

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOLYO HADDELEME PROSES PARAMETRELERİNİN
8XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
DERİN ÇEKMEYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat AKCAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOLYO HADDELEME PROSES PARAMETRELERİNİN
8XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
DERİN ÇEKMEYE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serhat AKCAN
(506151423)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sebahattin GÜR MEN

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506151423 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Serhat AKCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FOLYO HADDELEME PROSES PARAMETRELERİNİN 8XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA DERİN ÇEKMEYE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Adı Sebahattin GÜR MEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Muhammet Kürşat KAZMANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan ORHAN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 13 Haziran 2019



ÖNSÖZ

Tüm eğitim hayatım boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olup beni cesaretlendiren aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu tezi etrafımdaki birçok kişinin desteği ile yazdım; ancak burada sadece bazılarından özel olarak bahsetmek mümkün olacak. İlk olarak eğitim hayatım boyunca bana yol gösteren, her zaman yanımda olan, mesleki gelişimime katkıda bulunan tez danışman hocam Prof. Dr. Sebahattin GÜRMENT'e en içten duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Üç yıldır bünyesinde çalıştığım ve her zaman desteğini hissettiğim Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. ailesine teşekkür ederim. Çalışmalarında bana yol göstererek her zaman destek veren ve her zaman fikirleriyle önümü açan Metalurji ve Malzeme Mühendisi Dr. Onur MEYDANOĞLU'na; tez çalışmalarım sırasında bana her zaman destek olan Metalurji ve Malzeme Mühendisi Ece ARICI ve Mert GÜLVER'e ve tüm çalışmalarım boyunca her zaman beni motive eden Metalurji ve Malzeme Mühendisi Ali İlker SELVİBOY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca yardımını esirgemeyen ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli arkadaşım Zehra İrem TÜRKES'e sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Serhat AKCAN
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TEORİK İNCELEME	7
2.1 Alüminyum Hakkında Genel Bilgi.....	7
2.1.1 Yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikler	10
2.1.2 Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikler.....	11
2.2 Birincil Alüminyum Üretimi ve Alüminyum Alaşımları	12
2.2.1 Bayer prosesi.....	12
2.2.2 Hall-Heroult prosesi	16
2.2.3 Alüminyum alaşımları	18
2.2.3.1 Mekanik işlem alaşımları	19
2.2.3.2 Döküm alaşımları	22
2.3 İkiz Merdane Döküm Yöntemi	24
2.3.1 Genel bilgi.....	25
2.3.2 Mikroyapı ve katılaşma	26
2.4 Soğuk haddeleme	27
2.4.1 Genel bilgi.....	27
2.4.2 Mikroyapı.....	29
2.5 Derin Çekme	31
2.5.1 Genel Bilgi	31
2.5.2 Proses Parametreleri	32
2.5.2.1 Baskı plakası.....	32
2.5.2.2 Sürtünme	33
2.5.2.3 Malzeme şekli.....	33
2.5.2.4 Şekillendirme limiti	33
2.5.3 Temel Hatalar	34
2.5.3.1 Kırışma.....	34
2.5.3.2 Kulaklanma	35
2.5.3.3 Portakal kabuğu	35
2.5.3.4 Çatlamlar	35
2.6 Yüzey Pürüzlülük Parametreleri	36
2.6.1 Yüksekliklerin aritmetik ortalaması (R_a)	36
2.6.2 Ortalama karekökü pürüzlülüğü (R_q)	36

2.6.3 Maksimum profil yüksekliği (R_p)	37
2.6.4 Vadilerin maksimum derinlikleri (R_v).....	37
2.6.5 Profil yüksekliklerin ortalaması (R_{pm})	37
2.6.6 Ortalama profil derinlikleri (R_{vm})	37
2.6.7 Profil maksimum yüksekliği (R_t).....	38
2.7 8XXX Serisi	38
3. KONUYA İLİŞKİN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	39
4. DENEYSEL TASARIM VE ÇALIŞMALAR.....	43
4.1 Kullanılan Malzeme ve Teçhizat	43
4.2 Deneylerin Yapılışı ve Süreç Tasarımı	46
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	51
5.1 Yüzey Pürüzlülük Sonuçları.....	51
5.2 Erichsen Test Sonuçları.....	52
5.3 Çekme Testi Sonuçları	53
5.4 Mikroyapı Analiz Sonuçları	54
6. GENEL SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

TRC	: İkiz merdane döküm
MPa	: Megapaskal
mm	: milimetre
LDR	: Derin çekme sınırı
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
GPa	: Gıgapaskal
µm	: Mikrometre
kN	: Kilo Newton

SEMBOLLER

Ra, Rq, Rv : Pürüzlülük parametreleri

FCC : Yüzey merkezli kübik

DLC : Elmas benzeri karbon

HF : Hidroflorik asit





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Türkiye boksit rezervleri	2
Çizelge 1.2 : Dünya birincil alüminyum üretim miktarları.....	4
Çizelge 2.1 : Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları.....	26
Çizelge 4.1 : İkiz merdane döküm yöntemi ile dökülen 8156 alaşımlarının prosesler sonrası mekanik özellikleri	45
Çizelge 4.2 : İkiz merdane döküm yöntemi ile dökülen 8156 alaşımlarının prosesler sonrası mekanik özellikleri – 2	45
Çizelge 4.3 : Başlangıç malzemelerinin yüzey pürüzlülük sonuçları.	49
Çizelge 4.4 : Başlangıç malzemesi çekme testi sonuçları.	49
Çizelge 5.1 : Folyo haddeleme sırasında kullanılan iş merdane R_a değerleri.	51
Çizelge 5.2 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları.	52
Çizelge 5.3 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeleme işlemi sonrası Erichsen Test sonuçları.	53
Çizelge 5.4 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeleme işlemi sonrası çekme testi sonuçları.	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılımı.....	2
Şekil 1.2 : 8XXX Alüminyum serisinden elde edilen ürünler	5
Şekil 2.1 : Birincil ve ikinci alüminyum üretimi döngüsü.....	8
Şekil 2.2 : Alüminyumdan üretilen çeşitli ürünler	10
Şekil 2.3 : 7020 alaşımı mekanik karakteristikleri	11
Şekil 2.4 : (a) Farklı alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti karşılaştırılmaları (b) Farklı alüminyum alaşımlarının akma mukavemeti karşılaştırılmaları (c) Farklı alüminyum alaşımlarının kopma uzaması karşılaştırılmaları ...	12
Şekil 2.5 : Bayer prosesi akış şeması.....	13
Şekil 2.6 : Alümina üretiminde kullanılan döner fırın.....	15
Şekil 2.7 : Alümina üretiminde kullanılan kalsinatör akım şeması	16
Şekil 2.8 : (a) Prebaked hücre yapısı (b) Soderberg hücre yapısı	17
Şekil 2.9 : 1XXX serisi farklı kullanım alanları.....	20
Şekil 2.10 : İkiz merdane döküm tekniği genel görünüm.....	26
Şekil 2.11: İkiz merdane döküm yöntemi merdane malzeme temas noktası.....	27
Şekil 2.12 : Soğuk haddeleme işlemi.....	28
Şekil 2.13 : 4'lü grup soğuk haddeleme makinesi şeması.....	29
Şekil 2.14 : Element alaşımlarının ve sıcaklığın dayanıma etkisi	30
Şekil 2.15 : Derin çekme proses adımları	32
Şekil 2.16 : Metal ve kalıp boşluğu arasındaki ilişki	32
Şekil 2.17 : Derin çekme sonucu oluşan kırışma	34
Şekil 2.18 : Derin çekme sonucu oluşan kulaklanma	35
Şekil 2.19 : Yüksekliklerin aritmetik ortalaması (Ra)	36
Şekil 2.20 : R_p , R_v , R_{pm} , R_{vm} , R_t parametrelerinin tanımı	38
Şekil 4.1 : Ürün akış şeması.....	43
Şekil 4.2 : 2,192 mm kalınlığındaki 8156 alüminyum levha çekme testi görüntüsü..	44
Şekil 4.3 : Achenbach Four-High-Mill folyo hadde makinası	47
Şekil 4.4 : Proses tasarımı	48
Şekil 4.5 : (a) Proses 1 başlangıç malzemesi mikroyapısı (b) proses 2 başlangıç malzemesi mikroyapısı (c) Proses 3 başlangıç malzemesi mikroyapısı	50
Şekil 5.1 : 210 μ m 8156 alaşımlı folyo numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapısı (a) Proses 1'e ait mikroyapı görüntüsü (b) Proses 2'ye ait mikroyapı görüntüsü (c) Proses 3'e ait mikroyapı görüntüsü	55
Şekil 5.2 : 105 μ m 8156 alaşımlı folyo numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapısı (a) Proses 1'e ait mikroyapı görüntüsü (b) Proses 2'ye ait mikroyapı görüntüsü (c) Proses 3'e ait mikroyapı görüntüsü	55
Şekil 5.3 : Proseslerin genel görünümü ve özellikleri	56



FOLYO HADDELEME PROSES PARAMETRELERİNİN 8XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA DERİN ÇEKMEYE ETKİSİ

ÖZET

Alüminyum (Al) 8XXX serisi mekanik işlem alaşımları, sahip oldukları korozyon direnci, elektrik iletkenliği ve mekanik özellikleri gibi nedenlerle birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum 8XXX alaşımları folyo olarak özellikle esnek ambalaj endüstrisinde en çok tercih edilen malzeme grubudur.

Folyo haddeleme işlemi sırasında birçok proses parametresi 8XXX alaşım serisinin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Haddeleme sırasında kullanılan iş merdaneleri de alüminyum folyonun özelliklerini değiştirebilmektedir.

Bu çalışmada 8XXX alüminyum folyo malzemelerinin folyo haddelemesi sırasında farklı pürüzlülükte iş merdaneleri kullanılarak, iş merdanesinin alüminyum folyo üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalarda 330 µm kalınlığında olan alüminyum folyolar 2 kere soğuk haddelenerek 105 µm kalınlığa indirilmiştir. Farklı pürüzlülükte (0,14 – 0,16 R_a, 0,20 – 0,25 R_a, 0,30 – 0,35 R_a ve 0,55 – 0,60 R_a) iş merdaneleri kullanılarak folyoların derin çekme kabiliyetinin artırılması hedeflenmiştir.

Deneysel çalışmalar Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketinde TRC döküm tekniği ile üretilen ve soğuk haddeleme işlemi görerek 330 µm kalınlığa indirilen 8XXX alüminyum malzemeler ile gerçekleştirilmiştir.

Numuneler Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketinde Achenbach markalı intermediate-foil mill tezgahlarında 2 kere üst üste soğuk haddelenmiştir. Nihai kalınlık olarak 105 µm sahip numunelerde optik mikroskop ile tane yapısı incelenmiş, numune ve iş merdaneleri arasındaki pürüzlülük bağlantıları araştırılmıştır. Malzemenin derin çekme kabiliyetlerindeki değişimi görebilmek için numunelere Erichsen testi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda her iki soğuk haddeleme işleminde de kullanılacak olan parlak merdaneler ile daha iyi derin çekilebilir malzemeler üretildiği gözlenmiştir. Derin çekme üzerinde oluşan durum malzemelere yapılan çekme deneyleri sonucuna yansımamıştır. Deneysel çalışmalarda, iş merdanelerinin pürüzlülüğünün mikro yapıda herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Ancak, malzeme yüzeyi ile iş merdanesi yüzeyi arasında bir bağlantı olduğu; iş merdane R_a değerleri düştükçe bu benzerliğin daha da yakın olduğu tespit edilmiştir.



THE EFFECTS OF FOIL ROLLING PARAMETERS ON DEEP DRAWING BEHAVIOUR OF 8XXX ALUMINUM ALLOYS

SUMMARY

Aluminum is preferred in different areas due to its special properties. One of the most significant properties of aluminum is its light. This property provides energy conservation, which also decreases environmental pollution. Aluminum can be used as alloy by adding different metals. Aluminum can have more strengths thanks to other alloy metals. In addition, the property of ductility provides design flexibility in many areas such as construction and transportation. Furthermore, due to having natural oxide film layer, aluminum has perfect corrosion resistance. Thus, the life cycle of aluminum is much more with respect to other many materials. Moreover, aluminum is used in the applications of electric dispersion and heat transfer because of its electrical and heat conductivity. In addition to all these, aluminum is perfect impermeable material. Even in its thinnest form, 6,35 micrometers, this property still exist. All properties aluminum has can develop by means of other metals. Developing and adaptation of aluminum alloys according to area it is used still continue.

Aluminum 8XXX alloy serie is used in lots of areas by means of their special properties like corrosion resistance, electrical conductivity, mechanical properties etc. This serie is mainly favored in flexible packaging area as foil.

There are lots of areas where aluminum foil is used like automotive, finstock, household foils, smooth-wall and flexible packaging. Nowadays, aluminum sheets are generally produced through twin-roll casting methods. Aluminum sheets produced by twin roll casting are cold rolled in order to obtain thin materials like aluiminum foil.

Process parameters of cold rolling of 8XXX aluminum series specify mechanical properties of these materials. The work rolls used during rolling operation also have effects on properties of materials. The diameter of work rolls, the roughness of work rolls can affect properties of cold-rolled materials. For this reason, selection of work rolls is essential.

In this study, the work rolls having different roughness properties (0,14 – 0,16 R_a , 0,20 – 0,25 R_a , 0,30 – 0,35 R_a ve 0,55 – 0,60 R_a) were used in order to observe the effect of work rolls on the properties of aluminum foil. Firstly, the relation between surface of work rolls and cold-rolled aluminum foils were examined. According to this relation, other mechanical properties were investigated. In comparison with surface relation and difference of mechanical properties, these results were compared.

In these experimental studies, the materials having thickness of 0.3 mm were cold rolled twice in order to make the materials thickness as 105 microns. Improving the deep drawing capability of aluminum foils is aimed through using of the work rolls having varied surface roughness properties.

Experimental studies were done with the materials which have been obtained from Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. factory. These 8XXX aluminum sheets were

firstly produced via twin roll casting method; then they were cold rolled and have several annealing processes in order to get 0.33 mm aluminum sheets.

In order to observe the effect of surface roughness of work rolls on the deep drawability of aluminum foils, three different process were designated. Aluminum sheets having 0.33 mm thickness were cold rolled two times. Firstly, three different 0.21 mm aluminum sheets were obtained. In order to get these sheets two different work rolls were used. Two of them were rolled with work rolls having surface roughness of 0,30-0,35 R_a ; the other one was rolled with work rolls having surface roughness of 0,55-0,60 R_a . Secondly, three different 105 μm aluminum foils were obtained. In order to get these aluminum foils two different work rolls were used. The aluminum sheet which was rolled with work rolls having surface roughness of 0,55-0,60 R_a was rolled again with work rolls having surface roughness of 0.20-0,25 R_a . Other aluminum sheets were cold rolled with work rolls having surface roughness of 0.20-0,25 R_a and 0.14-0,16 R_a . As a result, in order to observe differences of both cold rolling passes; for first passes two similar one different work rolls were used; for second passes two similar one different work rolls were used.

Firstly, the properties of aluminum sheets having thickness of 330 μm were investigated. According to surface roughness measurements, results of Erichsen tests, tensile tests and images of microstructure there were no difference between starting materials.

During both cold rolling passes, the similar rolling force were applied to materials. The rolling speed were differentiated according to work rolls. Cold rolling with work rolls having high surfaces has much more speed with respect to other ones.

When surface roughness tests were analyzed, it was determined that there was relation between surface roughness of work rolls and aluminum sheets and foils which had been cold rolled. However, the similarity of first passes were less than second passes. It was observed that the aluminum sheets cold rolled by work rolls having high surface roughness had similar surface roughness with work rolls; but these sheets also gave more reaction against work rolls with respect to aluminum foils which gave less reaction against work rolls. Shortly, surface roughness of aluminum sheets have less similarity with work rolls with respect to aluminum foils.

When Erichsen tests were analyzed, work rolls having high surface roughness affected unfavorably. At the end of the first passes, aluminum sheets having thickness of 210 μm had been cold rolled with two different work rolls. Aluminum sheets cold rolled by 0,30-0,35 R_a has better elongation with respect to other aluminum sheet which was cold rolled with work rolls having surface roughness of 0,50-0,55 R_a . At the end of the second passes, aluminum foils having thickness of 105 μm had been cold rolled with two different work rolls. Two of them were cold rolled with work rolls having surface roughness 0,20-0,25 R_a and also these sheets had been cold rolled at the first passes with different work rolls. Thus, the effect of first passes on the behavior of deep drawability of aluminum foils could be analyzed. It was seen that although surface roughness of work rolls that had been used at second passes were similar, the Erichsen test results were different. The effect of first pass was still exist. Aluminum foil which were cold rolled at first step with work rolls having higher surface roughness had less elongation around 15%. Other aluminum foils which were cold rolled with work rolls having low surface roughness both passes gave better elongation. When it was compared with 105 μm aluminum foils cold rolled by work rolls having higher

surface roughness at both passes, there was certain difference on elongation which was about 35%.

According to tensile test results, there were no significant difference between aluminum foils and sheets. As mentioned before, firstly starting materials were investigated. The results of tensile tests of aluminum sheets having 330 μm were similar. After first passes, the similarity was still observed; however, work hardening of cold rolling was seen clearly. Then by, aluminum foils having thickness of 105 μm were examined and the results were similar with previous aluminum sheets.

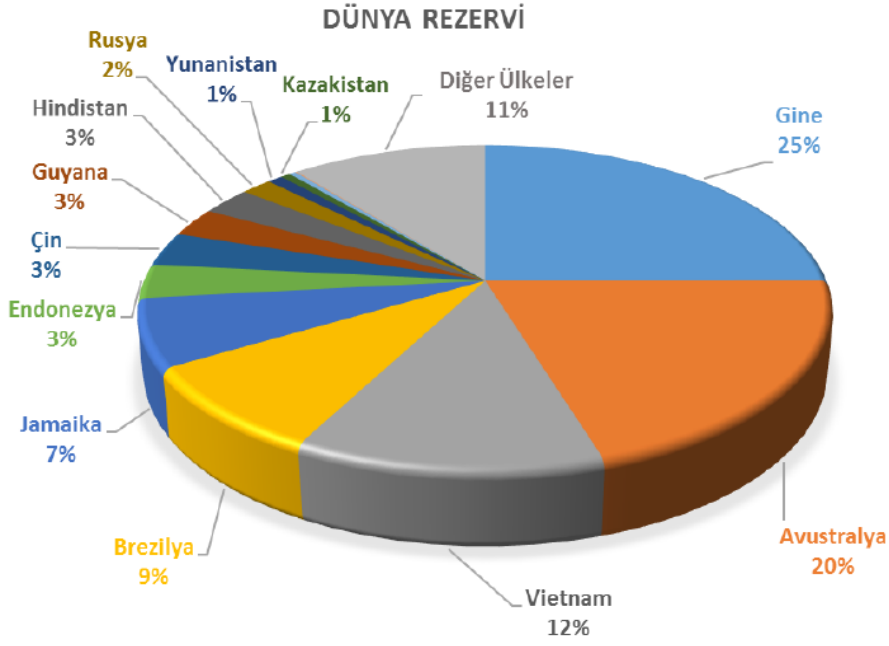
When microstructures of all materials were analyzed, inequality of grain orientation were gained. Even though grain orientation of starting materials were similar, after cold rolling processes, materials having same thickness had different grain orientation. Frequency of grain orientation of aluminum materials cold rolled with work rolls having high surface roughness were much more. Aluminum foils having more grain orientation gave less elongation at the end of the Erichsen tests.

