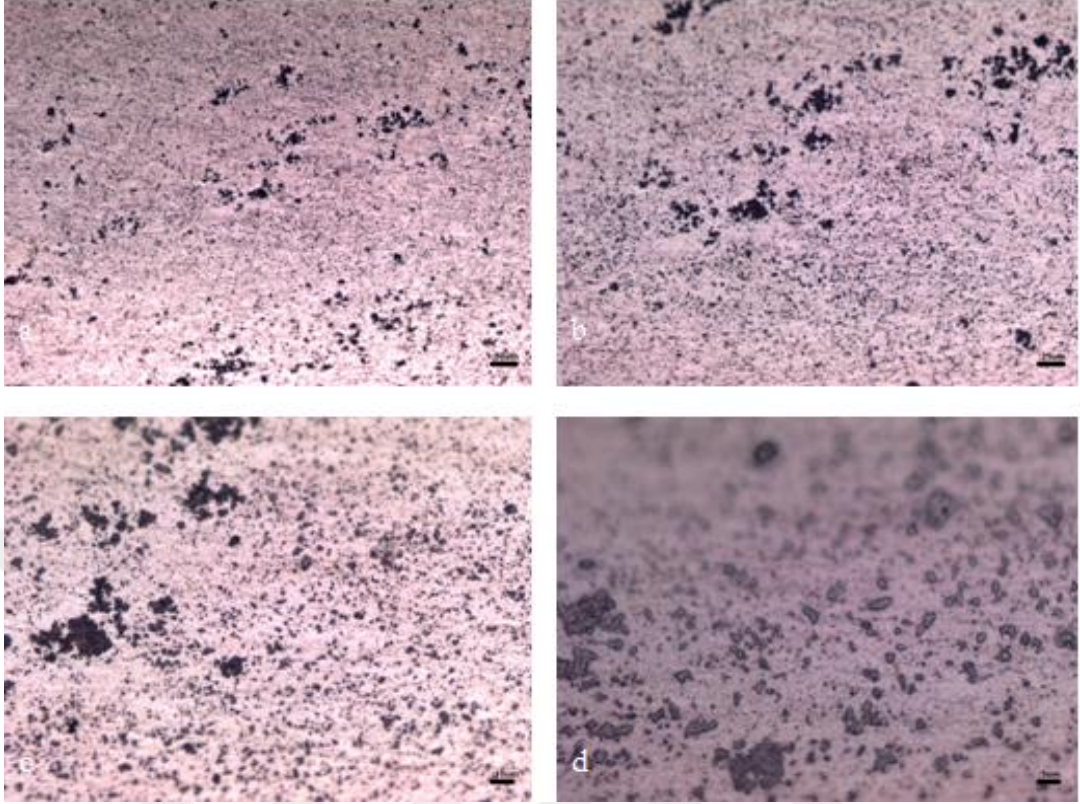
Şekil 4.3. AA3105 alaşımının 1,51 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüsü; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.



Şekil 4.4. AA3105 alaşımının 1,76 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.



Şekil 4.5. AA3105 alaşımının 2,89 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.

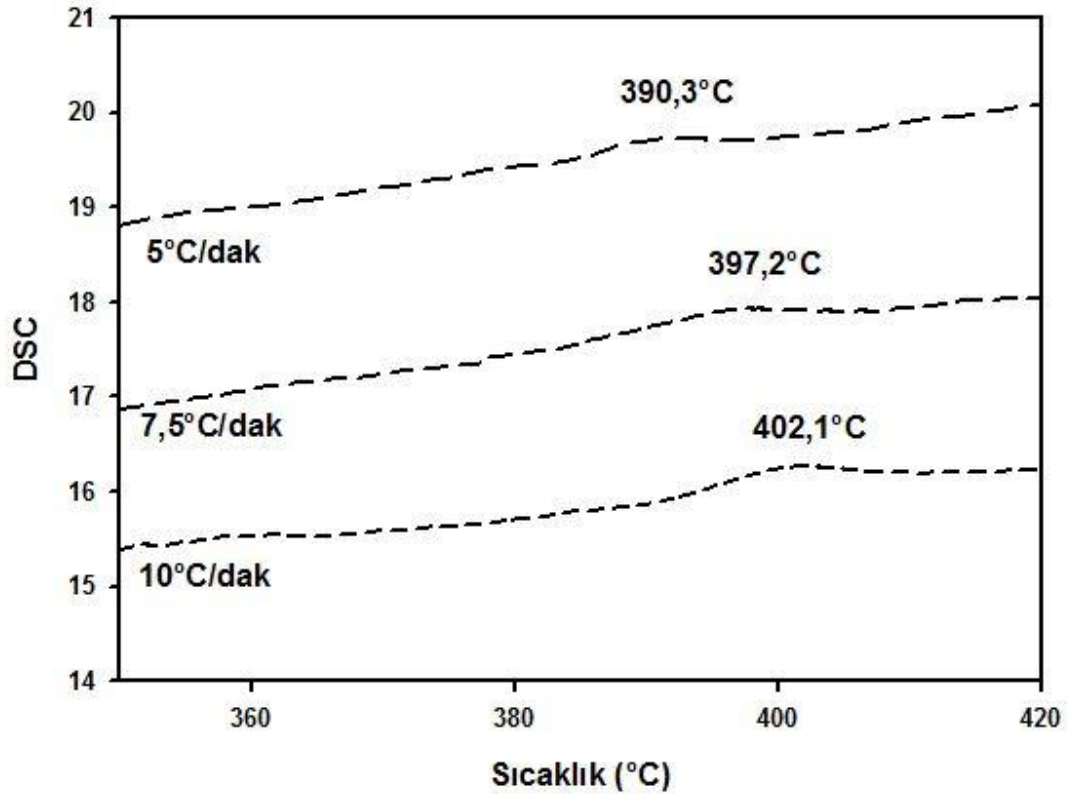


Şekil 4.6. AA3105 alaşımının 3 mm kalınlığındaki numunenin farklı büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri; a) 50x, b) 100x, c) 200x, d) 500x.