As a result of experimental studies, aluminum foils that have better deep drawing capability were gathered associated with work rolls having low surface roughness. The same effect which has seen on the deep drawing properties have not observed on the results of tensile tests. In addition, it was observed that there is no influence of work rolls properties on the microstructure of foils. However, it is obvious that roughness of foils and roughness of work rolls were directly related to each other. When the roughness of work rolls is lower, the similarity between foils and work rolls becomes more significant.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Alüminyum (Al) yer kabuğunda %8 oranında bulunmaktadır ve doğada en çok bulunan üçüncü elementtir. Günümüzde alüminyum üretim miktarı diğer tüm demir dışı metallerin toplam üretiminden daha fazladır. Alüminyum hafif, dayanıklı, sert, iletken, sağlam ve geri dönüşümü kolay bir metaldir. Sanattan yüksek teknolojlili uçaklara kadar çok geniş bir alanda kullanılan alüminyum en fazla ulaşım, paketleme, inşaat ve elektronik alanında tercih edilmektedir [1].

Alüminyum, doğada çok yaygın bulunmasına rağmen, metal alüminyum boksit cevherinden elde edilmektedir. Dünya boksit rezervi toplamı 75 milyar ton olup, bunun yaklaşık 30 milyar tonu işletilebilir rezerv durumundadır. Dünyanın en zengin boksit rezervine sahip ülkesi olan Gine'de 7,4 milyar ton rezerv bulunmaktadır. Gine'nin ardından sırasıyla Avustralya (6 milyar ton), Vietnam (3,7 milyar ton), Brezilya (2,6 milyar ton) ve Jamaika (2 milyar ton) gelmektedir. Bu beş ülke toplamda dünya boksit rezervinin %73'üne (22 milyar ton) sahiptir. Yüksek miktarda rezerve sahip diğer ülkeler sıralamasında Endonezya (1 milyar ton), Çin (1 milyar ton), Guyana (850 milyon ton), Hindistan (830 milyon ton) ve Rusya (500 milyon ton) yer almaktadır. Şekil 1.1'de Dünya işletilebilir boksit rezervinin ülkeler bazında yüzdesel olarak dağılımı verilmektedir. MTA tarafından 1940'lı yıllarda başlayan boksit arama çalışmaları sonucunda, ülkemiz görünür ve mümkün rezerv toplamı 422 milyon ton, işletilebilir rezervin ise 63 milyon ton olduğu tespit edilmiştir. En büyük boksit rezervi Konya Seydişehir ve Antalya Akseki yöresinde bulunmaktadır. Bu sahalarda toplam (görünür+muhtemel+mümkün) rezerv 36,5 milyon ton, işletilebilir rezerv 31 milyon ton'dur. Ayrıca, Muğla-Milas, Tufanbeyli-Saimbeyli, Zonguldak-Kokaksu, Isparta-Yalvaç, İslahiye-Payas, Bolkardağı ve Alanya bölgelerinde boksit yatakları mevcuttur. Çizelge 1.1'de Türkiye boksit rezerv miktarları ve bulunan cevher türleri gösterilmektedir [2].



Şekil 1.1 : Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılımı [2].

Çizelge 1.1 : Türkiye boksit rezervleri [2].

Bölge	Boksit Rezervi (bin ton)				Cevher Tipi
	Görünür	Muhtemel + Mümkün	Toplam	İşletilebilir	
Seydişehir-Akseki	35.251	1.253	36.504	36.504	Böhmitik
Muğla-Milas-Yatağan	9.400	11.200	20.600	17.500	Diasporitik
Tufanbeyli-Saimbeyli	5.500	6.000	11.500	9.800	Diasporitik
Zonguldak-Kokaksu	5.900	3.400	9.300	5.000	Böhmitik
Yalvaç-Şarkikaraağaç	0	115.600	115.600	0	Demirli-Diasporitik
İslahiye-Payas	0	215.500	215.500	0	Demirli-Diasporitik
Bolkardağı-Mersin	0	3.900	3.900	0	Diasporitik
Alanya	1.300	7.700	9.000	0	Diasporitik
Toplam	57.351	364.553	421.904	63.300	

Alüminyum üretimi birincil ve ikincil üretim olarak ikiye ayrılmaktadır. Birincil alüminyum cevherden, ikincil alüminyum hurdadan elde edilmektedir. Son yıllarda birincil alüminyum üretiminde lider olan Çin, 2000 yılından itibaren artan iç talebini karşılayabilmek için üretimini hızla artırarak, 2017 yılında 32 milyon ton üretim yapmıştır; 59 milyon ton olan dünya toplam üretiminin %54 ünü gerçekleştirmiştir. Üretimde 2017 dünya sıralamasında Çin'in ardından, 3,6 milyon ton ile Rusya ve 3,2 milyon ton ile Kanada ve Hindistan gelmektedir. Avrupa ülkelerinde ise gittikçe artan çevre sorunları nedeniyle birincil Al üretimi son yıllarda giderek azalmaktadır. Buna karşılık, yarı ürün işleme sanayinde yatırımlar yapılmaktadır. Genel olarak, yarı ürün ihracatçısı olan AB ülkeleri, ihtiyaçları olan birincil alüminyumunu daha çok Norveç ve Brezilya'dan temin etmektedir. Çizelge 1.2'de 2012 – 2017 yılları arasında Dünya'da gerçekleştirilen birincil alüminyum üretim miktarları gösterilmektedir [2].

Alüminyum kullanım alanları incelendiğinde en büyük pay %25 ile inşaat sektörüne ait olurken, bu sektörü %24 ile ulaşım sektörü takip etmektedir. Ambalaj sektöründe %15 ve elektrik-elektronik alanında %10'luk pay varken; mobilya, büro malzemeleri, demir-çelik sektörü ve kimya alanında da küçük oranlarda Al kullanılmaktadır [3].

8XXX alüminyum alaşım serisi diğer alüminyum alaşımları gibi birçok farklı sektörde tercih edilmektedir. Bu seriye ait 8006, 8011 ve 8079 alaşımları en çok tercih edilen alaşımlardır. Özellikle esnek ambalaj ürünü olarak tercih edilen bu alaşımlar, mutfak folyosu, düz kenarlı kap, esnek boru, fin malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Şekil 1.2'de 8XXX serisinin kullanıldığı bazı ürün grupları gösterilmektedir. 8XXX serisinin öne çıkan özellikleri; ısıl işlem uygulanabilmesi, şekillendirilebilme kabiliyetinin yüksek olması ve farklı alaşım elementlerinin eklenmesiyle yüksek mukavemet elde edilmesidir.

Bu çalışmada, 8XXX alüminyum alaşım folyo malzemelerinin folyo haddemesi sırasında farklı pürüzlülükte iş merdaneleri kullanılarak, iş merdanesinin alüminyum folyo üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda 330 µm kalınlığında olan Al folyolar 2 kere soğuk haddelenerek 105 µm kalınlığa indirilmiştir. Farklı pürüzlülükte (0,14 – 0,16 R_a, 0,20 – 0,25 R_a, 0,30 – 0,35 R_a ve 0,55 – 0,60 R_a) iş merdaneleri kullanılarak folyoların derin çekme kabiliyetinin artırılması araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketinde TRC döküm tekniği ile üretilen ve soğuk haddeme işlemi görerek 330 µm kalınlığa indirilen 8XXX Al malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler şirketinde

TRC döküm tekniği ile üretilen ve soğuk haddeleme işlemi görerek 330 µm kalınlığa indirilen 8XXX Al malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. şirketinde Achenbah markalı intermediate-foil mill tezgahlarında 2 kere üst üste soğuk haddelenmiştir. Nihai kalınlık olarak 105 µm'a sahip numunelerde optik mikroskop ile tane yapısı incelenmiş, numune ve iş merdaneleri arasındaki pürüzlülük bağlantıları araştırılmıştır. Malzemenin derin çekme kabiliyetlerindeki değişimi görebilmek için numunelere Erichsen testi yapılmıştır.

Çizelge 1.2 : Dünya birincil alüminyum üretim miktarları (ton) [2].

Ülke	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Çin	23.500.000	26.500.000	28.300.000	31.400.000	31.900.000	32.600.000
Rusya	4.024.000	3.600.000	3.300.000	3.530.000	3.560.000	3.600.000
Kanada	2.780.000	2.967.000	2.858.000	2.880.000	3.209.000	3.209.000
Hindistan	1.704.000	1.703.000	1.939.000	2.355.000	2.723.000	3.200.000
B. Arap Emirlikleri	1.820.000	1.864.000	2.341.000	2.341.000	2.500.000	2.600.000
Avustralya	1.860.000	1.777.000	1.703.000	1.646.000	1.646.000	1.646.000
Norveç	1.646.000	1.155.000	1.250.000	1.225.000	1.220.000	1.220.000
Bahreyn	890.000	913.000	931.000	961.000	971.000	960.000
İzlanda	803.000	836.000	830.000	845.000	855.000	870.000
Brezilya	1.436.000	1.304.000	962.000	772.000	793.000	800.000
Malezya	120.000	291.000	400.000	400.000	620.000	760.000
ABD	2.070.000	1.946.000	1.710.000	1.587.000	818.000	740.000
Suudi Arabistan	0	187.000	662.000	835.000	840.000	740.000
Güney Afrika	665.000	822.000	745.000	695.000	701.000	714.000
Türkiye	43.700	42.200	30.400	45.900	50.000	82.000
Diğer Ülkeler	6.139.000	6.903.000	6.010.000	6.343.000	5.596.000	6.412.000
Toplam	49.300.000	52.200.000	54.200.000	58.100.000	58.900.000	59.900.000



Şekil 1.2 : 8XXX Alüminyum serisinden elde edilen ürünler.

Deneysel çalışmalar sonucunda her iki soğuk haddeleme işleminde de kullanılacak olan parlak merdaneler ile daha iyi derin çekilebilir malzemeler üretildiği gözlenmiştir. Derin çekme üzerinde oluşan durum malzemelere yapılan çekme deneyleri sonucuna yansımamıştır. Deneysel çalışmalarda, iş merdanelerinin pürüzlülüğünün mikro yapıda herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Ancak malzeme yüzeyi ile iş merdanesi yüzeyi arasında bir bağlantı olduğu; iş merdane R_a değerleri düştükçe bu benzerliğin daha da yakın olduğu tespit edilmiştir.



2. TEORİK İNCELEME

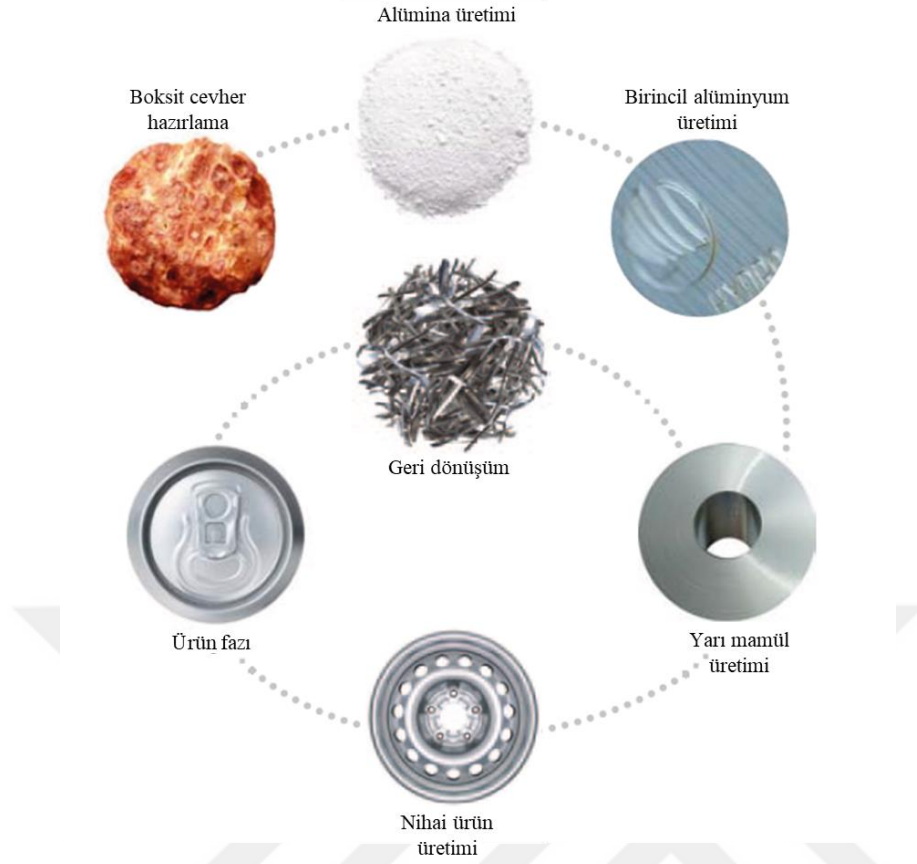
2.1 Alüminyum Hakkında Genel Bilgi

Alüminyum (Al) atom numarası 13, yoğunluğu 2,70 gr/cm³ olan gümüş renkli, hafif bir metaldir. Yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan element olan Al doğada saf olarak bulunmamaktadır; oksitli ve silikatlı bileşikler halinde bulunmaktadır. Alüminyum metali üretimi birincil ve ikincil üretim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birincil alüminyum üretimi boksit cevherlerinden elde edilmektedir. İkincil alüminyum ise hurda alüminyumun geri dönüşümü yolu ile üretilmektedir.

Dünya boksit rezervinin % 90'ı alüminyumun eldesinde, geri kalanı kimya, refrakter, aşındırıcı ve çimento sanayinde kullanılmaktadır. Alüminyum üretiminde kullanılan boksit cevheri genellikle %30-60 oranında alüminyum içermekte ve işletilebilir değerde kabul edilmektedir. Boksit madeni yatakları genellikle yüzeye yakın yerlerde olduğundan açık işletme ile işletilmektedir.

Boksit cevherinden saf alüminyum elde edilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, Carl Bayer tarafından keşfedilen Bayer metodu, dünyada halen en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Cevherden saf alüminyum üretiminin ilk aşamasında; Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina (Al₂O₃), ikinci aşamasında elektroliz yöntemi ile alüminadan saf alüminyum elde edilmektedir. Yaklaşık 4 ton boksitten; 2 ton alümina, 1 ton metal alüminyum elde edilebilmektedir [2].

Günümüzde hurda metalin yeniden değerlendirilmesi sonucu elde edilen ikincil alüminyuma olan talep, yüksek enerji maliyetleri ve çevreci yaklaşımlara paralel olarak giderek artmaktadır. Birincil alüminyum üretiminde maliyetin yaklaşık %40'ını enerji maliyeti oluştururken; ikincil alüminyum üretiminde enerjinin toplam maliyetler içindeki payı %5 düzeyinde olmaktadır. Şekil 2.1'de boksit cevherinden alüminyum üretimi ile ikincil alüminyum üretimi arasındaki döngü gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Birincil ve ikinci alüminyum üretimi döngüsü [4].

Endüstriyel alüminyum üretimi ilk kez 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlaması ile gerçekleşmiştir. İlk olarak elektrik kabloları ve ev dekorasyon ürünlerinde kullanılmaya başlayan alüminyuma, 1939-1945 dönemindeki savaş ortamında, uçak sanayinde yoğun talep olmuştur. 1960'larda alüminyum sac ve levhalar inşaat sanayinde kullanım alanı bulurken, 1970 ve 1980'lerde ise özellikle ABD'de paketlenme sektörü alüminyuma büyük talep yaratmıştır. Yaşanan petrol krizleri sonrasında, daha hafif otomobillerin üretiminin yaygınlaşmasıyla, otomotiv sektöründe bakır, çelik ve dökme demirin yerini alüminyum almaya başlamıştır.

Alüminyum sahip olduğu özellikler nedeniyle birçok sektörde tercih edilmektedir. En önemli özelliklerinin başında hafif bir metal olması gelmektedir. Alüminyumun özkütlesi, çeliğin özkütlesinin yaklaşık üçte birine eşittir. Hafif bir metal olması kullanıldığı alanlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu nedenle sera gazı ve diğer çevre kirlenici maddelerin emisyonunu azaltmaktadır. Alüminyumun mukavemeti diğer elementlerin eklenmesiyle arttırılmaktadır. Sünek bir metal olan alüminyum uygulamalarda tasarım esnekliği sağlamaktadır ve bu özelliği nedeniyle taşıma ve inşaat sektöründe tercih edilmektedir. Doğal oksit film tabakasına sahip olan

alüminyum, yüksek derecede korozyon direncine sahiptir. Bu özelliği farklı yüzey işlemleri ile daha da geliştirilebilmektedir. Bu özellik alüminyumun kullanılabilir yaşam ömrünü uzatmakta ve aynı zamanda bakım ihtiyacını da azaltmaktadır. Isı ve elektrik iletkenliğinin iyi olması, elektrik dağıtım ve ısı transfer sistemlerinde ve benzeri uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Çok ince alüminyum folyolar da (7 µm kalınlığında) dahil olmak üzere tamamen sızdırmaz bir özelliğe sahiptir. Bu duruma ek olarak, alüminyumun kendisinin toksik olmaması ve içinde bulunan malzemelerin aromalarının ve tadının salınımına izin vermemesi nedeniyle gıda ve içecek paketlemesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Tüm bu özelliklerinin yanında alüminyum geri dönüşümü kolay bir metaldir. Geri dönüşümü için az enerji gerekmektedir ve yeniden ergitme prosesinde oluşan metal kaybı %3'ten daha az olmaktadır.

Hafif, dayanıklı ve fonksiyonel olması alüminyumun günümüzün en önemli mühendislik malzemelerinden biri haline getiren başlıca özelliklerdir. Alüminyum sadece bu özellikleriyle bile kullanılmaya değer bir malzemedir. Çok geniş kullanıma sahip olan Al, yaşadığımız evlerde, kullandığımız tüm ulaşım araçlarında, her türlü kablo, her çeşit dolap, raf, tezgah ve mutfak gereçlerinde, modern ortam iç tasarımlarında, ayrıca gıda, ilaç ve kimya gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

Alüminyum, bina çatı ve cephe kaplamalarında, kapı, pencere ve merdiven yapımında kullanılmaktadır. Sağlamlığı yanında sahip olduğu dekoratif görünümü inşaat sektöründe zengin seçenekler sunmaktadır.

Alüminyum, en kullanışlı ambalaj malzemelerinden birisidir. Homojen yapısı, ince folyo şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapmaktadır. En yaygın kullanıldığı alanlardan birisi de içecek kutularıdır. Dünyada kullanılan tüm içecek kutularının %80'i alüminyumdan yapılmaktadır.

Sektörde alüminyum hurda arzının önemli bir kısmı içecek kutularından sağlanmakta olup, dünya ikincil alüminyum üretiminde içecek kutularının payı %30-55 arasında değişmektedir. İçecek kutuları ABD'de ikincil alüminyum üretiminin ana kaynağı durumundadır.

Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının

üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulduğundan, alüminyum kullanılan taşıtlar daha az yakıt harcamaktadır. Özellikle otobüs, tren, kamyon gibi büyük araçlarda alüminyum kullanımı önemli yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliği yanı sıra sağlamlığı uçak, gemi ve tekne yapımında kullanımını artırmaktadır.

Alüminyum son derece iletken bir metal olması nedeniyle elektrik ve elektronik sektöründe tercih edilmektedir. Yüksek voltajlı elektrik nakil hatları, yeraltı kabloları, elektrik boruları, motor bobin sarımında; ayrıca elektronik cihaz kasaları, şase, transistor soğutucuları ve veri kayıt disklerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Kimya, gıda ve ilaç sanayinde de geniş kullanımı olan alüminyum, plastik ve sentetik malzeme, kağıt, gübre, patlayıcı madde, karbonat ve kükürt üretiminde de çokça kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de alüminyumdan çeşitli sektörlerde üretilen ürünler gösterilmektedir [2].



Şekil 2.2 : Alüminyumdan üretilen çeşitli ürünler [2].

2.1.1 Yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikler

Alüminyum alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı sadece belli başlı ticari alaşımlar dışında yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyamazlar. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyan alaşımların da kullanabildikleri sıcaklıklar çeliklere göre çok düşüktür. Alaşımlar genellikle 485°C ve 650°C aralığında ergirlerken; 93°C gibi düşük sıcaklıkta da yumuşamaya başlarlar. Ancak, bazı alaşımlar 200°C'ye kadar özelliklerini koruyabilirler.

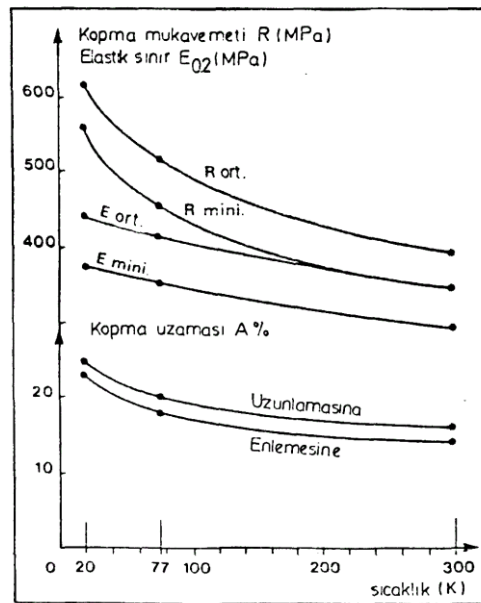
Mukavemet ve sertlik artan sıcaklık ile azalır. Eğer alüminyum alaşımı yüksek sıcaklıklarda kullanılacaksa; alaşım içindeki ana metal ve diğer ilave metal veya metallerin önemi artmaktadır. Alüminyumun içinde %3,5'ten daha fazla Mg varsa bu durumda bu alaşımın 65°C üzerinde uzun süreli kullanılması tavsiye edilmemektedir [5].

2.1.2 Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikler

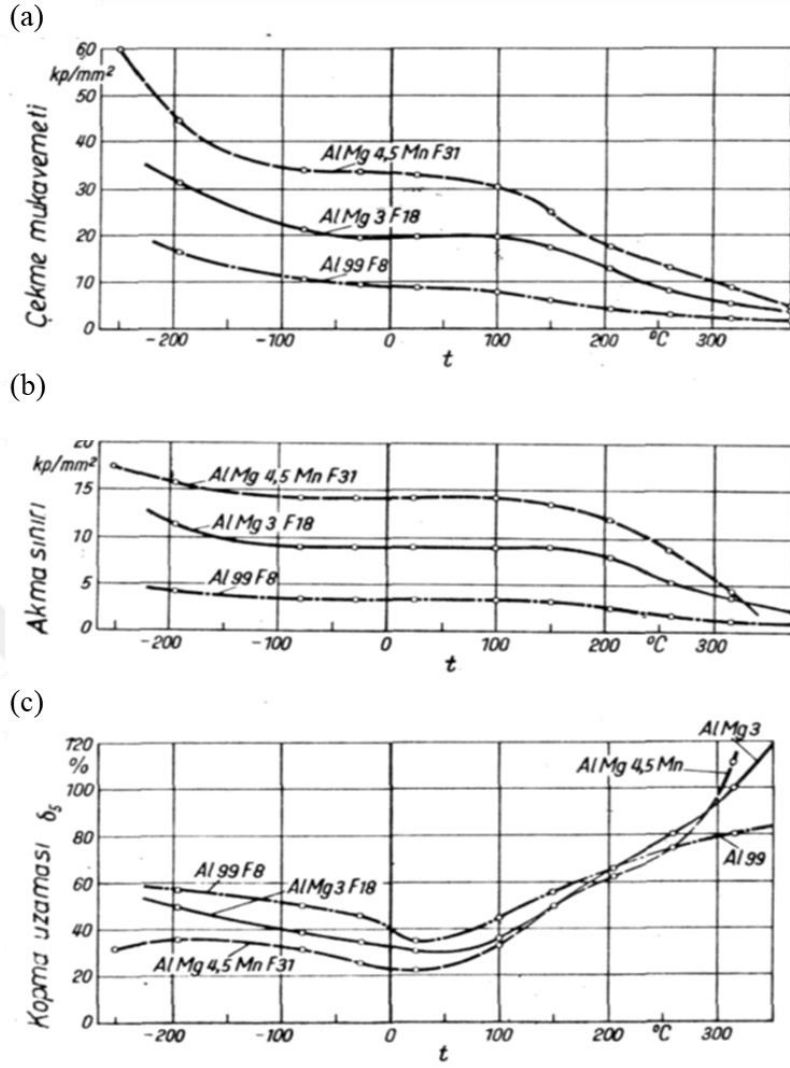
Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri 0°C altında sıcaklık düştükçe iyileşir. 195°C'ye kadar sıcaklık düşmesiyle malzemenin mukavemet ve uzaması artarken aynı zamanda da yorulma mukavemetinde de iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu artıştaki oran alaşıma bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Havacılık, nükleer, elektrik, kimya ve tıp gibi birçok alanda malzeme çalışma koşullarından biri de düşük sıcaklıktır. Bu nedenle bu sektörlerde tercih edilecek malzemelerin düşük sıcaklıkta özelliklerini koruması gerekmektedir. Alüminyum alaşımları da özellikle daha düşük ağırlığın tercih edildiği durumlarda özellikle çelik yerine sıkça tercih edilmektedir.

Şekil 2.3'te 7020 alaşımına ait mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişikliği gösterilmiştir. Sıcaklık düştükçe kopma mukavemeti, uzamanın ve elastik sınırın arttığı görülmektedir.



Şekil 2.3 : 7020 alaşımı mekanik karakteristikleri [5].



Şekil 2.4 : (a) Farklı alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti karşılaştırmaları (b) Farklı alüminyum alaşımlarının akma mukavemeti karşılaştırmaları (c) Farklı alüminyum alaşımlarının kopma uzaması karşılaştırmaları [5].

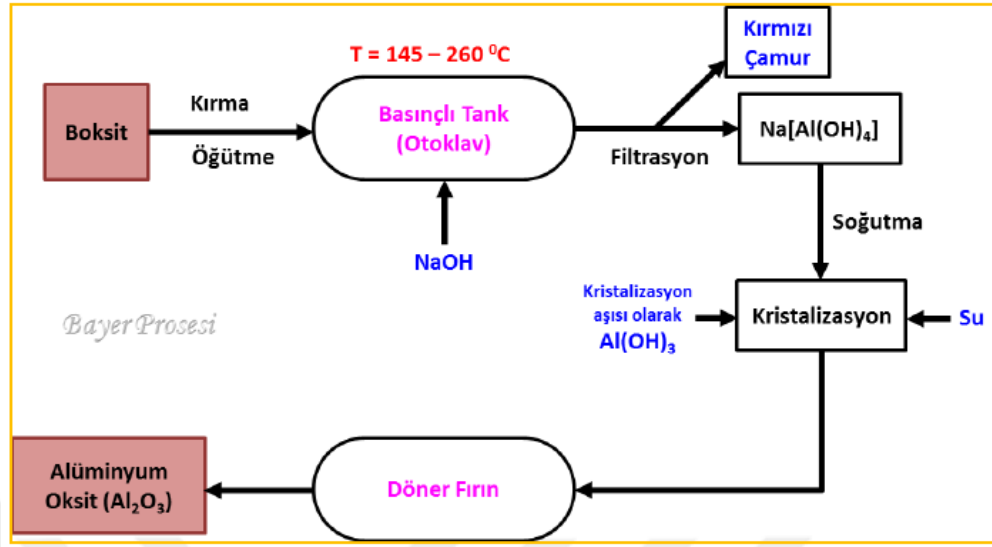
2.2 Birincil Alüminyum Üretimi ve Alüminyum Alaşımları

2.2.1 Bayer prosesi

Günümüzde alüminyum oksidin teknik üretimindeki en önemli procestir. Bu prosesin akım şeması oldukça karışık olmasına rağmen, prensip olarak boksit cevherinden alüminyum oksit üretimi üç aşamada meydana gelmektedir. Bunlar;

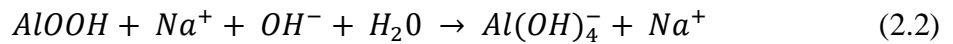
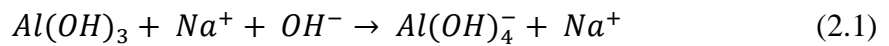
- Boksit cevherlerinin liçi ve kırmızı çamurun ayrılması,
- Alüminyum hidroksitin çöktürülmesi,
- Alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ve $\alpha-Al_2O_3$ üretimidir. [6].

Şekil 2.5'te boksit cevherinden Bayer prosesi ile alümina üretiminin genel akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Bayer prosesi akış şeması [7].

Boksit cevherleri litrede 120-350g Na₂O içeren sodyum hidroksitli çözeltilerle yüksek sıcaklıkta liç edilerek sodyum alüminat olarak çözeltiye alınmaktadır. Boksit cevherinin bileşimine bağlı olarak, cevher farklı sıcaklıklarda çözeltiye eklenmektedir. Sıcaklık değerleri gibsit için 120-150⁰ C, Böhmit ve diaspor için 180-220⁰ C'dir. Bu kadar yüksek sıcaklığa otoklavlarla basınç altında çıkılabilmektedir. Liç işleminde oluşan kimyasal reaksiyonlar gibsit cevheri için 2.1 denkleminde; boksit cevheri için 2.2 denkleminde gösterilmektedir.

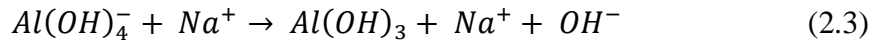


Al(OH)₃ için çözünme izotermi çözeltilerin Na₂O içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklığın ve Na₂O konsantrasyonunun artması ile Al₂O₃ çözünürlüğü artmaktadır. Ancak, Na₂O konsantrasyonu belli bir değere ulaştığında daha fazla artsa bile Al₂O₃ çözünürlüğü düşmektedir. Çözünürlükte yeterli bir fark oluşturmak için sadece sıcaklık değil konsantrasyonu seyreltmek de çözünürlükte çökme için yeterli bir fark sağlamaktadır. Ancak, bu durum, daha sonraki aşamalarda buharlaştırma işlemini gerektirdiği için enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu nedenle de Al(OH)₃ çöktürülmesinden sonra, çözelti yüksek bir konsantrasyona getirilmek üzere buharlaştırılmaktadır. Böylece, çözünürlük farkı %15-18 Al₂O₃ arasında

değişmektedir. Malzemelerin gelişmesi ile daha yüksek basınçlarda, 220°C gibi yüksek sıcaklıklarda, sürekli çalışma şekli ile çalışma mümkün olabilmektedir. Günümüzde boru otoklav teknolojisi ile 300°C sıcaklığına kadar çıkılabilmektedir.

Liç işlemi sonunda; demir oksit, silis, sodyum hidroksisodalit, sodyum titanattan ibaret çözünmeyen katı artık oluşmaktadır. Demir oksitten aldığı kırmızı renkten dolayı bu artığa “kırmızı çamur” adı verilmektedir. Alüminatlı çözeltilerden; kırmızı çamurun kıvamlaştırıcılarda sedimantasyonu ve ters akım prensibine göre yıkanması ile çözeltiden ayrılmakta ve barajlarda depolanmaktadır. Kırmızı çamur çevre sağlığı için problem oluşturmaktadır. Kırmızı çamur, çöktürme tankını terk ederken takriben %25 kadar alüminatlı çözeltiyi de bünyesinde bulundurmaktadır. Bu alüminatlı çözeltinin kazanılması ve ana kütlesi demir oksit olan bu bileşimin çevreye zarar vermeden depolanması için mutlak surette bir yıkama işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Yıkama işlemi ters akım prensibine göre sürekli olarak çalışan kıvamlaştırıcılarda yapılmaktadır. Kırmızı çamurda alkali ve alümina kayıpları kaçınılmazdır. Bu kayıpların iki sebebi vardır. Bunlar fiziksel ve kimyasal kayıplardır. Fiziksel kayıpların sebebi, kırmızı çamura bağlı olarak atılan çözeltilerdir. Bu çözelti ile az bir miktar da alümina ve kostik kaybı söz konusu olmaktadır. Kimyasal kayıp ise, liç işleminde oluşan ve çözünmeyen özellikteki sodalit teşekkülüdür.

Sodyum alüminatlı çözeltilerden alüminyum hidroksit çöktürülmesi 0,1-0,17 M Na₂O içeren, 60°C’deki seyreltilmiş çözeltilerden Al(OH)₃ aşılması ile 2.3 denklemde gösterilen reaksiyonuna göre gerçekleşmektedir. Bu reaksiyondan görüleceği gibi, liç işleminde kullanılan sodyum hidroksit tekrar açığa çıkmaktadır ve çıkan ürün boksit liçinde kullanılmaktadır. Sodyum hidroksitin çevrimi sebebi ile teorik olarak sodyum hidroksit gereksinimi olmamalıdır. Ancak, yıkama kayıpları sodyum hidroksitin kaolen ve titan oksit ile yapışık bileşikler nedeni ile katı artığa karışıp kaybolduğu için uygulamada bu çevrime ulaşılammamaktadır.



Alümina üretiminin en son kademesi, alüminyum hidroksitin kalsinasyondur. Kalsinasyon işlemi ile ergimiş tuz elektrolizinde kullanılacak toz alümina üretilmektedir. Toz alüminanın özellikleri elektroliz işleminin rejimi üzerinde etkisi olduğu için bu özelliklerin belirlenmesi teknolojik açıdan önem taşımaktadır.

Alüminyum hidroksitin, alüminyum okside dönüştürülmesi 1200-1300°C'ye ısıtılan döner fırınlarda veya akışkan yatakta yapılabilir.

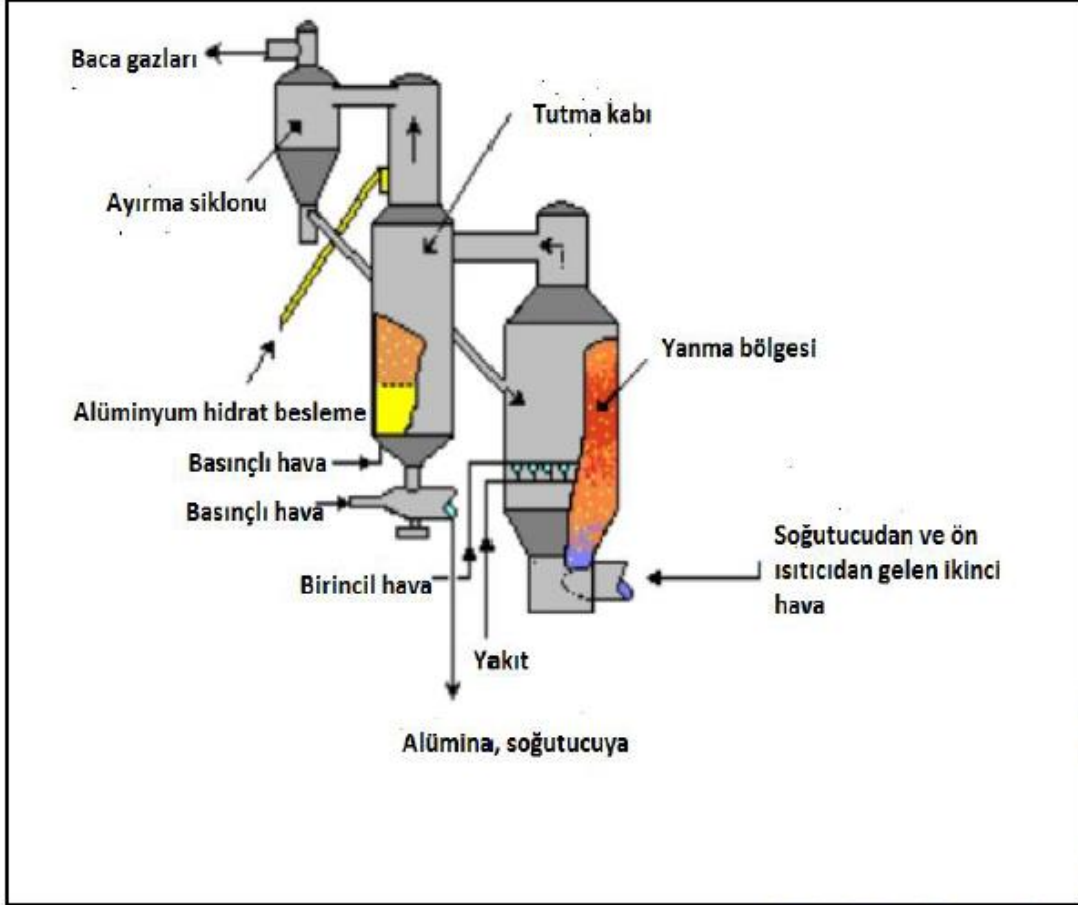
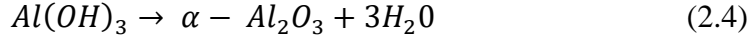
Günümüz şartlarında bir döner fırının kapasitesi 100-600 ton arasında değişmektedir. Şekil 2.6'da döner fırın şeması gösterilmektedir. Fırının dakikada 1-2 devir dönme hareketi sonucunda kalsine alümina fırın dışına taşınmaktadır. Bu yolla taşınan alümina miktarı, fırına giren alüminanın %50'sine kadar ulaşabilmektedir. Siklonlardan geçirilerek tozların %98'i geri kazanılmaktadır. Siklonların arkasına bağlanan bir elektrostatik toz tutucu ile geri kalan tozun da %98'i kazanılmaktadır. Gerçek alümina kaybı %0,2-0,3 dolaylarındadır. Bu fırınların ısı ihtiyacı 1 kg alümina için 4200kj'dür. Kalsinasyon reaksiyonları ekzotermik olduğu için dışarıdan ısı verilmesini gerektirmektedir. Kalsinasyon fırınlarında üretilen alüminanın bileşimini bozmamak için külsüz yakıt kullanma zorunluluğu vardır. Bu sebeple döner fırında sıvı yakıt kullanılmaktadır. Döner fırında sıcaklık 900-1000°C'ye kadar çıkmaktadır. Döner fırından çıkan sıcak kalsine, soğutulmak amacı ile döner soğutuculara alınır. Döner soğutucular su ile endirekt olarak çalışır. Soğutulan alümina ticari veya alüminyum metalin üretimi amacı ile depolanır [6].