Mikroyapılara bakıldığında kalınlığın artması tanelerin görüntülenmesini kolaylaştırdığı görülür. Şekil 4.1., 4.2. ve 4.3.'teki mikroyapılara bakıldığında tanelerin dağılımının dağınık ve belirgin olmadığı görülür. Ortalama tane boyutu 2-3  $\mu\text{m}$  arasında olduğu görülmektedir. Kalınlığın 1,76 mm'yi geçmesiyle birlikte taneler daha belirgin olmuştur.

## 4.2. Yeniden Kristallenme Kinetiği

Şekil 4.7.'de 3 mm kalınlıktan 1,02 mm kalınlığa kademeli olarak soğuk haddelenmiş AA3105 sacların 350 – 420°C sıcaklık aralığındaki DSC analizleri verilmiştir. Farklı ısıtma hızlarında alınan DSC eğrilerinde yeniden kristallenme olayı çok küçük ekzotermik pikler olarak gözlenmiştir. Tespit edilen bu pik sıcaklıkları ile birlikte kinetik model verileri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

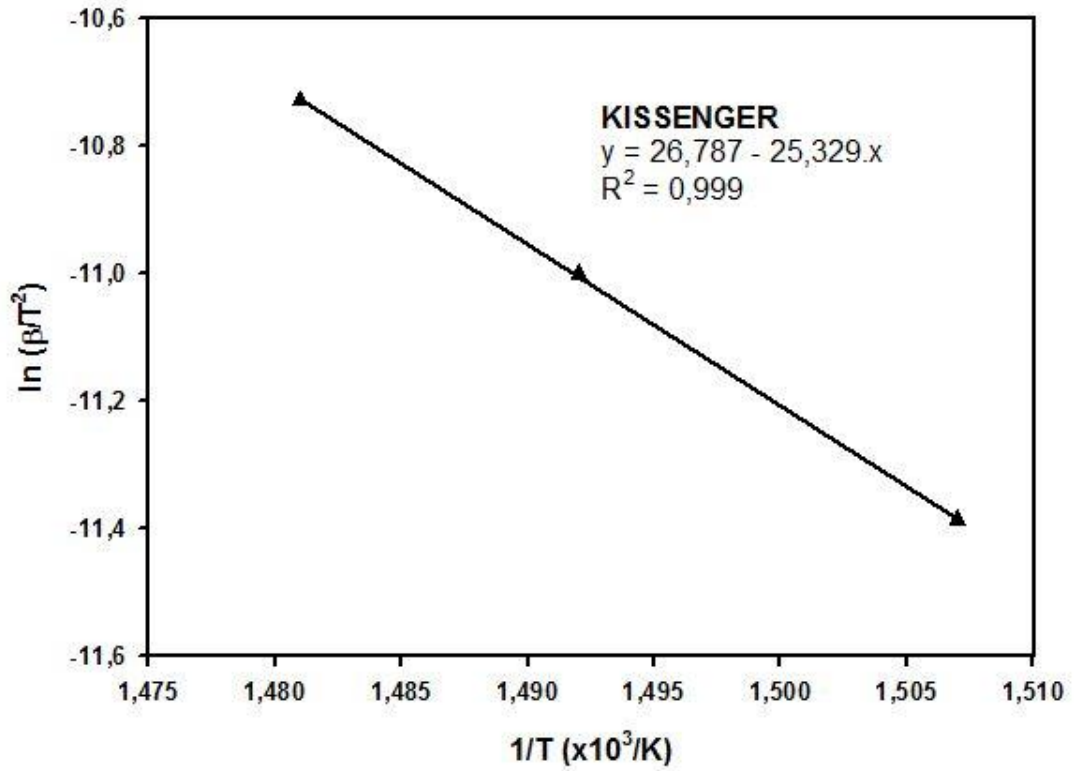
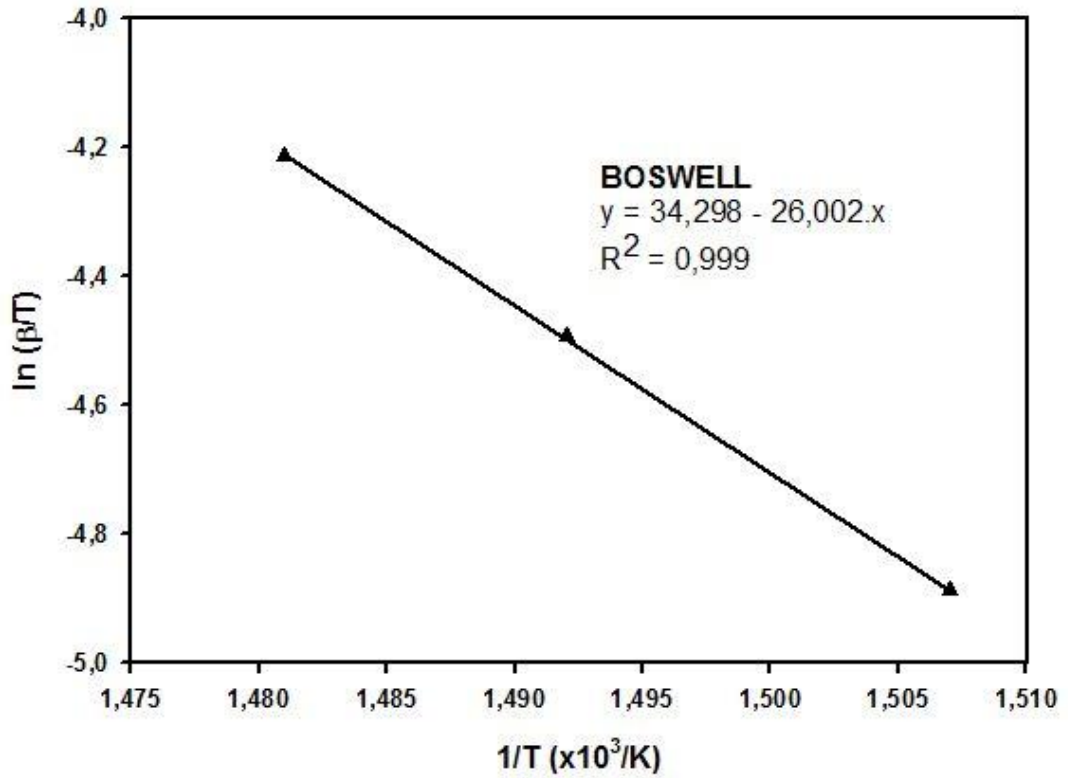