Şekil 2.6 : Alümina üretiminde kullanılan döner fırın [8].

Döner fırınlarda 1 ton kalsine alümina üretimi için 4.5 GJ enerji gereksinimi varken; bu değer flaş kalsinasyonda 3.5 GJ değerine kadar düşmektedir. Şekil 2.7'de 1500 ton/gün kapasiteli bir kalsinatörün akım şeması görülmektedir. Alüminyum hidrat yıkanıp suyu giderildikten sonra, tutma kabına beslenmektedir. Bu kap kalsinasyon işleminin yapıldığı fırının yanma bölgesini beslemektedir. Yanma bölgesinden çıkan sıcak hava alüminyum hidratın ısıtılmasında kullanılmaktadır. Yanma bölgesinden

alınan malzeme soğutulmaktadır ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ üretilmektedir. Oluşan tepkime denklem 2.4'te gösterilmektedir. Bu kalsinasyon işlemi sırasında katı parçacıklar havada askıdadırlar. Hidrat suyunun giderilmesi bu sebeple bu sistemde çok hızlı gerçekleşmektedir [6].

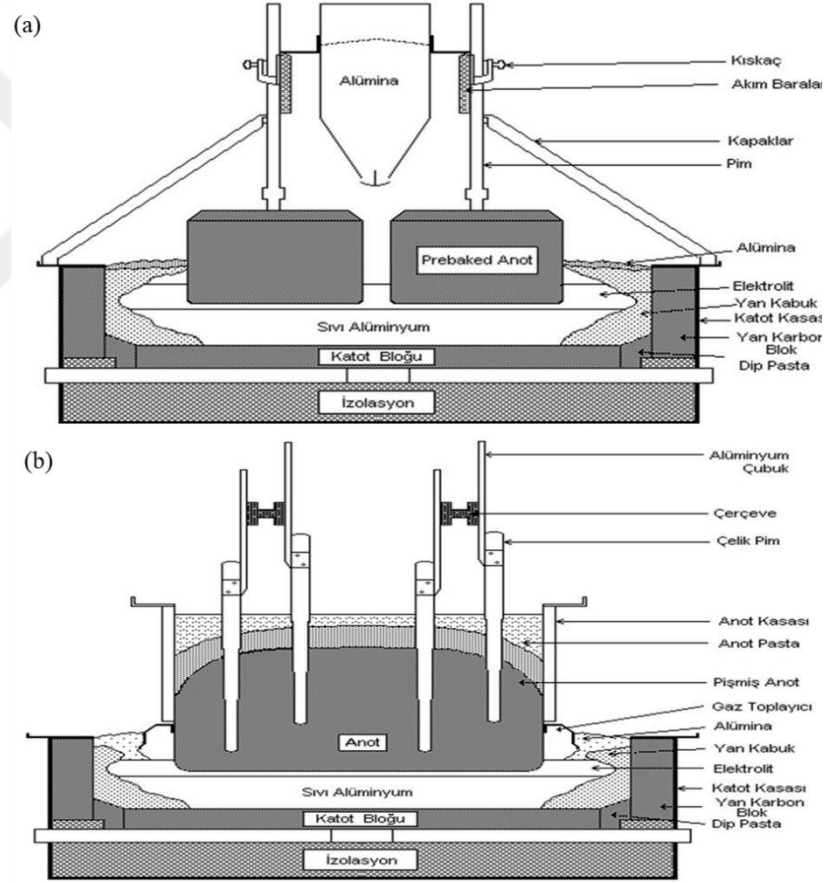


Şekil 2.7 : Alümina üretiminde kullanılan kalsinatör akım şeması.

2.2.2 Hall-Heroult prosesi

Alümina üretiminden sonraki aşama, alüminanın ergimiş kriyolit banyosunda elektrolizi ile metalik alüminyuma dönüştürülmesidir. Birincil alüminyum, alüminanın elektroliz hücrelerinde yüksek akım (100-400kA) altında ki 960-970°C sıcaklıkta, elektrolit adı verilen kriyolit-alüminyum florür ergimiş tuz ergiyiği içinde çözünmesi, ayrışması ve indirgenmesi sonucunda tabanda birikmesi ile elde edilmektedir. Tabanda biriken sıvı alüminyum belirli periyotlarla kapalı vakum potalarıyla çekilip, alaşımlandırma ve kalıplara dökülmek üzere dökümhane birimine gönderilmektedir.

Boyutları, tipleri ve sayıları tesislere göre değişen elektroliz hücrelerinin her biri bağımsız üretim birimi olup elektriksel olarak birbirlerine seri bağlanmaktadır. Günümüzde tüm endüstriyel alüminyum tesislerindeki hücrelerin yapısı; Anot, Katot ve Bara Sistemi ile kategorize edilmektedir. Bu konstrüksiyon elemanları arasında tesislerin teknolojisini ve teknoloji seviyesini tanımlayan fonksiyon olarak özellikle modern teknolojilerde hücre hizmetleri için kurulu sistemleri taşıyan ve hücrenin de rejimini büyük ölçüde belirleyen anot hücreleri en önemli faktördür. Endüstriyel hücre anotları iki kategoriye ayrılmaktadır. Koklaşma sürecinin hücre üzerinde olduğu sürekli anot tipli hücreler Soderberg ve koklaşma sürecinin başka bir birimde gerçekleştiği kesikli anot tipli hücreler Prebake olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.5’de Soderberg ve Prebake tipli hücrelerin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : (a) Prebaked hücre yapısı (b) Soderberg hücre yapısı

Her iki hücre tipinde de temel proses ve kullanılan hammaddeler aynı olmasına rağmen, işletme parametre ve hizmetleri arasında bazı farklar bulunmaktadır. Prebaked anotlu sistemler, sayıları 12-20 arası değişen dikdörtgen prizması şeklinde olan ve anot fabrikasında hazırlanan pişirilmiş petrol koku ve taş kömürü zifti

karişımının üst ortasındaki alt kısmı çelik pimlerle tutturulup, alüminyumdan oluşan pimin üst parçası ile anot çerçevesine bağlanmasından oluşmaktadır. Prebaked anotlu sistemler, reaksiyona giren karbon kütle yanında, son yıllarda tam olarak otomatik hale gelen kabuk kırma ve kontrollü alümina ve diğer hammadde şarjları ile anot etkisi söndürme teçhizatları ile donatılmaktadır. Prebaked sistemlerde kabuk kırma, hammadde şarjı ve anot etkisi söndürme işlemleri otomatik olarak yapılmasına karşın, Soderberg sistemlerde bu işlemler genellikle özel araçlar vasıtasıyla manuel olarak yapılmaktadır. Öte yandan Prebake sistemlerde tam bir kontrol olanağı nedeniyle, Soderberg'e göre, başta enerji olmak üzere tüm birim girdi tüketimleri oldukça düşük, üretilen metal kalite ortalaması da daha yüksektir. Her iki tip hücrelerde katot sistemi değişmemektedir [9].

2.2.3 Alüminyum alaşımları

Alüminyum saf olarak kullanıldığı gibi aynı zamanda farklı metal takviyeleri ile alaşımlandırılarak da kullanılmaktadır. Alüminyum, eklenen alaşım elementleri ile birlikte çok daha farklı özellikler kazanmaktadır. Kullanılacağı alana göre, birçok alüminyum alaşımı günümüze kadar geliştirilmiştir. Özellikle, Alüminyum alaşımlarında kullanılan başlıca elementler silikon, demir, bakır, mangan, magnezyum, çinko, nikel ve titanyumdur.

Alüminyum alaşımlarında en çok tercih edilen metallere biri olan silisyum alüminyumun döküm özelliklerini geliştirmektedir. Ancak, silisyum alüminyum-bakır alaşımlarında sıcak yırtılmaya sebep olabilmektedir. Bakır, mukavemetin artmasını sağlamaktadır; hatta bu durum yüksek sıcaklıklar için de geçerlidir. Alüminyum- bakır alaşımları yaşlandırılabilir. Diğer yandan bakır korozyon direncini azaltırken, bu alaşımların katılma aralığının geniş olması dökülebilirliği güçleştirmektedir. Çinko, mukavemeti arttırmaktadır; aynı zamanda magnezyum ile birlikte kullanıldığı zaman oluşan alaşım yaşlandırılabilir. Eğer yüksek sıcaklıklarda mukavemetin daha iyi olması gerekiyorsa alüminyuma nikel ilave edilmektedir. Titanyum alaşımları katı çözümleri sertleşmesi mekanizması ile daha yüksek mukavemete sahip olmaktadır. Aynı zamanda titanyumun tane küçültme etkisi bulunmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında Amerikan Alüminyum Birliği (Aluminum Association - AA) sistemi uluslararası standartlarda yaygın olarak kabul

görmüştür. Alüminyum alaşımları bu sınıflandırmaya göre mekanik işlem alaşımları ve döküm alaşımları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [10,11].

2.2.3.1 Mekanik işlem alaşımları

Bu alaşımlar genellikle haddeleme, dövme, ekstrüzyon gibi sıcak ve soğuk şekillendirme yöntemleriyle üretim için tercih edilmektedir. Mekanik işlem alaşımları, ısıtma işlemi uygulanabilen ve ısıtma işlemi uygulanamayan alaşımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Yaşlandırılabilir alaşımların uygun ısıtma işlemleri ile mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Ancak, yaşlandırılmayan alaşımlarda mukavemet arttırmak için deformasyon sertleşmesi veya tane küçültme yöntemleri kullanılmaktadır [12].

Yaşlanmayan alaşımlar

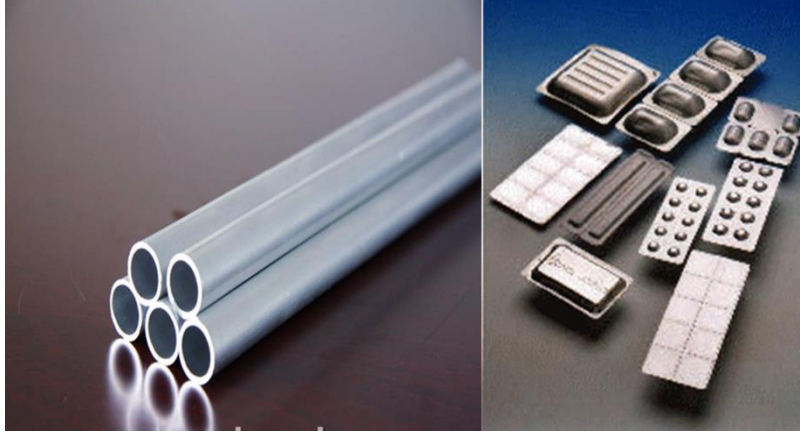
Mekanik işlem alaşım grubuna dahil olup ısıtma işlemi ile dayanıklaştırılmayan alaşımlar yaşlanmayan alaşımlar olarak adlandırılır. Bu alaşım grubuna dahil olan alaşımlar paketleme, ulaşım, inşaat gibi geniş endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bu alaşımların bu sektörlerde tercih edilmesinin en temel üç nedeni aşağıda belirtilmiştir:

- Yapısal dayanıklılık ve mukavemet
- Şekillenebilirlik – Nihai kompleks şekil eldesi ve üretkenlik
- Yüzey kalitesi – Nihai ürün yüzey görüntüsü ve yansımaya özelliği

Yaşlanmayan mekanik işlem alaşımları 20 MPa ile 500 MPa aralığında akma dayanımı gösterebilirler. Bu alaşımlar genellikle gerinim sertleşmesi ile dayanım özelliği kazanırlar. Ayrıca, dispersiyon sertleşmesi (Al-Mn) ve katı çözümleri sertleşmesi (Al-Mn-Mg) de malzeme özelliklerine etki eder [13].

1XXX serisi

Bu alaşım serisi %99,99 alüminyum içermektedir. Alüminyum oranı en yüksek alaşım olmakla birlikte eğer ticari alanda kullanılacaksa diğer alaşım elementleri oranı %1'e çıkabilmektedir. Endüstriyel olarak alüminyum kullanılmaya başlandığı zaman bu seri de değerlendirilmeye başlanmıştır. Çekme özellikleri çok düşük olan bu alaşım folyo, dekoratif ürün ve kimyasal proses ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da 1XXX serisine ait alaşımların blister malzemesi ve boru malzemesi olarak kullanımı gösterilmektedir [13].



Şekil 2.9 : 1XXX serisi farklı kullanım alanları.

3XXX serisi

Bu alaşım grubu yüksek dövülebilirlik ve mükemmel korozyon direnci sağlamaktadır. Ticari Al-Mn alaşımları %1,25 mangan içermesine rağmen maksimum katı çözünürlük %1,82'dir. Bu kısıtlamanın temel sebebi empürite olarak bulunan demirin çözünürlüğü azaltması ve aynı zamanda oluşabilecek Al_6Mn geniş partiküllerinin dövülebilirlik üzerinde göstereceği olumsuz etkilerdir. Mangan içeren küçük intermetalikler dispersiyon sertleşmesine sebep olarak tavllanmış malzemenin çekme mukavemetinin 110 MPa olmasını sağlar. Bu alaşım türü folyo, pişirme aleti veya çatı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Mangan yanında magnezyum eklenmesi bu alaşım grubunda katı çözültisi sertleşmesi oluşmasına sebep olmaktadır. Yüksek miktarda mangan ve magnezyum içeren 3105 alaşımında ($Al-1.1Mn-1.05Mg-0.15Cu$) çekme dayanımı 320 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Bu alaşım alüminyum ve magnezyum metalinin en yaygın kullanım alanı olan içecek kutusunda kullanılmaktadır [13].

4XXX serisi

Bu serinin öne çıkan özellikleri ısı işlem görebilmesi, maksimum çekme dayanımının 175-380 MPa aralığında olması, lehimlenebilmesi ve iyi bir akış özelliği göstermesidir. İçerisinde diğer serilere göre daha fazla silisyum bulunması etkisiyle dövülebilirlik özelliği yüksek olan bu alaşımlar hava taşıtı pistonlarında kullanılmaktadır. Bu serideki alaşımlar gaz altı kaynaklarında dolgu malzemesi olarak da kullanılmaktadır [14].

5XXX serisi

Bu seri içerisinde magnezyum katı eriyik olarak ve %0,8-%5 oranlarında bulunmaktadır. Bu serideki en dayanıklı alaşım olarak bilinen 5456 'nın akma dayanımı 40-160 MPa, çekme dayanımı 125-310 MPa aralığında değişmektedir.

Tavlanmış halinde dahi yüksek dayanım gösteren bu seri bu özelliği ile otomotiv alanında tercih edilmektedir. Lüder band oluşumundan kaynaklı malzeme yüzeyinde oluşan çizgiler bu alaşımın iç panelde kullanılmasını kısıtlamaktadır.

Al-Mg alaşımı, kaynaklı uygulamalarda da kullanılmaktadır. Basınçlı kap, damperli kamyon, petrol ve süt gibi sıvıları taşıyan büyük tank yapımında kullanılmaktadır. Korozyona karşı yüksek direnci ve hafifliği sayesinde de okyanus üstü taşımalarda kullanılan büyük kapların ve askeri araçların da üretiminde tercih edilmektedir [13].

Yaşlanabilir alaşımlar

Isıl işlem yoluyla dayanıklılığı artırılabilen mekanik işlem alaşımlarıdır. Yaşlandırma yönetimiyle dayanımı artırılan bu alaşımlar iki gruba ayrılmaktadır. Orta dayanım sınıfında olan alaşımlar kaynaklanabilir özellik sergilerken; yüksek dayanım sınıfında olan ve genellikle havacılık sektöründe tercih edilen alaşımlar ise düşük kaynaklanabilirlik özelliği göstermektedir. Bu gruba dahil olan alaşım grupları havacılık ve otomotiv sektörlerinde çokça kullanılmaktadır [14,15].

2XXX serisi

Al-Cu alaşımı olarak bilinen bu serinin en önemli özellikleri oda sıcaklığında yüksek dayanım, mekanik olarak birleştirilebilmek ve bazı özel alaşımlarında da kaynaklanabilme özelliğidir. Atmosferik korozyon direnci yüksek olmadığı için daha çok kaplama yöntemiyle direnç sağlanmaktadır. Diğer empüriteler çok daha dar aralıkta tutularak yüksek dayanım ve yüksek tokluk sağlanmaktadır.

2011, 2017, and 2117 alaşımları tutturucu veya vida makinası ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu seriye ait diğer alaşımlar hava taşıtları iç ve dış teçhizatında, yakıt tanklarında ve yolcu taşıma araçlarında kullanılmaktadır [13,15].

6XXX serisi

Al-Mg-Si alaşımları kaynaklanabilir, yüksek korozyon direnci sağlayan orta dayanımlı alaşımlardır. Bu seri ekstrüde edilerek kullanılsa da az miktarda plaka

ve levha olarak da üretilmektedir. Ticari anlamda 6XXX serisi üç kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategoride magnezyum ve silisyum oranları %0,8 ve %1,2'dir. Bu alaşımlar kolayca ekstrüde edilebilirken; ekstrüzyon sırasında ısıl işlem de uygulanabilir.

Diğer iki kategorideki alaşımlarda ise magnezyum ve silisyum oranı %1,4'ten fazladır. Yaşlandırma sonrasında yüksek dayanım elde edilir. 6XXX serisinde silisyum eklenme amacı Mg_2Si olsa da bu kategorideki alaşımlarda fazladan bulunan silisyum silikon olarak çökelebilmektedir. Bu durumda tanalar arası gevrekleşme olmakta ve dövülebilirlik de olumsuz etkilenmektedir [13].

7XXX serisi

Al-Mg-Zn sistemi yaşlandırma için mükemmel bir potansiye sağlamaktadır. Bu yüksek dayanımlı seriye dördüncü bir element bakır da eklendiği zaman gerilmeli korozyon direnci artmaktadır. Ancak, bakır eklenmemesi ile de bu alaşımlar kaynaklanabilme özelliğine sahip olmaktadır.

Bu alaşımlarda yüksek tokluk sağlanırken aynı zamanda demir ve silisyum gibi diğer empüritelerin de kontrol edilmesiyle dayanıklılık ve kırılma tokluğu maksimize ediliyor. Atmosforik korozyon direnci çok yüksek olmadığı için bu özelliği gerektiren uygulamalarda kaplama işlemi uygulanmaktadır.

Bu seri genellikle havacılık sektöründe kullanılmakla birlikte sondaj boru yapımında da tercih edilmektedir [13].

2.2.3.2 Döküm alaşımları

Döküm alaşımları, mekanik işlem alaşımlarına göre bakır ve silisyum gibi alaşım elementlerini fazla oranda içerdiği için daha heterojenik bir yapıya sahiptirler. Bu ikinci faz oluşumları yük altında malzemede çatlak oluşumuna ve çatlak ilerlemesine sebep olabilirler. Yorulma dayanımları çok hassas olabilir. Yorulma dayanımı sırasında bu döküm alaşımlarının dayanım ve uzaması mekanik alaşımlara göre çok daha düşük olabilir. Bunun temel nedeni ise döküm sırasında oluşan hataların engellenemesidir [13,16].

2XX.X serisi

Maksimum çekme dayanımları 130-450 MPa arasında değişmektedir. Dayanımı en yüksek ve ısım işlem uygulanabilen an yaygın alaşım olan 201.0 havacılık sektöründe önemli uygulamalarda kullanılmaktadır. Sıcak yırtılma ve mikroporozlu yapılar görülebildiği için dökülebilirliği kısıtlıdır. Yüksek tokluğu nedeniyle gerinim altında çalışan makina parçaları, elektrik şalterlerinde ve havacılık sektöründe tercih edilmektedir.

Standart döküm alaşımlarının yanında, motor piston başlığı veya rulmanlarda kullanılan yüksek aşınma dayanımlı, düşük sürtünme katsayısına ve yüksek sıcaklıklarda da yeterli dayanıma sahip alaşımlar da bulunmaktadır. 203.0 alaşımı yüksek dayanımı olan ve önemli mekanik özelliklere sahip bir alaşımdır [13,16].

3XX.X serisi

Yüksek silisyum içermesinden dolayı yüksek bükülebilirliğe sahip olan bu seri ısıl işlemle beraber yüksek dayanımlara sahip olabilmektedir. Aynı zamanda bu seriye ait alaşımlar kum döküm, sabit kalıp döküm, hassas döküm gibi birçok yöntemle dökülebilmektedir.

Yüksek esneklik, yüksek dayanım, yüksek tokluğa sahip olan bu alaşımlar otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır [13,16].

4XX.X serisi

İyi derecede bükülebilirliğe sahip olan bu alaşımlar karmaşık döküm için uygundur. Isıl işleme tabi olamazlar ve maksimum çekme dayanımları 120-175 MPa aralığındadır.

B413.0 alaşımı ötektik kompozisyon ve düşük ergime sıcaklığından dolayı dökülebilme kabiliyeti yüksek olmakla birlikte kaynaklanabilme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda orta ölçekte dayanıma sahip olan bu alaşımlar kopma olmadan önce yüksek uzama gösterirler. Korozyon dirençleri yüksektir.

Bu alaşımlar genellikle bilgisayar kasası, dış malzemeleri ve mimari yapılarda kullanılmaktadır [13,16].

5XX.X serisi

Bu seriye ait alaşımlar genellikle sadece ikili faz içeren ve yüksek dayanıklılık ve tokluğa sahip alaşımlardır. Korozyona karşı dirençleri Al-Mg döküm alaşımlarının en önemli özelliğidir. Bu alaşımlar kaynaklanma için uygundur ve bu nedenle mimari ve dekoratif alanlarda tercih edilmektedir. Anodize edildikleri zaman iyi görüntüye sahip olurlar ve aynı zamanda işlenebilirlikleri st seviyededir [13,16].

7XX.X serisi

Alüminyum-magnezyum-inko 7XX.X alaşımları nihai Şekil eldesi iyi olan bir seridir. Aynı zamanda bu serideki alaşımlar yüksek korozyon direncine sahiptirler ve ısı işleme gerek kalmaksızın doğal yaşlanma ile yüksek dayanıma sahip olurlar. Dökülmesi zor olduğu için genellikle yüksek işlenebilirlik ve st düzey yüzey özellikleri gerektiren uygulamalarda tercih edilir [13,16].

8XX.X serisi

Yaklaşık %6 oranında Sn içeren bu alaşımlara dayanıklılıklarını arttırmak için de az miktarda Cu ve Ni eklenmektedir. İşlenebilirlikleri yüksektir ve dökülmesi zor bir seridir. Bu alaşımlar motorların rulman parçalarında kullanılmak için geliştirilmiştir [13,16].

2.3 İkiz Merdane Döküm Yöntemi

İkiz merdane döküm yöntemi yaklaşık 60 yıl önce, bilinen levha ve folyo yöntemlerine karşı maliyet düşürme hedefiyle alüminyum endüstrisine giriş yapmıştır. Bu yöntem ile döküm ve sıcak haddeleme işlemleri aynı anda yapılmaktadır. Üretim planlarında sağladığı esneklik, düşük yatırım ve işletme maliyetleri ve sağladığı enerji tasarrufu ile en çok tercih edilen levha üretim methodlarından biri olmuştur. Fakat, bu yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Üretilen alaşım çeşitliliğindeki kısıtlama, zayıf mekanik özellikler en büyük dezavantajlardır. İkiz merdane döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımlarının spesifik uygulamalara hizmet edebilmesi için, döküm işleminde katılaşma karakterinin iyi irdelenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, ikiz merdane dökümden üretilmiş levha ve folyo alaşımlarının kullanım alanları sahip oldukları özellikler nedeniyle kısıtlanabilmektedir [17].

2.3.1 Genel bilgi

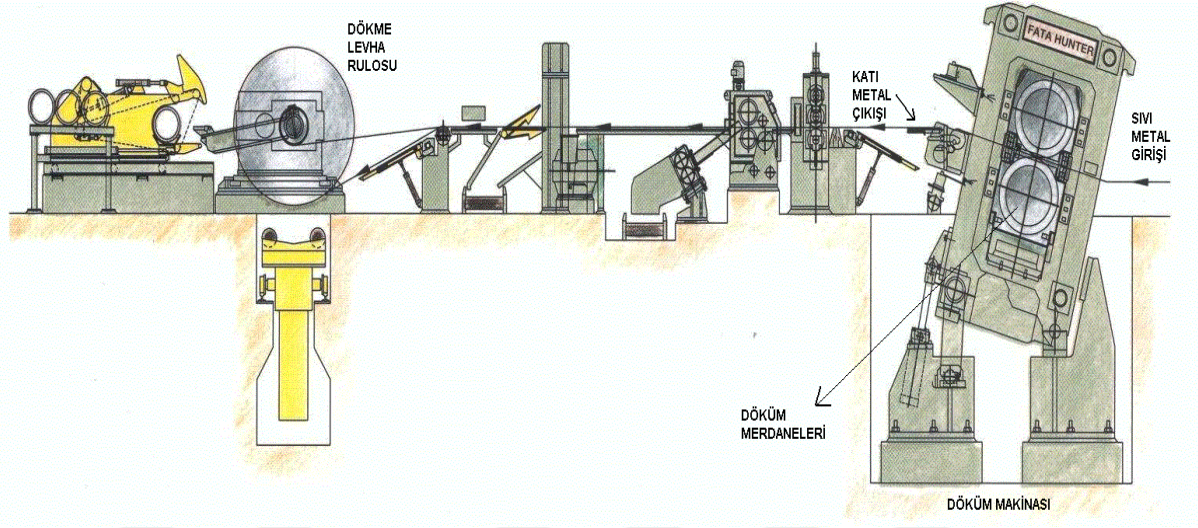
Dönen iki merdane arasından geçen sıvı alüminyumun katılaşması ile tamamlanan döküm yöntemidir. Merdaneler arasından geçen alüminyum aynı zamanda haddeleme (sıcak) işlemi de görmektedir. İkiz merdane döküm kapasitesi sıvı alüminyumdan çıkan ısı ile hesaplanmaktadır. Geniş merdaneler daha fazla katılaşma alanı sağlamak için kullanılmaktadır. Yüksek termal iletken merdaneler (bakır gibi) tercih edilmesine rağmen, döküm hızı çok yavaştır. Düşük ısı hacimden dolayı sadece dakikada birkaç metre katılaşma mümkündür. Klasik ikiz merdane dökümlerde saatte 1-2 ton ve 2-10mm kalınlığında yassı ürünler üretilebilmektedir [18].

Şekil 2.3'te ikiz merdane döküm yönteminin genel görünümü gösterilmektedir. Ergitme fırınında ergitilen metal farklı alaşım elementleri ile istenilen analiz değerine getirildikten sonra tutma fırınlarına transfer edilmektedir. Burada son alaşım ve sıcaklık ayarlamaları yapılmaktadır. Gerekli rafinasyon işlemleri uygulandıktan sonra sıvı metal yolluklar vasıtası ile tutma fırınlarından merdanelere doğru transfer edilmektedir. İlk olarak sıvı metal hidrojen gazının giderildiği istasyon olan sıcak degazer ünitesine alınmaktadır. Asal gaz vasıtası ile sıvı içerisindeki gaz çözünürlüğü azaltılarak hidrojenin yüzeye çıkarılması sağlanmaktadır. Hidrojen giderme işleminden sonra sıvı metal seramik filtre üzerinde süzme işleminin yapıldığı filtre istasyonuna aktarılmaktadır. Burada tanımlanmış filtre geçirgenliğinin üzerindeki katı partiküller süzülerek metal temizlenmektedir. Tandış ve seramik tip içerisine alınan sıvı metal, su soğutmalı merdane üzerine dökülerek katılaşmasını tamamlamaktadır. Levha taslağı olarak öncelikle kenar kesme, ardından boyutsal ölçüm ve rulo sarımını sağlayan istasyonlardan geçerek dökme rulo halini almaktadır.

Alüminyum yüzeyi merdanelere temas eder etmez katılaşmaktadır. Grafit gibi ayırıcı malzeme kullanılmasına rağmen yüzeyde oksit oluşumu kaçınılmazdır. Oluşan oksitin kaldırılması çok kolay değildir ve alüminyumun yüzey kalitesini etkileyebilmektedir. Bu nedenle yüksek yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda genellikle tercih edilmemektedir [18].

İkiz merdane dökümünün öne çıkan avantajları, ince tane yapısı, düzgün profil dağılımı ve sıcak haddeleme işleminin pas geçilmesidir. En büyük dezavantajı ise katılaşma aralığı yüksek olan alaşımların bu yöntem ile üretilememesidir. Bu yöntem

ile katılma aralığı dar olan alaşımlar üretilebilmektedir. Çizelge 2.1de ikiz merdane yöntemi ile yaygın olarak dökülen alaşımlar bulunmaktadır [20].



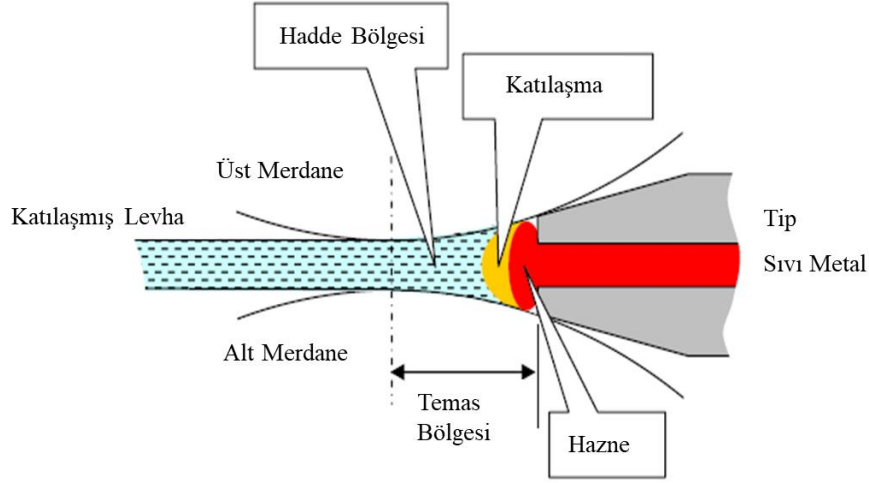
Şekil 2.10 : İkiz merdane döküm tekniği genel görünüm [19].

Çizelge 2.1 : Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları [20].

Alaşım							
1050	1060	1100	1145	1188	1190	1193	1199
	1200	1230	1235	1345			
	3003	3004	3005	3006	3105		
	5005	5010	5034	5050	5052	5056	
5083	5085	5086	5154	5182	5252	5254	5356
	5454	5456	5457	5652	5657		
		6063					
		7072					
	8010	8011	8111	8014			

2.3.2 Mikroyapı ve katılma

İkiz merdane döküm yönteminde ergimiş metal katılırken aynı zamanda da haddelenmektedir. Ergimiş metal su ile soğutulan merdanelere temas eder etmez katılmaktadır. Ergimiş metal merdanelere temas edince ısı kaybetmektedir ve bu ısı kaybı neticesinde katılma olmaktadır. Katılma ve haddeleme işlemi çok kısa süre içinde meydana gelmektedir. Şekil 2.4 merdane ve malzeme temas noktasını göstermektedir [19].



Şekil 2.11 : İkiz merdane döküm yöntemi merdane malzeme temas noktası [20].

Katılmanın çok hızlı olmasından kaynaklı birçok alaşım elementi katı çözelti içinde kalmaktadır. Bir sonraki tavlama aşamasında bu alaşımlar çökmeye başlamaktadır ve bu durum mikroyapıyı (tane yapısı ve tekstür gibi) etkileyebilmektedir. Bazı durumlarda istenmeyen kaba taneler ile bu durum sonuçlanmaktadır. Bu durum neticesinde de olumsuz etkilenecek şekillenebilme kabiliyetini arttırmak için malzemeye homojen tav uygulanmaktadır. Aşırı doymuş alaşım elementlerinin toparlanma ve yeniden kristallenmeye karşı koymaları neticesinde, ikiz merdane dökümüyle üretilmiş alüminyum levha veya folyolar dayanımını homojen tavlamadan sonra da devam ettirmektedir.

İkiz merdane döküm yönteminde çözülmeyen bazı bileşimler de form oluşturabilmektedir. Küçük tane yapısına sahip olan bu formlar segregasyon etkisi gösterip merkez hattı segregasyonunu oluşturmaktadır [18].

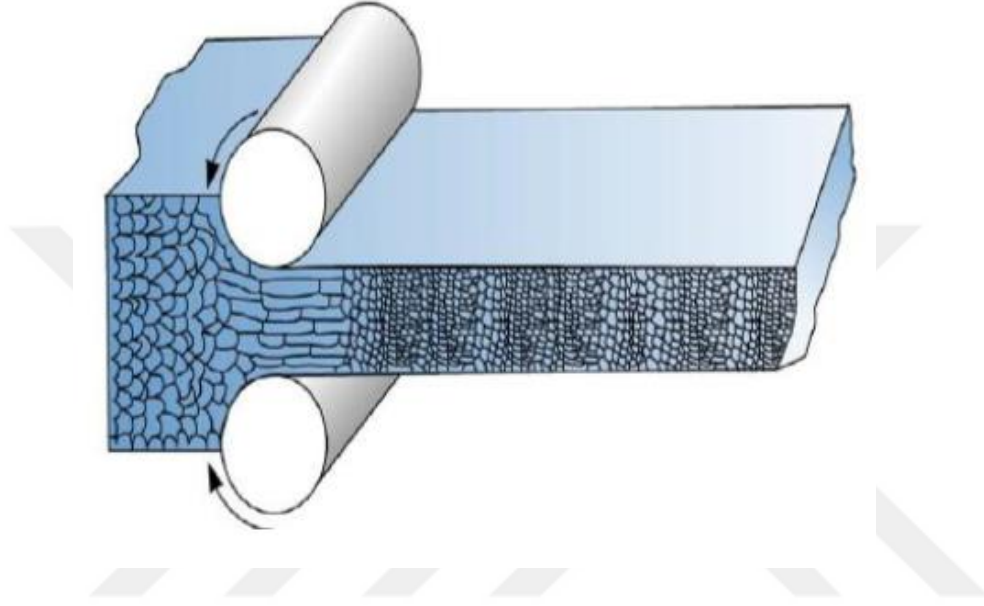
Malzeme sıcaklığı katılma esnasında, yani merdaneyle temas eder etmez 300°C'ye kadar düşmektedir. Malzeme katılmanın hemen ardından meydana gelen sıcak haddeleme operasyonunda düşük sıcaklıktan dolayı tamamen yeniden kristallenmemektedir ve bu durum kalıntı gerilmelere sebep olmaktadır [20].

2.4 Soğuk Haddeleme

2.4.1 Genel bilgi

Kendi eksenini etrafında ve birbirine ters dönen silindirik merdaneler arasında malzemelerin geçirilerek kalınlığının azaltılması olayına haddeleme işlemi denir. Eğer

işlem malzemenin yeniden kristallenme sıcaklığının üzerinde yapılıyorsa sıcak haddeleme; daha düşük sıcaklarda yapılıyorsa soğuk haddeleme işlemidir. Haddeleme işleminde kullanılan merdaneler dökme demir veya çelikten üretilmektedir. Merdanelerin yüzey sertliklerinin yüksek olması tercih edilirken, haddeleme sırasında oluşan eğmeye karşı direncinin yüksek olması için de yüksek toklukta merdaneler kullanılmaktadır. Şekil 2.11’de soğuk haddeleme işlemi gösterilmektedir [21].