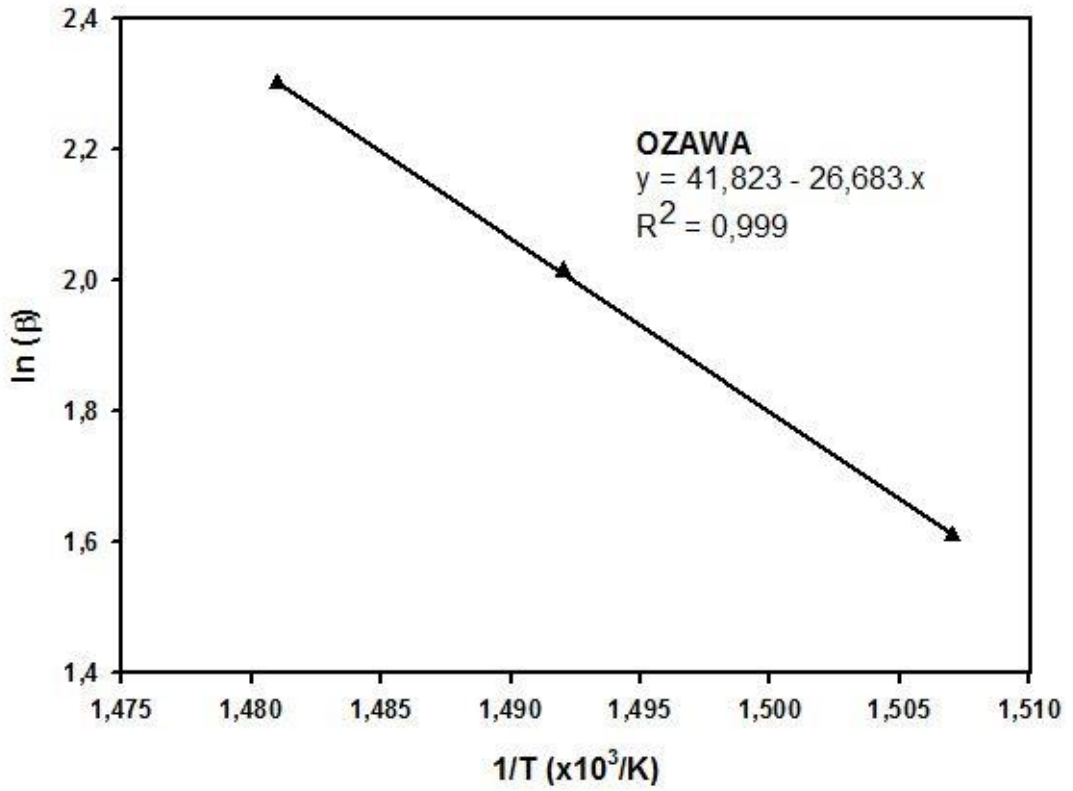
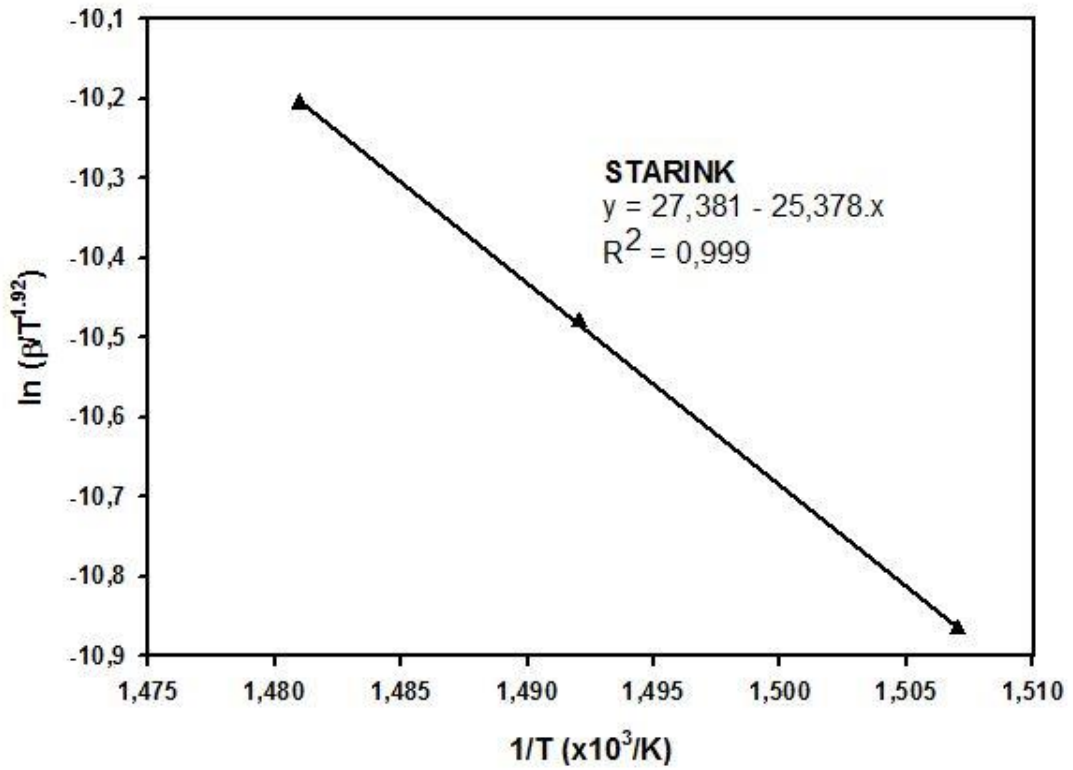
Şekil 4.7.  $\epsilon T = 1,078$  olan AA3105 sacların DSC analizi

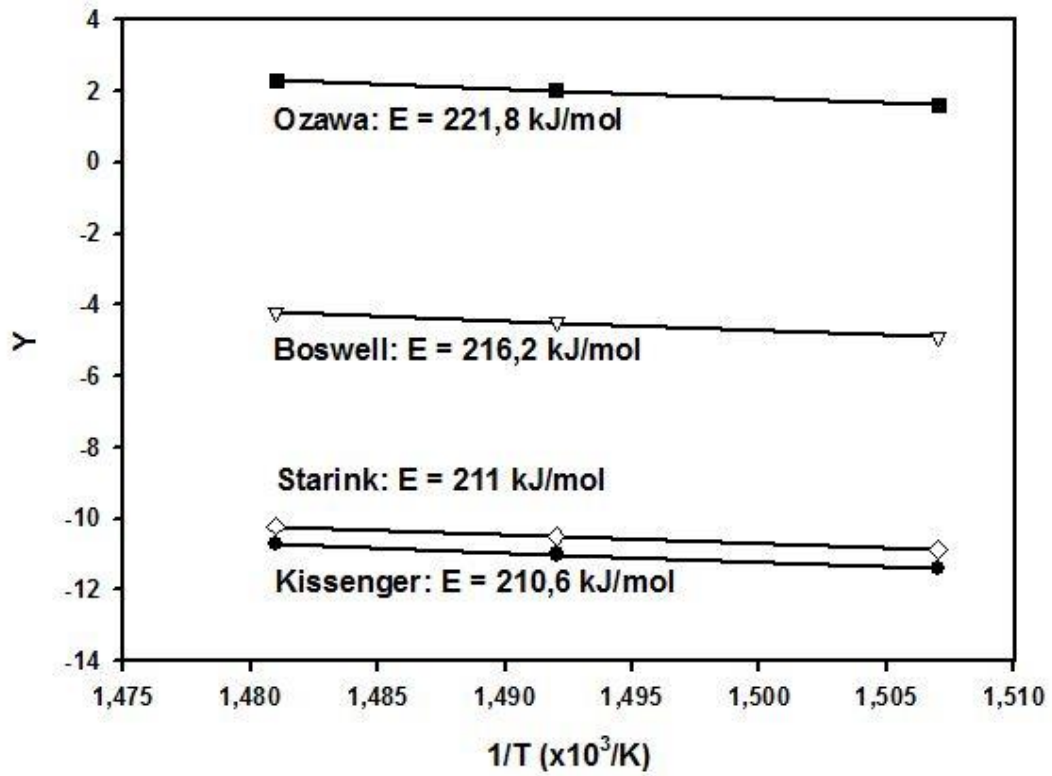
Tablo 4.1.  $\epsilon T = 1,078$  olan AA3105 sacı için kinetik veriler

$\beta$	T (K)	1/T ( $\times 10^3$ )	Kissenger	Boswell	Ozawa	Starink
			$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1,92})$
5	663,3	1,5076	-11,3850	-4,8878	1,6094	-10,8652
7,5	670,2	1,4921	-11,0002	-4,4927	2,0149	-10,4796
10	675,1	1,4813	-10,7271	-4,2123	2,3026	-10,2059

Şekil 4.7.'den görüleceği üzere yeniden kristallenme pik sıcaklıkları 5 – 7,5 ve 10°C/dak ısıtma hızları için sırasıyla 390,3°C (663,3 K), 397,2°C (670,2 K) ve 402,1°C (675,1 K) olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.8.'de  $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$  grafiği (Kissenger), Şekil 4.9.'da  $\ln(\beta/T) - 1000/T$  grafiği (Boswell), Şekil 4.10.'da  $\ln(\beta) - 1000/T$  grafiği (Ozawa) ve Şekil 4.11.'de  $\ln(\beta/T^{1,92}) - 1000/T$  grafiği (Starink) verilmiştir. Bu 4 modelin birlikte gösterimi Şekil 4.12.'de verilmiştir. Bu grafiklerin eğimleri  $-(E_a/R)$  değerine eşittir ve dört farklı modele göre bu eğimlerden yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri tespit edilebilir.

Şekil 4.8.  $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$  grafiği (Kissenger modeli)Şekil 4.9.  $\ln(\beta/T) - 1000/T$  grafiği (Boswell modeli)

Şekil 4.10.  $\ln(\beta) - 1000/T$  grafiği (Ozawa modeli)Şekil 4.11.  $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$  grafiği (Starink modeli)



Şekil 4.12. Y – 1000/T grafikleri ( Y = Kissenger için  $\ln(\beta/T^2)$ ; Boswell için  $\ln(\beta/T)$ ; Ozawa için  $\ln(\beta)$ ; Starink için  $\ln(\beta/T^{1,92})$ ).

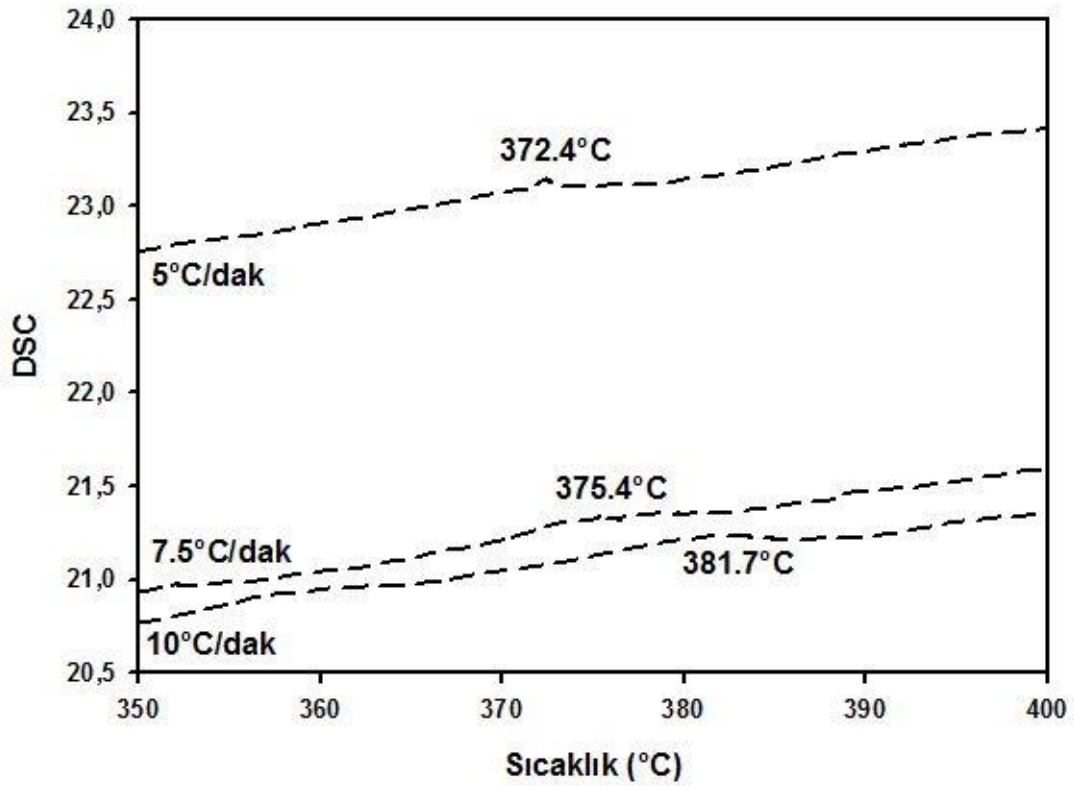
Tablo 4.2.  $\varepsilon_T = 1,078$  olan AA3105 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	210,6
Boswell	216,2
Ozawa	221,8
Starink	211