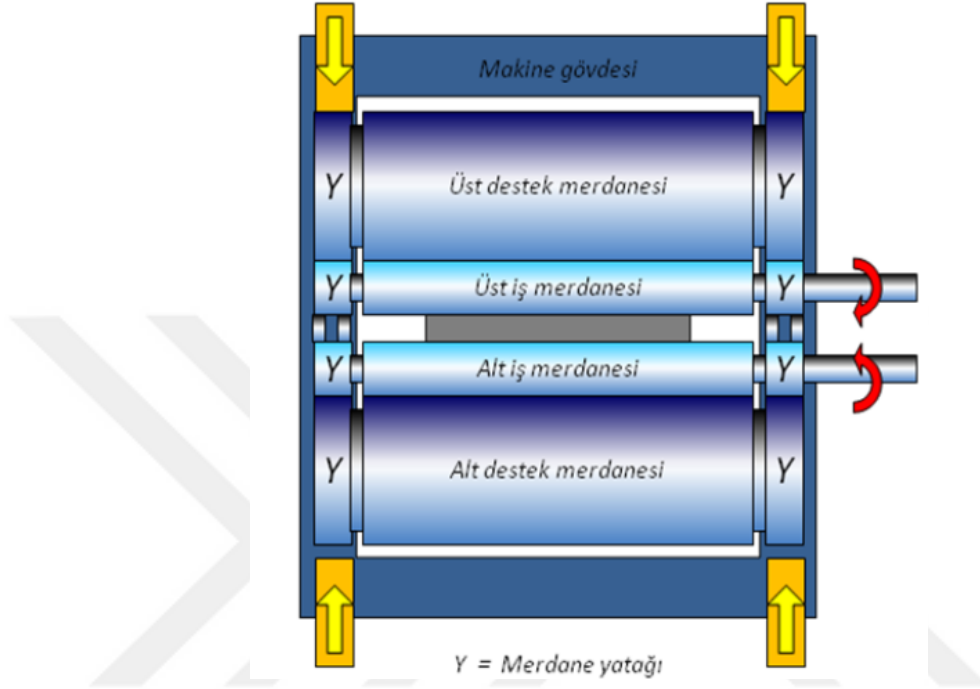


Şekil 2.12 : Soğuk haddeleme işlemi [21].

Soğuk haddeleme prosesi oda sıcaklığında ve genellikle yağlama kullanılarak gerçekleşmektedir. Bazı durumlarda soğumayı daha iyi yapabilmek için yağ-su emülsiyonu kullanılmaktadır. Bu durumda suyun malzeme yüzeyinde uzaklaştırılmasına dikkat edilmektedir. Yağlama aynı zamanda lokal soğutma için de kullanılıp, soğuk haddelenmiş malzeme şeklinin ve düzgünlüğünün kontrolünün iyi bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır [20].

Soğuk haddeleme işleminde kullanılan hadde makinelerinin temel ekipmanları, iş merdaneleri, destek merdaneleri, yataklar, makina gövdesi ve motorlardır. Hadde makinalarında 2 adet iş merdanesi bulunmaktadır. Ancak, kullanılan destek merdanesi sayıları değişiklik göstermektedir. Genel anlamda en çok tercih edilen sistem 4’lü grup olarak adlandırılan hadde makineleridir. Şekil 2.12’de 4’lü grup hadde makinası şekli gösterilmektedir. Haddeleme işlemi sırasında kalınlığın incelmelerini sağlayan 3 temel parametre bulunmaktadır. Hadde kuvveti, malzemeye uygulanan gergi ve proses hızı bu temel parametrelerdir. Malzeme üzerinde birim başına düşen kuvveti arttırmanın

en kolay yöntemlerinden biri iş merdanesinin yarı çapının azaltılmasıdır. Ancak, iş merdanesinin çapının küçültülmesi merdanenin rijitliğini de etkilemektedir. Haddelme işlemi sırasında uygulanan kuvvet iş merdanesi de etkilediği için; önemli kriterlerden biri de merdanelerinin şeklinin bozulmamasıdır. Bu nedenle, daha küçük çapta iş merdaneleri kullanabilmek adına destek merdaneleri kullanılmaktadır [21].



Şekil 2.13 : 4'lü grup soğuk haddelme makinesi şeması [21].

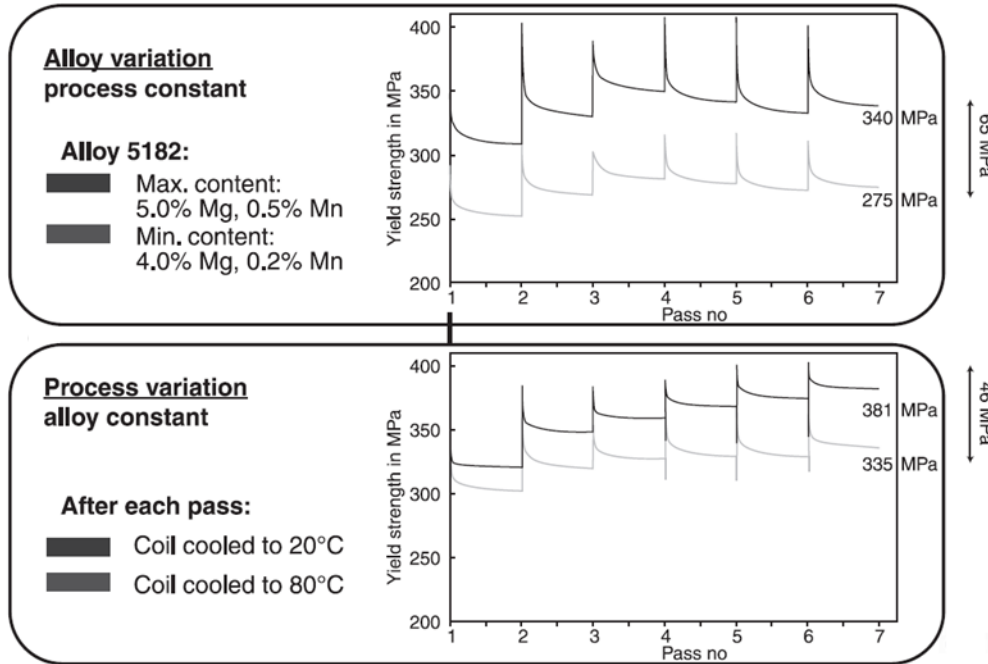
2.4.2 Mikroyapı

Soğuk haddelme proses sırasında oluşan yüksek yoğunluktaki dislokasyonlar malzemenin dayanımı arttırmaktadır. Soğuk haddelme deformasyonu tipik FCC düzlemsel deformasyon dokusu göstermektedir. Bu deformasyon neticesinde hadde yönüne doğru kararlı β yapıları oluşmaktadır. Oluşan bu yapılar dayanım, şekillenebilirlik gibi mekanik özelliklerde malzemenin anizotropik davranmasına sebep olmaktadır. Deformasyon sırasında kristal doku oluşumu belirli kayma sistemlerinin seçilmesinde dolayı tahmin edilebilmektedir. Malzemede meydana gelecek gerinim sertleşmesi ve anizotropinin yaratacağı etkileri önceden bilmek mümkündür.

Soğuk haddelme sırasında meydana gelen gerinim sertleşmesi malzemenin özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Saf alüminyumlarda sabit dislokasyon yoğunluğu, alt-tane yapıları ve yüksek şekillenebilirlik özelliklerinden kaynaklı kısıtlı

bir gerinim sertleşmesi olmaktadır. %99,5 alüminyum içeren saf alüminyumlar 6 µm kalınlığa kadar inceltilebilmektedir. Aşırı ince folyolar efektif bir şekilde soğuk haddeleme ile üretilebilmektedir. Bazı alaşım elementleri eklenerek daha yüksek oranlarda gerinim sertleşmesi elde edilmektedir. Yaşlandırılmaz 5XXX Al-Mg-Mn alaşımları bu duruma örnek gösterilebilen, soğuk haddeleme sonucunda orta dayanımdan yüksek dayanıma geçen alaşım türüdür.

Yüksek deformasyon hızlarında açığa çıkan ısı ile birlikte özellikle gerinim sertleşme oranı fazla olan ve daha ince kalınlıktaki malzemelerde haddeleme operasyonu 100°C üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklıklarda meydana gelebilecek toparlanma malzemedeki yumuşamalara sebep olmaktadır. Şekil 2.14'te entegre edilmiş simülasyon modeli ile farklı endüstriyel soğuk haddeleme koşullarında AlMg4.5Mn AA5182 alaşımında meydana gelen gerinim sertleşmesi davranışları incelenmektedir. Her soğuk haddeleme adımından sonra dayanımda artma olmakta, sıcaklığın artması da dayanımda net bir düşüşe sebep olmaktadır. Bu durum, alaşım elementlerine bağlı bir durumdur. Magnezyum gerinim sertleşmesini arttırmaktadır ve bunun neticesinde proses sıcaklığı yükselmektedir. Manganez ise toparlanmayı azaltmaktadır ve bu iki durum malzemenin dayanımını etkilemektedir. Şekil 2.6'da alaşım elementlerinin ve sıcaklığın alüminyum alaşımlardaki dayanıma olan etkisi gösterilmektedir [18,19].



Şekil 2.14 : Element alaşımlarının ve sıcaklığın dayanıma etkisi [19].

2.5 Derin Çekme

2.5.1 Genel bilgi

Derin çekme sac levha metallerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Derin çekilen malzemeler kap-kacak, basınçlı kap, konserve kutusu, mutfak teknesi gibi malzeme yapımlarında kullanılmaktadır. İşlenecek olan sac metal, kalıp boşluğuna yerleştirilerek belli bir basınç ile zımba plakası yardımıyla kalıp boşluğuna doğru itilmektedir. Bu işlem sonucunda sac metal kalıp boşluğunu almaktadır. Şekil 2.7’de derin çekme proses adımları gösterilmektedir.

İlk aşamada plaka, malzeme ile ilk temasını gerçekleştirmektedir. Hemen ardından malzeme uygulanan kuvvet ile eğilmeye başlamaktadır. Eğilme işleminin ardından üçüncü aşamada ise sac metal doğrulmaya başlamaktadır. Dördüncü aşamada ise sac metal ile plaka arasında sürtünme artarken plaka baskı uygulamaya devam etmektedir. En son adımda ise sac metal nihai şekli almaktadır. V plakanın hızını, F plaka üzerinden uygulanan kuvveti; F_h ise metal tutucuların kuvvetini göstermektedir. Sac metalin boşluğa çekilmesi sırasında metalin kalınlığı %12’ye kadar artabilmektedir. Bu nedenle plaka ve kalıplar arasında mesafe önemlidir. Radyal mesafe metalin kalınlık ve kalınlık artışına eşittir. Plaka sac metalin tabanını kalıp boşluğuna doğru itmektedir. Eğilme işlemi başladıktan sonra malzeme rahatlayıp, boşlukta kenar kısmında kalan bölümler aşağı doğru akmaktadır. Daha sonra sac metalin dikey kısmı kalıp boşluğunda kaymaktadır. Daha fazla metal, kalıp boşluğunun merkezine doğru çekilmektedir. Şekil 2.8’de bu süreç gösterilmektedir [22].

tahmin girişimleri de her zaman olmaktadır. Baskı plakası kuvvetinin maksimum etkilediği durumlar ise, sac metalde kalıp boşluğunda meydana gelen kalınlaşma ve metal tutucu duvarlarında oluşan incelmeler üzerindedir. Aynı zamanda deformasyon sertleşmesi baskı plakası kuvvetine bağlıdır [23].

2.5.2.2 Sürtünme

Sürtünme derin çekmeyi etkileyen önemli parametrelerden biridir. Derin çekilmiş malzemenin yüzey kalitesi, proses aletleri ve malzemenin derin çekilebilme kabiliyeti temas bölgesinde bulunan yağlayıcı film tabakasıyla ilişkilidir. Film tabakası arttıkça sürtünme kuvveti azalmaktadır ve malzede oluşan gerinim dağılımı da daha düzenli olmaktadır. Etketif yağlama malzemenin pürüzlülüğünün direkt temasını engellemeye yardımcı olur ve aynı zamanda da malzemenin derin çekilebilmesini geliştirmektedir. Bir metal levhanın derin çekme işlemi sırasında oluşan gerinim dağılımı da direkt sürtünmeden etkilenmektedir. Derin çekme işlemi sırasında oluşan kalınlık farkı malzemeye etkileyen sürtünmeye göre farklılık göstermektedir [23].

2.5.2.3 Malzeme şekli

Proses hatalarını azaltmak ve proses değerlerini optimum seviyeye getirmek için proses ve malzeme değişkenlerini bilmek önemlidir. Derin çekilecek malzemenin geometrisi derin çekmeyi etkileyen önemli parametrelerdendir. Malzemenin kalitesini geliştirmek, düzgün kalınlık dağılımını sağlamak, deformasyon limitlerine göre prosesi gerçekleştirmek ve oluşabilecek hataları minimize etmek için malzeme seçimi önemlidir. Malzeme şekli derin çekme kuvvetini etkilemektedir ve aynı zamanda doğru malzeme seçimi ile deformasyon oranları arttırılırken kırılma ve yırtılma engellenebilmektedir [23].

2.5.2.4 Şekillendirme limiti

Derin çekme oranı sınırı (LDR) derin çekme prosesinde elde edilen maksimum çekmedir ve flanşın kalınlığı ile sınırlanmaktadır. Flanş parçası radyal çekme yükü ile dairesel baskı yüküne bağlıdır. Dairesel baskı yükü flanş kalınlığını arttırmaktadır. İki eksenli yükleme ve kalıp yüzeyi temas bölgesinde çatlamalara sebep olabilmektedir. Baskı plakası yükü ile flanşa meydana gelen kalınlaşma kontrol edilebilmektedir.

Şekillendirme limitleri derin çekme işleminde önemli bir parametredir ve proses parametrelerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Deformasyon sertleşmesi

katsayısı LDR'yi etkilemektedir ve düzenli gerinim dağılımı ile LDR artmaktadır. Sıcaklık arttıkça derin çekme oranı sınırı da artmaktadır. Sıcaklıkla birlikte sürtünme ve kalıntı gerilmeler azalmaktadır ve bu durum neticesinde daha iyi bir ürün elde edilmektedir [23].

2.5.3 Temel hatalar

2.5.3.1 Kırışma

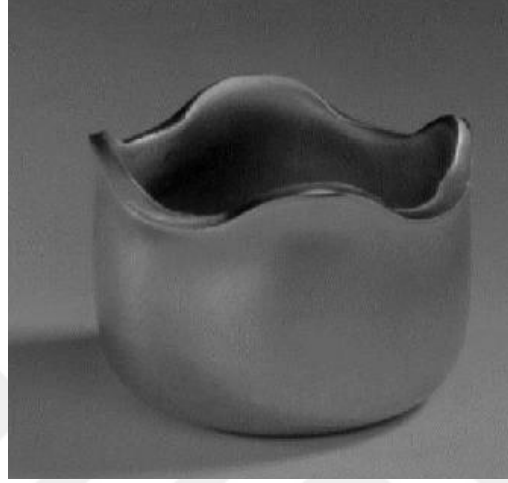
Kırışıklık derin çekilmiş ürünlerde en çok yaşanan kusurlardan bir tanesidir. Kırışıklık basma gerilimini minimize etmek için malzeme yüzeyinde oluşmaktadır. Kırışıklık, malzemenin flanş kısmında veya kalıba temas eden duvar kısımda meydana gelmektedir. Flanşa meydana gelen kırışıklıklar, tutucu kuvvetleri optimize ederek azaltılmaktadır. Ancak, malzemenin kenarlarında meydana gelen kırışıklıkların tek bir parametre ile kontrol edilmesi mümkün değildir. Malzemenin kenar bölgelerinde meydana gelen kırışıklıkları engellemek için ise bifurkasyon methodu kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre toplam kırışma enerjisi; eğme enerjisinin, burulma enerjisinin, gerilme enerjisinin ve düzlemsel gerilim tarafından yapılan işin toplamına eşittir. Yüksek kalıp tutma kuvveti her zaman kırışıklığı engellemek için etkin bir yöntemdir; ancak minimum kuvvet kullanma eğilimi de her zaman mevcuttur. Kalıp tutma kuvveti dışında; sürtünmeyi azaltmak, geniş radiuslu zimba kullanmak ve derin çekme derinliğini azaltmak da kırışmayı engellemektedir. Şekil 2.9'da derin çekme sonucunda oluşan kırışma gösterilmektedir [23].



Şekil 2.17 : Derin çekme sonucu oluşan kırışma [22].

2.5.3.2 Kulaklanma

Malzemenin anizotropik olması ve sac levha ile zımba arasında yetersiz sürtünme olması malzemede kulaklanmaya sebep olmaktadır. Sürtünme, sıcaklığa, basınca ve pürüzlülüğe bağlı olarak değişmektedir. Anizotropi özelliği malzemenin yöne bağlı olarak farklı özelliklere sahip olmasıdır. Şekil 2.10'da malzemenin derin çekme sırasında düzlemsel anizotropiden dolayı oluşan kulaklanma gösterilmektedir [24].



Şekil 2.18 : Derin çekme sonucu oluşan kulaklanma [22].

2.5.3.3 Portakal kabuğu

Malzemelerin aşırı deformasyona uğraması sonucu yüzeyde meydana gelen kabartılara portakal kabuğu denmektedir. Portakal kabuğu oluşumunun temel sebebi yüzeyde bulunan iri tanelerdir. İç kısımlardaki tanelerde var olan kısıtlamalar yüzeydeki tanelerde yoktur ve bu nedenle birbirlerinden bağımsız olarak deforme olmaktadır. Bu durum sonucunda oluşan kabartılarda portakal kabuğu hatasına sebep olmaktadır [20].

2.5.3.4 Çatlamalar

Derin çekme işlemi gören malzemelerin genellikle zımba eğrilik yarıçapının üzerinde kalan kısımda çatlama görülmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olmaması, zımba yarıçapının küçük olması, zımba ile kalıp arasında mesafenin yeterli olmaması malzemede çatlamalara sebep olabilmektedir. Malzemenin esas çatlmasına sebep olan durum malzemeyi etkileyen zımba kuvvetinin artmasıdır. Bu nedenle derin çekme sırasında oluşabilecek çatlama engellemek için zımba kuvvetini azaltmak

veya zımba kuvvetini etkileyen diğer parametreleri kontrol altına almak gerekmektedir [20].