Tablo 4.2.'de verilen sonuçlara göre  $\varepsilon_T = 1,078$  olan AA3105 sacında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin Kissenger modeline göre 210,6 kJ/mol, Boswell modeline göre 216,2 kJ/mol, Ozawa modeline göre 221,8 kJ/mol ve Starink modeline göre 211 kJ/mol'dür. Bu değerler göz önüne alındığında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 210 – 222 kJ/mol aralığında olduğu ifade edilebilir.

Şekil 4.13.'de 3 mm kalınlıktan 0,56 mm kalınlığa kademeli olarak soğuk haddelenmiş AA3105 sacların 350 – 400°C sıcaklık aralığındaki DSC analizleri

verilmiştir. Tespit edilen pik sıcaklıkları ile birlikte kinetik model verileri Tablo 4.3.'de verilmiştir.

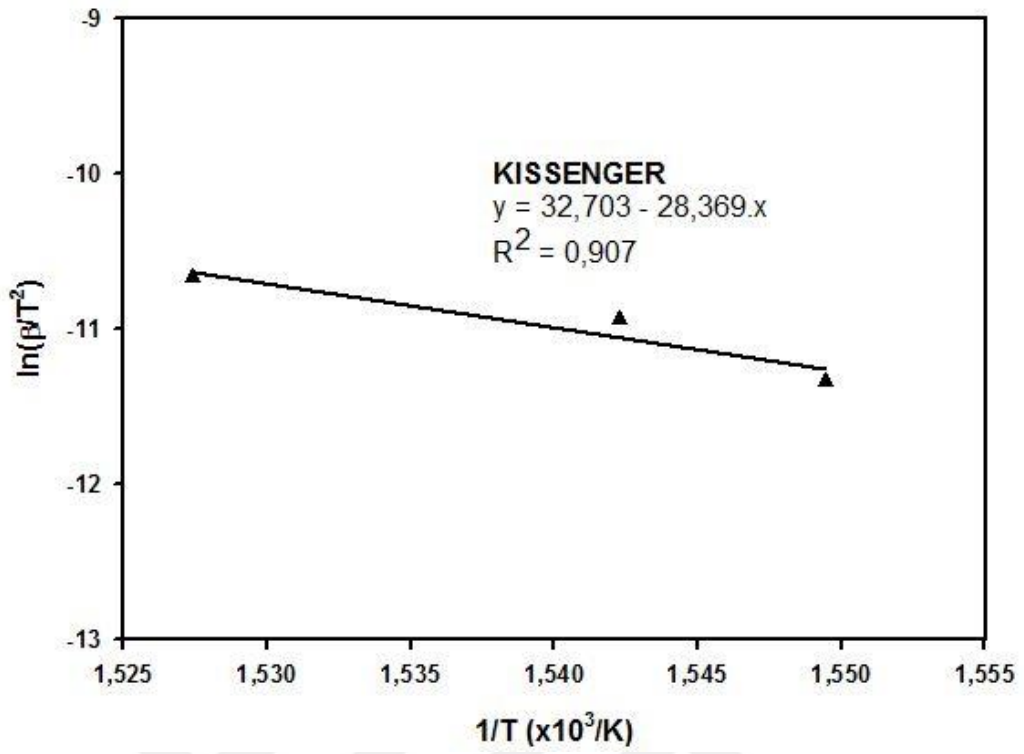


Şekil 4.13.  $\epsilon T = 1,678$  olan AA3105 sacların DSC analizi

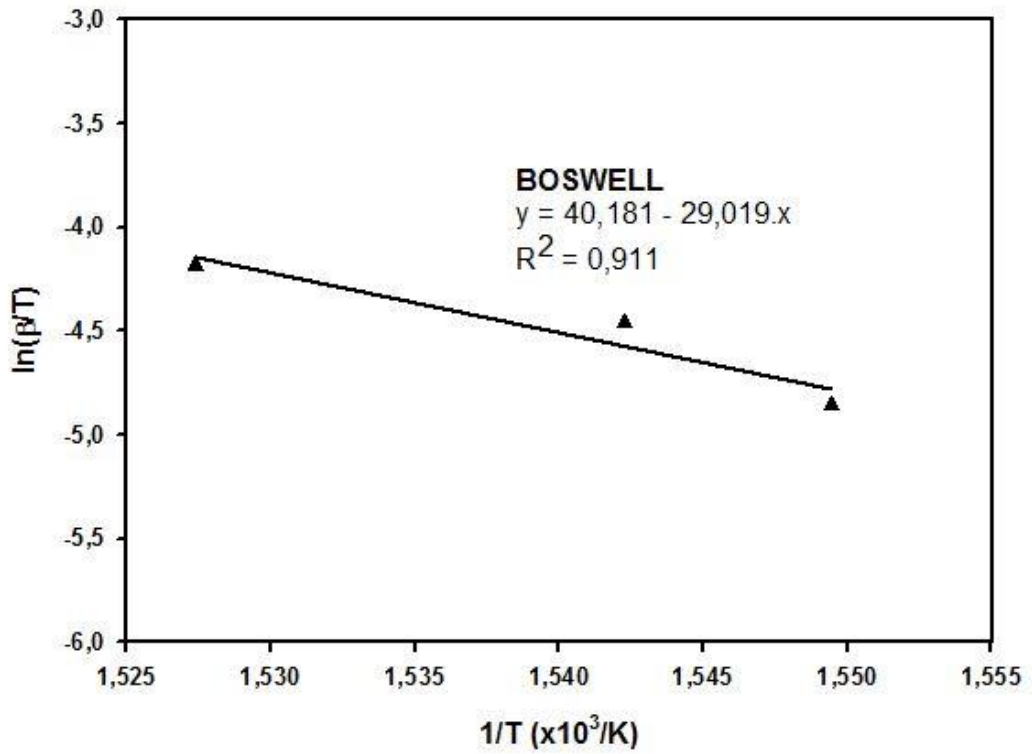
Tablo 4.3.  $\epsilon T = 1,678$  olan AA3105 sacı için kinetik veriler