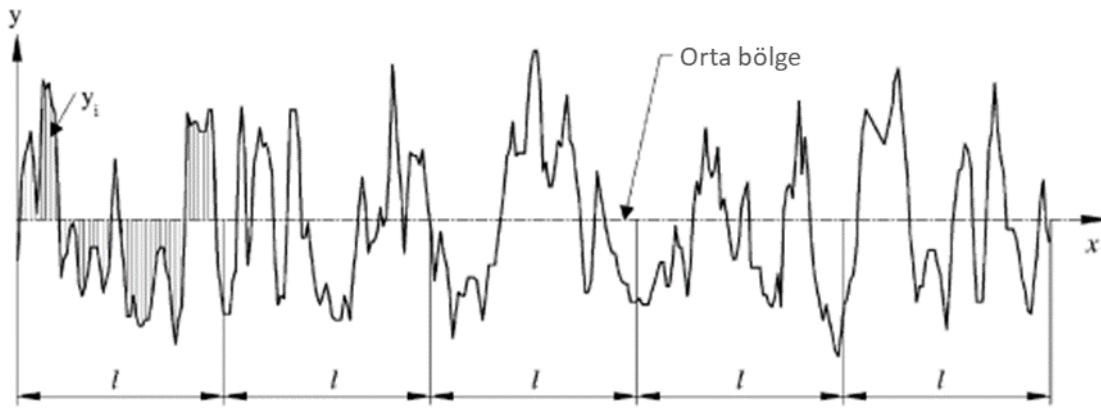
2.6 Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

2.6.1 Yüksekliklerin aritmetik ortalaması (R_a)

Profil sapmalarının aritmetik ortalaması genel kalite kontrolü için en çok kullanılan pürüzlülük parametresidir. Aynı zamanda merkez hattı ortalaması olarak adlandırılmaktadır. Yüzey pürüzlülüklerinin ortalama kesme noktalarından alınan pürüzlülük farklılıklarının ortalama dağılımıdır. Bu parametre kolay ölçülebilmekte ve malzeme yüzeyi ile ilgili genel bir görüntü çizmektedir. Matematiksel ifadesi 2.4 ve 2.5 numaralı denklemlerdeki gibidir. Şekil 2.11'de R_a pürüzlülük değerinin yüzeydeki görünümü gösterilmektedir [25].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2.4)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.5)$$



Şekil 2.19 : Yüksekliklerin aritmetik ortalaması (R_a) [25].

2.6.2 Ortalama karekökü pürüzlülüğü (R_q)

Bu parametre aynı zamanda RMS olarak da gösterilmektedir. Bu parametre yüzeyde bulunan yüksekliklerin standart sapmasını temsil etmektedir. Bu nedenle yüzey

pürüzlülüğü için önemli bir parametredir ve R_a değerine göre daha hassastır. Matematiksel ifadesi 2.6 ve 2.7 numaralı denklemlerdeki gibidir [25].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad (2.6)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2.7)$$

2.6.3 Maksimum profil yüksekliği (R_p)

Ortalama yüzeyin üzerinde kalan maksimum yüksekliklerdir. Şekil 2.12’de R_p parametreleri gösterilmektedir [25].

2.6.4 Vadilerin maksimum derinlikleri (R_v)

Ortalama yüzeyin altında kalan minimum derinliklerdir. Şekil 2.12’de R_v parametreleri gösterilmektedir [25].

2.6.5 Profil yüksekliklerin ortalaması (R_{pm})

R_{pm} pürüzlülük değeri R_p değerlerinin belirtilen numune uzunluklarındaki ortalamasıdır. Bu parametre aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır. Denklem 2.8 R_{pm} parametresinin matematiksel gösterimidir; n ölçüm yapılacak uzunluktaki maksimum R_p değerlerini göstermektedir. Şekil 2.12’de R_{pm} parametreleri gösterilmektedir [25].

$$R_{pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{pi} \quad (2.8)$$

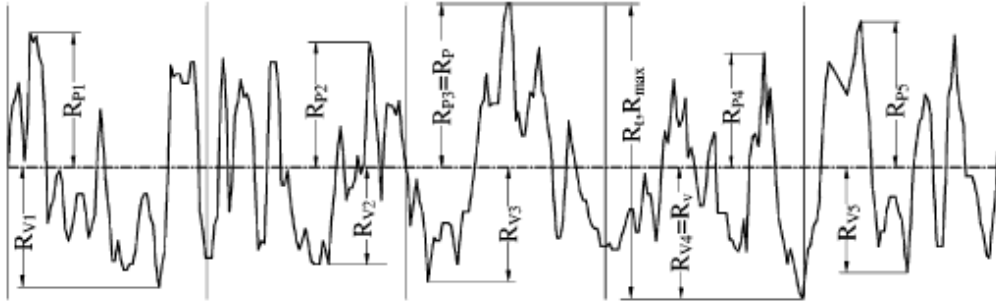
2.6.6 Ortalama profil derinlikleri (R_{vm})

R_{vm} pürüzlülük değeri R_v değerlerinin belirtilen numune uzunluklarındaki ortalamasıdır. Bu parametre aşağıda belirtilen eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır. Denklem 2.9 R_{vm} parametresinin matematiksel gösterimidir; n ölçüm yapılacak uzunluktaki maksimum R_v değerlerini göstermektedir. Şekil 2.12’de R_{vm} parametreleri gösterilmektedir [25].

$$R_{vm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{vi} \quad (2.9)$$

2.6.7 Profil maksimum yüksekliği (R_t)

R_t değeri profildeki maksimum piklere ve minimum derinliklere hassastır. R_{max} olarak da gösterilen bu parametre belirtilen değerlendirme uzunluğundaki en yüksek pik ile en alçak nokta arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 2.12’de gösterildiği üzere R_t değeri R_{p3} ve R_{v4} değerlerinin toplamına eşittir [25].



Şekil 2.20 : R_p , R_v , R_{pm} , R_{vm} , R_t parametrelerinin tanımı [25].

2.7 8XXX Serisi

Bu serinin en önemli özellikleri ısı işlem uygulanabilmesi, yüksek iletkenlik, dayanıklılık ve sertliktir. Fe, Ni ve Li gibi daha az tercih edilen alaşım elementleri kullanılarak istenilen özellikler elde edilmektedir. Fe ve Ni alaşıma dayanıklılık sağlarken elektrik iletkenliğinde de biraz düşüşe sebep olmaktadır. 8017 gibi birçok alaşım iletken malzeme olarak kullanılmaktadır. Li ilavesi ile düşük yoğunlukta ve yüksek rijitlikte alaşımlar elde edilmektedir.

AlFeMnSi AA 8006 alaşımları ısı eşanjörlerinde fin malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda yüksek şekillenebilirlik ve dayanım gerekmektedir. Al-Fe-Si üçlü sisteminin ticari olarak tercih edilen en yaygın alaşımı AA 8011 alaşımıdır ve genellikle ikiz merdane döküm yöntemi ile üretilmektedir. 8011 alaşımının en önemli karakteristik özelliklerinden biri ikiz merdane döküm yöntemi sırasında olan hızlı katılaşmanın oluşturduğu etkileri telafi edebilmesidir. Hemen hemen Fe ile aynı oranda bulunan Si ise Fe ile aşırı doymuş matrix fazını engellerken azımsanmayacak miktarda Fe çökmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle 8011 alaşımı daha ince ve yüksek hızlarda döküm için cazip hale gelmektedir [26,27].

3. KONUYA İLİŞKİN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Fujii ve arkadaşları, tekstür haddeme işlemi gören levhanın pürüzlülük değerini tahminde bulunmakta için çalışma yapmışlardır. Tekstür haddemesin amacı haddeme işlemi yapılan malzeme yüzeyine merdane pürüzlülüğünün aktarılmasıdır. Kullanılan iş merdanesi çapı 55 mm ve destek merdanesinin çapı 300 mm olarak alınmıştır. Üst iş merdanesi desenli olarak tercih edilirken alt iş merdanesi parlak olarak kullanılmıştır. 0,59 mm kalınlığında, 30mm genişliğinde ve 200 mm uzunluğunda saf titanyum levha haddelenmiştir. Ezme oranı ise %1 ile %20 arasında değişmiştir. %10 ve altı ezmelerde malzeme yüzey profili incelendiği zaman elde edilen yükseklik ile ezme oranı arasında bir orantı mevcutken; %10 üzeri ezmelerde yüksekliğin sabit kaldığı görülmüştür. Haddeme işleminin pürüzlülük transferi üzerine net bir etkisi görülmemişken, ezme oranının etkisi tespit edilmiştir [28].

Gali ve arkadaşları, alüminyum sıcak haddeme sırasında kullanılan merdaneleri PVD kaplayarak sürtünmeye bağlı aşınmayı ve merdane boşluğunda meydana gelen yapışmayı incelemiştir. TiN, TiCN, TiAlN, CrN, Cr, ve NH-DLC olmak üzere 6 farklı malzeme ile M2 çelik merdanelerin yüzeyi kaplanmıştır. Hem kendi içlerinde hem de kaplanmamış hali ile kıyaslanmalar yapılmıştır. Testler aşamasında AA1100 alaşımı kullanılmıştır. NH-DLC, Cr, CrN, TiN, TiCN and TiAlN sırasında olmak üzere kaplama sertlikleri 12,8 GPa, 15,3 GPa, 21,5 GPa, 13,9 GPa, 21,2 GPa, ve 35,0 GPa olarak raporlanmıştır. 10mm kalınlığında, 30 mm yüksekliğinde ve 95 mm genişliğindeki AA1100 malzemesi her testten önce 1 µm elmas pasta ile parlatılıp sonrasında aseton ile ultrasonik olarak temizlenmiştir. Yağlama ise hacimsel olarak %4 yağ içeren yağ-su emülsiyonu ile sağlanmıştır. İşlem birer pas olmak üzere 25°C ve 450°C'de gerçekleştirilmiştir. CrN kaplaması çok düşük sürtünme katsayısı sergilerken yine düşük miktarda alüminyum yapışma olmuştur. Ayrıca kaplamada herhangi bir hasara rastlanmamıştır. Cr kaplama en yüksek sürtünme katsayısına sahipken; alüminyum yapışmasına meyilli bir görüntü vermiştir. Ancak, bu kaplamada da herhangi bir hasara rastlanmamıştır. TiAlN kaplaması en düşük sürtünme katsayısına sahip olmasına rağmen temas bölgesinde oksit tabakası oluşmuştur. DLC

kaplaması sıcak haddeleme sırasında en yüksek sürtünme katsayısına sahipken hem sıcak hem soğuk haddeleme sırasında en düşük alüminyum transferini sağlamıştır [29].

Kijima yaptığı çalışmada merdane çapının yüzey haddeleme işlemi sırasında pürüzlülük transferine etkisini çalışmıştır. Kijima deneylerini iki adet laboratuvar haddesinde gerçekleştirmiştir. Üç farklı pürüzlülükte; 0,2 μm , 3,1 μm ve 8,0 μm R_a değerlerinde yüzeyler hazırlanmış ve yarıçapları 50mm ve 250 mm olan merdaneler kullanmıştır. Çapı büyük olan merdane ile aynı haddeleme kuvveti ile yapılan işlemlerde yüksek pürüzlülüklere sahip merdanelerle daha büyük uzamalar elde edilirken parlak yüzeyli merdane ile daha az uzama elde edilmiştir. Ancak, bu durum küçük çaplı merdane de gözlemlenmemiştir. Küçük çaplı ve büyük çaplı merdanelerin gerçekleştirdiği pürüzlülük transferi incelendiği zaman; eğer kullanılan hadde kuvveti ve pik basıncı düşük ise transfer benzerlik göstermiştir. Hadde kuvveti arttığı zaman pik basıncı çok az da artsa yüksek pürüzlülükteki iş merdanesi ile gerçekleştirilen transfer de artmıştır. Bu durumun temel nedeni ise küçük çaplı merdane ile temas yüzeyinin ve hidrostatik basıncın küçük olması olarak gösterilmiştir [30].

Lenard yaptığı araştırmada haddeleme işleminde kullanılan iş merdanelerinin haddeleme kuvveti ve torku üzerindeki etkisini incelemiştir. 1,6 mm kalınlığında, 25 mm genişliğinde, 300mm uzunluğundaki 6061-T6 alüminyum alaşımı farklı hızlarda ve farklı ezme oranlarında soğuk haddelenmiştir. Merdane pürüzlülük değerleri 0,3 – 2,4 μm arasında değişmiştir. Sürtünme katsayısı Hill's formülüne göre hesaplanmış ve sürtünme faktörü üst sınır yaklaşımına göre belirlenmiştir. Kullanılan iş merdaneleri L3 takım çeliğinden üretilmiştir ve yüzey sertliği 90 Shore olarak ölçülmüştür. Yapılan haddeleme sonuçlarında, mat iş merdaneleri ile daha yüksek hızlarda daha fazla hadde kuvveti kullanılarak haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, parlak merdanelerde hem yüksek hem düşük ezmelerde hız ve hadde kuvvetinde önemli değişiklikler görülmemiştir. Haddeleme hızının artması ile birlikte parlak merdanelerde sürtünme katsayısının azaldığı görülürken; mat merdane de ise tam tersi durum gözlenmiştir [31].

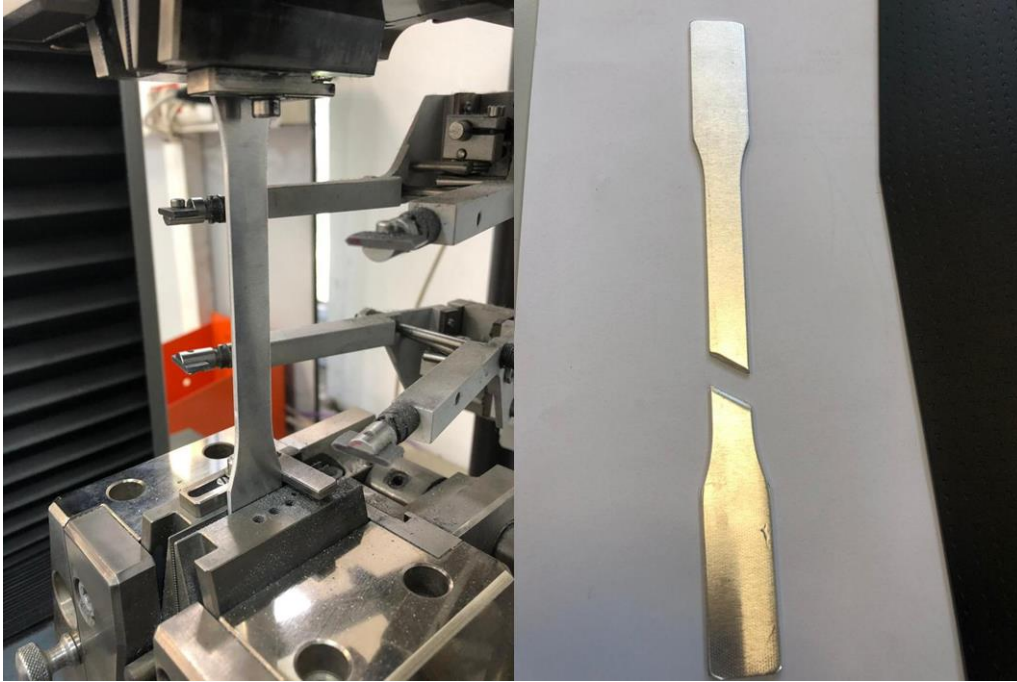
Gali ve arkadaşları yaptığı çalışmada haddeleme-tribo-simülatörü kullanarak merdane pürüzlülüğünün sıcak haddeleme sırasında yüzey değişimine olan etkisini incelemiştir. AISI 52100 çeliğinden üretilmiş iş merdaneleri ile testler gerçekleştirilmiştir. 0,1 μm ve 1,1 μm R_a pürüzlülüğüne sahip iş merdaneleri ile haddeleme işlemleri yapılmıştır. %4,5 Mg içeren 30 mm kalınlığında, 10 mm genişliğinde ve 95 mm uzunluğunda Al-

Mg alaşımı kullanılmıştır. Sıcak haddeleme prosesi 550°C ile başladı; her adımda 10°C azalarak onuncu adımda 460°C ile tamamlanmıştır. Haddeleme sonrasında malzeme yzeyinde beliren izler ve şingıllar 1,1 µm Ra ile haddelenen numunelerde görülmüştür. Haddeleme sırasında kullanılacak olan iş merdanelerin pürüzlülüğünün kritik değeri olarak şingil başlangıcına sebep olan pürüzlülük değeri verilmiştir. Mat merdane ile haddelenen numune yzeyinde daha kalın bir oksit tabakası gözlemlenmiştir. Parlak merdane ile haddelenen numune yzeyinde var olan çatlakların mat merdane ile haddelenen numunedeki çatlaklar kadar derin olmadığı tespit edilmiştir [32].





Assan Alüminyum Dilovası fabrikasında ikiz merdane döküm yöntemi ile üretilen 8156 alaşımlı levhalardan iki bobine ait numune alınmıştır. Bu bobinlere ait her soğuk haddeleme işleminden sonra da numune alınarak, her bir numune için çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri Assan Alüminyum Tuzla Tesisi'nde bulunan Zwick Roell Z050 cihazında yapılmıştır. Malzemelerin kalınlık ölçümleri Mitutoyo 156-101-10 marka mikrometre ile yapılmıştır. Çizelge 4.1 ve 4.2'de 8156 alaşımlı, iki adet ikiz merdane döküm yöntemiyle üretilip, 330 µm kalınlığa indirilen levhaların çekme test sonuçları verilmiştir. 2,192 mm kalınlığındaki malzemenin çekme testi sırasında ve kopma sonrası görüntüsü Şekil 4.2'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan 8156 alaşımlı 330 µm kalınlığındaki levhalar da birebir aynı proses ile ilerlemiştir. Bu nedenle, aynı işlemleri görmüş iki adet bobin döküm anından son prosese kadar takip edilmiş ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda restgele alınan iki bobin benzer özellikler göstermiştir. 8156 alaşımı Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait ticari bir alaşım olduğu için kimyasal bileşimi verilmemiştir.



Şekil 4.2 : 2,192 mm kalınlığındaki 8156 alüminyum levha çekme testi görüntüsü.

Folyo haddeleme sırasında kullanılan iş merdanelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri Assan Alüminyum Dilovası Fabrikası'nda bulunan Mahr MarSurf M 300 cihazı ile yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : İkiz merdane döküm yöntemi ile dökülen 8156 alaşımlarının prosesler sonrası mekanik özellikleri.

Test Yönü	Kalınlık (mm)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
0°	8,385	113	167	14,9
45°	8,385	110	164	15,3
90°	8,385	107	161	14,2
0°	4,193	178	190	7,9
45°	4,193	173	188	8,3
90°	4,193	176	188	7,6
0°	2,192	199	216	5,5
45°	2,192	188	212	5,8
90°	2,192	196	222	5,7
0°	1,148	201	232	4,7
45°	1,148	195	227	4,8
90°	1,148	197	226	4,7
0°	0,608	220	254	3,7
45°	0,608	212	249	3,8
90°	0,608	214	250	3,5
0°	0,333	225	260	2,6
45°	0,333	210	254	3,7
90°	0,333	198	258	3,6

Çizelge 4.2 : İkiz merdane döküm yöntemi ile dökülen 8156 alaşımlarının prosesler sonrası mekanik özellikleri – 2.