$\beta$	T (K)	1/T ( $\times 10^3$ )	Kissenger	Boswell	Ozawa	Starink
			$\ln(\beta/T^2)$	$\ln(\beta/T)$	$\ln(\beta)$	$\ln(\beta/T^{1.92})$
5	645,4	1,5494	-11,3303	-4,8604	1,6094	-10,8127
7,5	648,4	1,5423	-10,9341	-4,4596	2,0149	-10,4162
10	654,7	1,5274	-10,6658	-4,1816	2,3026	-10,1470

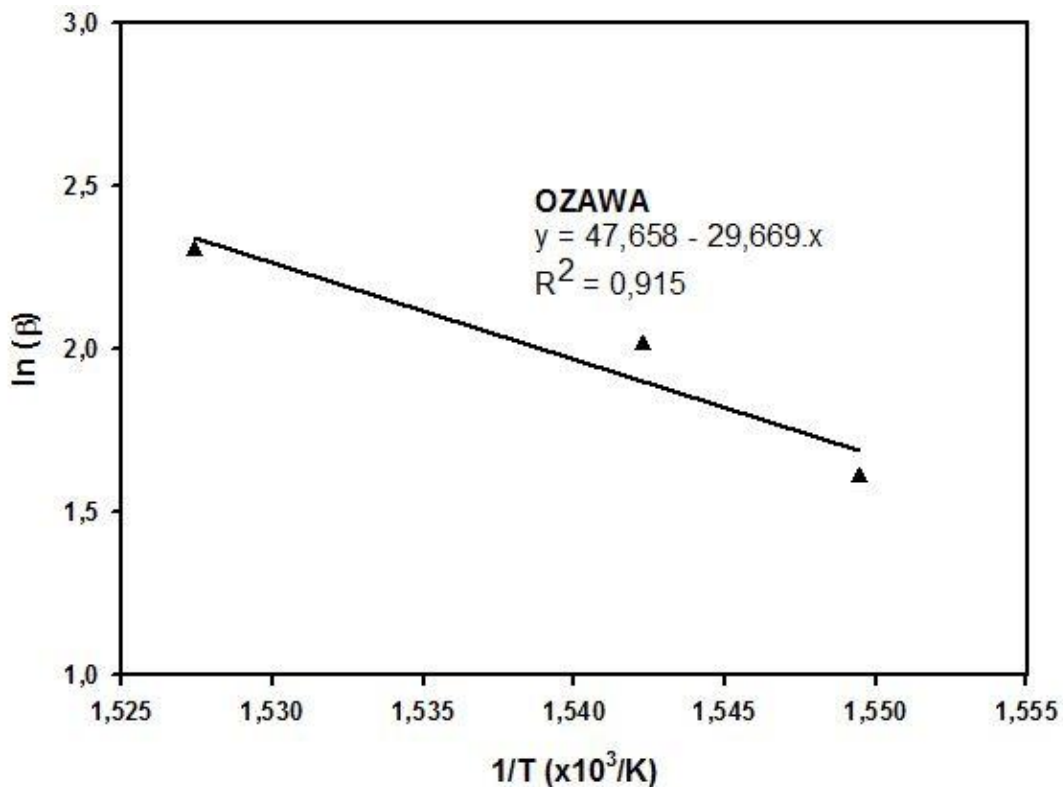
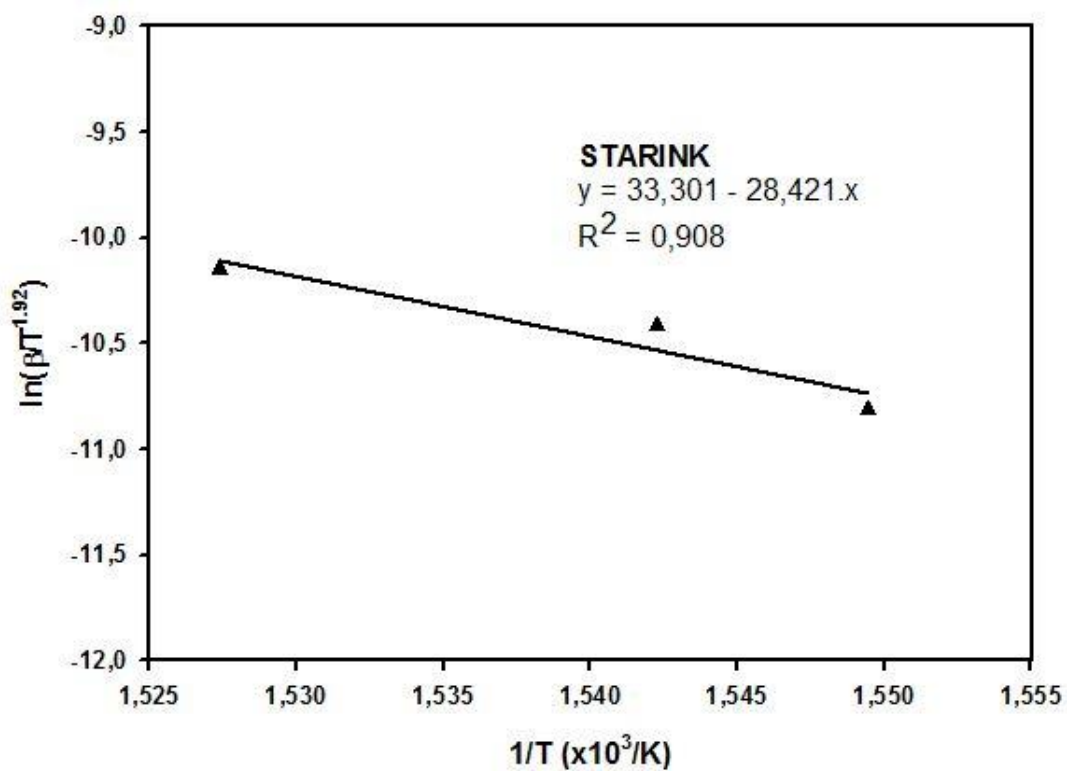
Şekil 4.13.'den görüleceği üzere yeniden kristallenme pik sıcaklıkları 5 – 7,5 ve 10°C/dak ısıtma hızları için sırasıyla 372,4°C (645,4 K), 375,4°C (648,4 K) ve 381,7°C (654,7 K) olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.14.'de  $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$  grafiği (Kissenger), Şekil 4.15.'de  $\ln(\beta/T) - 1000/T$  grafiği (Boswell), Şekil 4.16.'da  $\ln(\beta) - 1000/T$  grafiği (Ozawa) ve Şekil 4.17.'de  $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$  grafiği (Starink) verilmiştir. Bu 4 modelin birlikte gösterimi Şekil 4.18.'de verilmiştir.

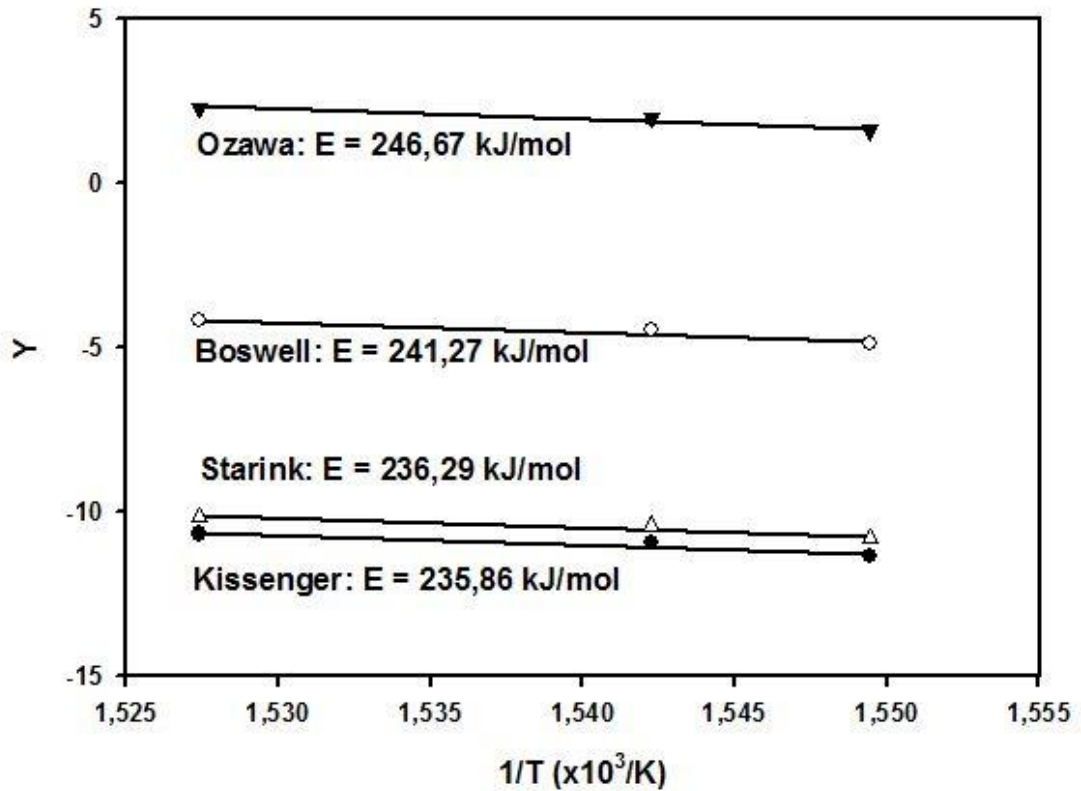


Şekil 4.14.  $\ln(\beta/T^2) - 1000/T$  grafiği (Kissenger modeli)



Şekil 4.15.  $\ln(\beta/T) - 1000/T$  grafiği (Boswell modeli)

Şekil 4.16.  $\ln(\beta) - 1000/T$  grafiği (Ozawa modeli)Şekil 4.17.  $\ln(\beta/T^{1.92}) - 1000/T$  grafiği (Starink modeli)



Şekil 4.18. Y – 1000/T grafikleri ( Y = Kissenger için  $\ln(\beta/T^2)$ ; Boswell için  $\ln(\beta/T)$ ; Ozawa için  $\ln(\beta)$ ; Starink için  $\ln(\beta/T^{1.92})$ ).

Tablo 4.4.  $\varepsilon_T = 1,678$  olan AA3105 sacı için farklı modellere göre yeniden kristallenme aktivasyon enerji değerleri

Kinetik Yöntem	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
Kissenger	235,86
Boswell	241,27
Ozawa	246,67
Starink	236,29

Tablo 4.4.'de verilen sonuçlara göre  $\varepsilon_T = 1,678$  olan AA3105 sacında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin Kissenger modeline göre 235,86 kJ/mol, Boswell modeline göre 241,27 kJ/mol, Ozawa modeline göre 246,67 kJ/mol ve Starink modeline göre 236,29 kJ/mol'dür. Bu değerler göz önüne alındığında yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 235 – 247 kJ/mol aralığında olduğu ifade edilebilir.

Alüminyum alaşımlarının yeniden kristallenme davranışının incelendiği birçok araştırmada genel olarak tekstür üzerine ve ikincil atomların etkisi yeniden

kristallenme davranışı incelenmiştir. Örnek olarak %0.05 Silis ilave edilmiş alüminyumda yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 125 – 154 kJ/mol olduğu belirtilmiştir. Buna karşılık alüminyum alaşımlarına %0.001 Fe ve %0.001 Mg ilaveleri olduğunda DSC ile yapılan kinetik analizde yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 189 -195 kJ/mol olduğu ifade edilmiştir. Soğuk haddelenmiş AA5182 alüminyum alaşımında da yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 255 – 388 kJ/mol aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalarda görülmektedir ki alüminyum alaşımlarında bulunan safsızlıkların yeniden kristallenme davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir (Liu ve ark., 2003; Zhou ve ark., 2003; Wada ve ark., 2016; Yashin ve ark., 2019).



## BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Soğuk haddelenmiş AA3105 levhaların kinetik analizinde elde edilen genel sonuçlar;

1. Kinetik analizde kullanılan levhalar %107,8 ve %167,8 soğuk haddelenmiş AA3105 alüminyum alaşımlarıdır.
2. İzotermal olmayan kinetik analiz Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) ile, numunelerin 5 – 7.5 – 10°C/dak ısıtma hızlarında elde edilen grafiklerdeki yeniden kristallenme pik sıcaklıkları ve Kissenger, Boswell, Ozawa ve Starink gibi dört analiz metodu kullanılarak yapılmıştır.
3. %107,8 soğuk deforme olmuş AA3105 alüminyum alaşımında yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri Kissenger metoduna göre 210,6 kJ/mol, Boswell metoduna göre 216,2 kJ/mol, Ozawa metoduna göre 221,8 kJ/mol ve Starink metoduna göre 211 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu deformasyon miktarındaki alaşım için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 210 – 222 kJ/mol aralığında olduğu tespit edilmiştir.
4. %167,8 soğuk deforme olmuş AA3105 alüminyum alaşımında yeniden kristallenme aktivasyon enerjileri Kissenger metoduna göre 235,86 kJ/mol, Boswell metoduna göre 241,27 kJ/mol, Ozawa metoduna göre 246,67 kJ/mol ve Starink metoduna göre 236,29 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu deformasyon miktarındaki alaşım için yeniden kristallenme aktivasyon enerjisinin 235 – 247 kJ/mol aralığında olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Ak, Ö. 2012. AA206 alüminyum döküm alaşımında empürite demirin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Ataşen, U. 2015. Soğuk haddelenmiş 3003, 3105, 3005 alüminyum alaşımlarında alaşım elementi olarak magnezyumun etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Aydın, H., Cengiz, M. N., Gören, R. 2019. İkiz merdane yöntemi ile üretilen 1050 ve 3105 alüminyum levhalarının karakterizasyonu. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 252-259.
- Baykal, H. 1999. Alüminyum alaşımlarının soğuk haddelenmesinde yük hesabı metodlarının karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Bhaduri, A. 2018. Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science, 413-719.
- Danchenko, V. N., 2007. Metal Forming. Dnepropetrovsk NMetAu, 5-177.
- Doğan, E. 2006. 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Eroğlu, G., Şahiner, M. 2018. Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum. Fizibilite Etütleri Başkanlığı, 1-15.
- Eşit, F. 2006. Soğuk ve sıcak haddelenmiş alüminyum 6016 alaşımlarının kaynak davranışları ve kalıntı gerilme analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Güner, A. T. 1999. Yarı-katı halde şekilde verilmiş alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine su verme sıcaklığının etkisi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Humphreys, J., Rohrer, G. S., Rollett, A. 2017. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. Third Edition, Elsevier Ltd., 1-411.
- Karcı, F. 2008. Soğuk deformasyon ve kaynak ısı girdisinin AISI 304 paslanmaz çelik direnç kaynak kalitesine etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- Mukhopadhyay, P. 2019. Alloy designation processing and use of AA6XXX series aluminium alloys. *ISRN Metallurgy*, 1-15.
- Okumuş, E. 2003. Sürekli levha döküm tekniğiyle üretilmiş 1XXX-3XXX ve 5XXX alaşımlı levhaların mikro yapı karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Sheasby, P. G., Pinner, R. 2001. İçinde: Introduction: Aluminium Its Properties Alloys and Finishes., The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys 6th Edition. ASTM International, 1-10.
- Stona, S., Pfeifer, T., Rozanski, M. 2014. Modern Technologies of welding aluminium and its alloys. *Welding International*, 28(2), 91-99.
- Uyar, Ç. 2003. Effect of cold drawing ratio and composition on recrystallization behaviours of steels. Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Metallurgy and Materials Engineering, M. Sc. Thesis.
- Yıldırım, S. 2001. Saf bakırın yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışı: Dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik tane büyümesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz, F., Şen, U. 1996. Alaşımların Yapı ve Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, 31-74.
- Boswell, P. G. 1980. On the calculation of activation energies using a modified Kissenger method. *Journal of Thermal Analysis*, 18(2), 353-358.
- Kissenger, H. E. 1957. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702-1706.
- Ozawa, T. 1992. Estimation of activation energy by isoconversion methods. *Thermochimica Acta*, 203, 159-165.
- Starink, M. 2004. Analysis of aluminium based alloys by calorimetry: quantitative analysis of reactions and reaction kinetics. *International Materials Reviews*, 49 (3-4), 191-226.
- Wada, K., Takeshima, K., Uesugi, T., Takigawa Y., Higashi, K. 2006. Effects of solute Fe, Zn and Mg on recrystallization in aluminum. *Materials Transactions*, 57(3), 329-334.
- Liu, W. C. Zhai, T., Man, C. S., Morris, J. G. 2003. Quantification of recrystallization texture evolution in cold rolled AA 5182 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 49, 539-545.
- Zhou, F., Liao, X. Z., Zhu, Y. T., Dallek, S., Lavernia, E. J. 2003. Microstructural evolution during recovery and recrystallization of a nanocrystalline Al-Mg alloy prepared by cryogenic ball milling. *Acta Materialia*, 51, 2777-2791.
- Yashin, V., Aryshenskii, E., Hirsch, J., Konovalov, S., Latushkin, I. 2019. Study of recrystallization kinetics in AA5182 aluminium alloy after deformation of the as-cast structure. *Materials Research Express*, 6(6), 066552.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ion GRECU

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2019
Lise	Mehmet Akif Ersoy Lisesi	2015

### YABANCI DİL

İngilizce , Türkçe, Romence (Anadil)

### ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Ion GRECU, Kenan YILDIZ, Soğuk haddelenmiş AA3105 sacın termal analizle yeniden kristallenme kinetiği, Karadeniz Zirvesi, 6. Uluslararası Uygulamalı Bilimleri Kongresi, 5-6 Haziran 2021, Sinop.