Test Yönü	Kalınlık (mm)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
0°	8,370	108	167	15,5
45°	8,370	107	163	15,4
90°	8,370	105	160	14,4
0°	4,217	175	189	8,0
45°	4,217	173	188	8,4
90°	4,217	173	191	7,7
0°	2,156	196	219	5,5
45°	2,156	187	216	5,8
90°	2,156	196	222	5,6
0°	1,154	204	236	4,3
45°	1,154	197	232	4,6
90°	1,154	197	223	4,7
0°	0,610	212	254	3,6
45°	0,610	209	250	3,6
90°	0,610	199	253	3,8
0°	0,332	226	266	2,9
45°	0,332	197	261	3,4
90°	0,332	213	265	3,6

330 µm herhangi folyo haddelenme işlemi görmemiş malzemeler ile folyo haddelenme makinalarında işlem gören 210 µm ve 105 µm kalınlığa indirilen malzemelerin yüzey pürüzlülükleri Assan Alüminyum Dilovası Fabrikası Ar-Ge departmanında Bruker pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

Erichsen Testi Assan Alüminyum Dilovası Fabrikası Ar-Ge departmanında bulunan Zwick Roell BUP200 cihazında yapılmıştır.

Çekme testleri için Assan Alüminyum Fabrikası'nda bulunan Zwick Roell Z010 cihazı kullanılmıştır.

Numunelerin mikroyapı görüntülerini almak için Assan Alüminyum Fabrikası'nda bulunan Zeiss Axiocam MRc5 mikroskobu kullanılmıştır. İnceleme işlemlerinde Axio Vision programı kullanılmıştır.

Numunelerin haddelenmesi için Assan Alüminyum Dilovası Fabrikası'nda bulunan ve Şekil 4.3'te gösterilen Achenbach marka Four-High-Mill folyo hadde makinası kullanılmıştır.

4.2 Deneilerin Yapılışı ve Süreç Tasarımı

330 µm kalınlığındaki malzemeler farklı pürüzlülükteki merdaneler ile haddelenerek 210 µm indirilmiştir. 210 µm kalınlığına indirilen malzemeler de farklı pürüzlülükteki merdaneler ile haddelenerek 105 µm indirilmiştir. Hem ilk hem de ikinci haddelenme aşamasında oluşabilecek farklılıklar gözlemlenmek istenmiştir. Şekil 4.2'de deneysel proses tasarımı gösterilmiştir.

Proses 1'de başlangıç malzemesi olan 330 µm kalınlığındaki levha soğuk haddelenerek, %36 ezme ile 210 µm kalınlığa indirilmiştir. Bu işlem sırasında 0,30-0,35 R_a pürüzlülüğe sahip iş merdaneleri kullanılmıştır. Bu procesteki ikinci işlemde ise 210 µm kalınlığındaki levhaya %50 ezme uygulanarak 105 µm kalınlığa indirilmiştir. Bu soğuk haddelenme işleminde kullanılan merdane pürüzlülük değeri 0,14-0,14 R_a'dır.



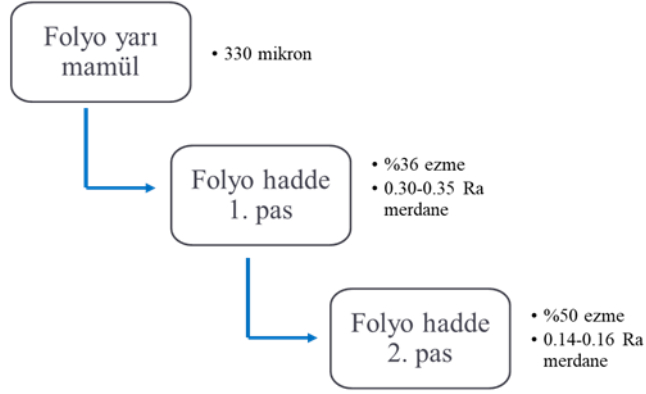
Şekil 4.3 : Achenbach Four-High-Mill folyo hadde makinası.

Proses 2’de başlangıç malzemesi olan 330 μm kalınlığındaki levha soğuk haddelenerek, %36 ezme ile 210 μm kalınlığa indirilmiştir. Bu işlem sırasında 0,30-0,35 R_a pürüzlülüğe sahip iş merdaneleri kullanılmıştır. Bu prodesteki ikinci işlemde ise 210 μm kalınlığındaki levhaya %50 ezme uygulanarak 105 μm kalınlığa indirilmiştir. Bu soğuk haddeleme işleminde kullanılan merdane pürüzlülük değeri 0,20-0,25 R_a ’dır.

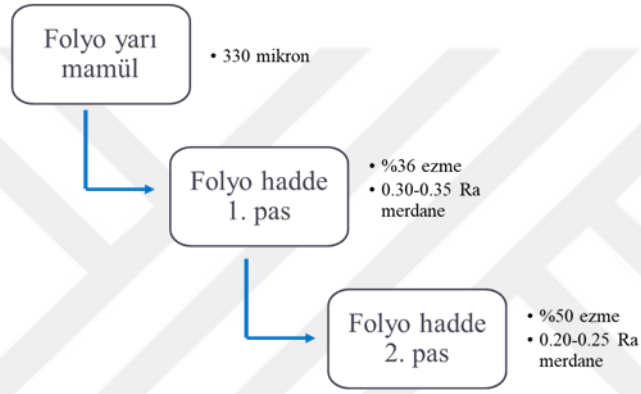
Proses 3’te başlangıç malzemesi olan 330 μm kalınlığındaki levha soğuk haddelenerek, %36 ezme ile 210 μm kalınlığa indirilmiştir. Bu işlem sırasında 0,50-0,55 R_a pürüzlülüğe sahip iş merdaneleri kullanılmıştır. Bu prodesteki ikinci işlemde ise 210 μm kalınlığındaki levhaya %50 ezme uygulanarak 105 μm kalınlığa indirilmiştir. Bu soğuk haddeleme işleminde kullanılan merdane pürüzlülük değeri 0,20-0,25 R_a ’dır.

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan 330 μm kalınlıktaki malzemelere yüzey pürüzlülük ölçümü ve çekme testi yapılmıştır. Çizelge 4.3’te malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Levhaların pürüzlülük değerleri incelendiği zaman, sonraki proseslerde folyoların özelliklerini etkileyebilecek fark görülmemiştir. Çizelge 4.4’te ise çekme testi sonuçları verilmiştir. Çekme test sonuçlarında da sonraki proses sonuçlarını etkileyecek farklılıklar tespit edilmemiştir.

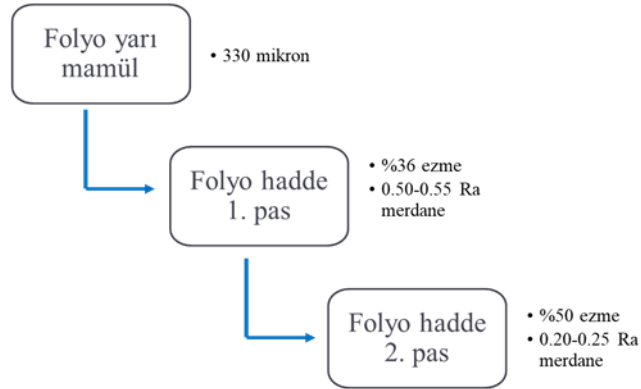
Proses 1



Proses 2



Proses 3



Şekil 4.4 : Proses tasarımı.

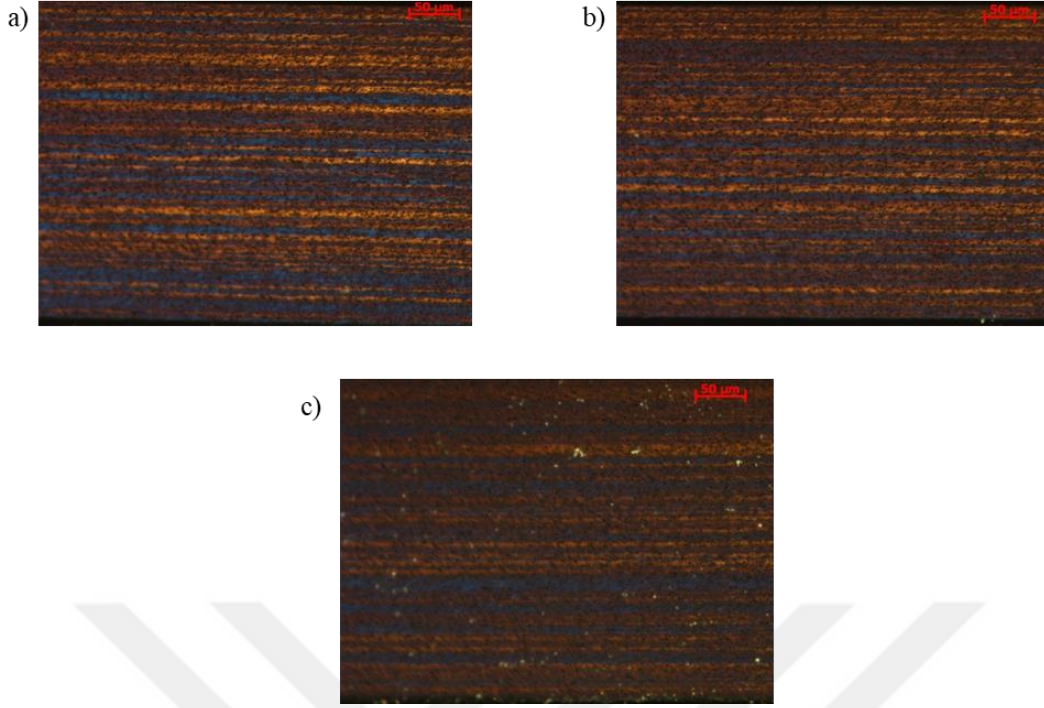
Çizelge 4.3 : Başlangıç malzemelerinin yüzey pürüzlülük sonuçları.

Malzeme Kalınlığı (µm)	Proses No	Alt Yüzey (R _a)			Üst Yüzey (R _a)		
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
330 – 1	Proses 1	0.466	0.480	0.444	0.465	0.466	0.447
330 - 2	Proses 2	0.454	0.420	0.425	0.438	0.424	0.446
330 - 3	Proses 3	0,438	0,452	0,429	0,462	0,458	0,444

Çizelge 4.4: Başlangıç malzemesi çekme testi sonuçları.

Malzeme Kalınlığı (µm)	Proses No	Akma Muk (Mpa)	Çekme Muk (Mpa)	Uzama (%)
330 - 1	Proses 1	134	172	1,9
330 - 2	Proses 2	133	167	1,6
330 - 3	Proses 3	135	170	1,9

330 µm kalınlığında olan folyo haddeleme işlemi görmemiş 8156 alaşımlı başlangıç malzemelerine ait numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Numuneler öncelikle 0,2M HF içeren çözelti içerisinde 30 sn bekletildikten sonra saf su ile ve sonrasında etanol ile temizlenmiştir. Temizleme işlemlerinin ardında kuru hava tutularak numuneler arındırılmıştır. Şekil 4.4'te 0,33mm kalınlığındaki numunelere ait 50X büyütmedeki mikroyapılar gösterilmiştir. Mikroyapı görüntüleri de incelendiği zaman hem pürüzlülük hem de çekme testi sonuçları gibi bir sonraki proses sonuçlarında sapmalar yaratabilecek farklılıklar görülmemiştir.



Şekil 4.5 : (a) Proses 1 başlangıç malzemesi mikroyapısı (b) proses 2 başlangıç malzemesi mikroyapısı (c) Proses 3 başlangıç malzemesi mikroyapısı

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

Öncelikle folyo haddeleme işleminde kullanılan iş merdanelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler EN ISO 4287 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Yüzey ölçümleri kenar-orta-kenar olmak üzere 3 noktadan ve haddeleme yönünde yapılmıştır. Her haddeleme işleminde aynı çift iş merdanesi kullanılmıştır. İş merdaneleri %0,8C ve %0,2Fe içeren yüzey sertliği 100-101 Shore °C olan çelik merdanelerdir. Çizelge 5.1’de iş merdanelerinin R_a değerleri mevcuttur.

Çizelge 5.1 : Folyo haddeleme sırasında kullanılan iş merdane R_a değerleri.

Proses	Kenar Bölge R_a	Orta Bölge R_a	Kenar Bölge R_a
Proses – 1 1. pas	0,32	0,34	0,33
Proses – 2 1. pas	0,33	0,33	0,34
Proses – 3 1. pas	0,58	0,56	0,59
Proses – 1 2. pas	0,22	0,22	0,23
Proses – 2 2. pas	0,14	0,14	0,16
Proses – 3 2. pas	0,23	0,24	0,24

Haddeleme işlemleri sonucunda elde edilen malzemelerin ve herhangi işlem görmemiş malzemelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri 3 kere yapılmıştır. Çizelge 5.2’de 8156 alüminyum levha ve folyoların R_a değerleri gösterilmiştir. Folyo haddeleme tezgahlarında işlem görmemiş, sürekli döküm yöntemi ile dökülüp soğuk haddeleme işlemlerinden geçip 330 μm kalınlığa indirilen malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri benzerlik göstermiştir. Malzemeler, daha önceden de bahsedildiği gibi farklı pürüzlülükte iş merdaneleri kullanılarak folyo hadde makinasında haddelenmiştir. İlk folyo haddeleme işleminden sonra malzeme pürüzlülükleri merdane pürüzlülüklerinin daha altında kalmıştır. Malzemelerin ilk başlangıç pürüzlülükleri ile kıyaslandığı zaman, pürüzlülük değerlerinde farklılıklar meydana gelmiştir. İlk değerlere kıyasla düşüş gözlemlense de; daha mat merdane ile haddelenen malzemedeki düşüşün daha az olduğu tespit edilmiştir. İkinci folyo haddeleme işleminden sonra ise malzeme ve

merdane pürüzlülükleri arasında benzerlik olduğu görülmüştür. Parlak merdaneler alüminyum folyo yüzeyini daha çok etkilemiştir.

Çizelge 5.2 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük sonuçları.

Malzeme Kalınlığı ve Proses	Kullanılan Merdane (R_a)	Alt Yüzey (R_a)			Üst Yüzey (R_a)		
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
330 – Proses 1	işlem görmedi	0.466	0.480	0.444	0.465	0.466	0.447
330 – Proses 2	işlem görmedi	0.454	0.420	0.425	0.438	0.424	0.446
330 – Proses 3	işlem görmedi	0,438	0,452	0,429	0,462	0,458	0,444
210 – Proses 1	0,30-0,35	0.233	0.225	0.228	0.221	0.213	0.217
210 – Proses 2	0,30-0,35	0.238	0.242	0.246	0.268	0.268	0.247
210 – Proses 3	0,55,0,60	0,402	0,411	0,409	0,414	0,402	0,400
105 – Proses 1	0,20,0,25	0.196	0.212	0.204	0.196	0.195	0.201
105 – Proses 2	0,14-0,16	0.141	0.142	0.141	0.151	0.139	0.136
105 – Proses 3	0,20-0,25	0,264	0,254	0,247	0,236	0,241	0,249

5.2 Erichsen Test Sonuçları

Erichsen testi malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetindeki farklılıkları görebilmek adına yapılmıştır. Ölçümler EN ISO 20482 standardına uygun olarak yapılmıştır. Herhangi işlem görmemiş 330 μm kalınlığındaki işlem görmemiş levhalara ve folyo haddeleme işlemi gördükten sonra 210 μm ve 105 μm kalınlığa indirilen 8156 alaşımlı alüminyum folyolara test uygulanmıştır. Her bir numune için test 2 kere yapılmıştır. Çizelge 5.3'te test sonuçları verilmiştir. Herhangi folyo hadde tezgahlarında işlem görmemiş 330 μm kalınlığındaki numuneler incelendiği zaman maksimum kuvvet değerleri ve maksimum uzama değerleri birbirlerine benzerlik göstermektedir. İlk folyo haddeleme işleminden sonra aynı pürüzlülükteki iş merdaneleri ile haddelenen malzemelerin maksimum kuvvet ve maksimum uzama değerleri birbiri ile benzerlik gösterirken; daha mat (0,55 - 0,60 R_a) iş merdaneleri ile üretilen Proses 3'e ait 210 μm kalınlığındaki numunenin uzama değeri diğer numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İkinci folyo haddeleme işlemi bittikten sonra maksimum kuvvet değerlerinde, diğer numunelerde olduğu gibi benzerlik olsa da maksimum uzamalar

arasında farklar görülmüştür. En parlak merdane (0,14 - 0,16 R_a) ile haddelenen Proses 1'e ait 105 μm numunesi, diğer proseslere ait aynı kalınlıktaki numunelerden folyo haddeleme işlemi sonrası daha iyi bir uzama göstermiştir.

Çizelge 5.3 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeleme işlemi sonrası Erichsen Test sonuçları.

Malzeme Kalınlığı ve Proses	Kullanılan Merdane (R_a)	Kuvvet (KN)- 1	Uzama (%) -1	Kuvvet (N)- 2	Uzama (%) -2
330 – Proses 1	işlem görmedi	1452	3.820	1439	3.885
330 – Proses 2	işlem görmedi	1596	3.845	1612	3.945
330 – Proses 3	işlem görmedi	1522	3,920	1580	3,920
210 – Proses 1	0,30-0,35	1410	5.565	1424	5.645
210 – Proses 2	0,30-0,35	1458	5.430	1433	5.345
210 – Proses 3	0,55-0,60	1289	4,415	1315	4,430
105 – Proses 1	0,20,0,25	892	3.785	903	3.665
105 – Proses 2	0,14-0,16	955	4.395	936	4.300
105 – Proses 3	0,20-0,25	845	3,325	861	3,470

Malzeme pürüzlülük değerleri ile Erichsen değerleri kıyaslandığı zaman pürüzlülük değeri daha düşük olan malzemelerin aynı kalınlıktaki malzemelere nazaran daha iyi uzama verdiği görülmektedir.

Sonuç olarak Erichsen test sonuçları değerlendirildiğinde, aynı deformasyon oranları ile yapılan haddeleme işlemleri sonucunda malzemeler farklı sonuçlar vermiştir. Haddeleme işlemi sırasında kullanılan merdaneler malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetine etki etmektedir. Pürüzlülük (R_a) değeri daha düşük olan iş merdaneleri ile haddelenen malzemeler haddeleme işlemi sonunda daha fazla uzama göstermektedirler.

5.3 Çekme Testi Sonuçları

Alüminyum 8156 başlangıç ve haddeleme işleminden sonra elde edilen folyoların ve levhaların mekanik özelliklerini tespit etmek için çekme testi yapılmıştır. Ölçümler EN ISO 6892 standardına uygun yapılmıştır. Testler haddeleme yönünde gerçekleştirilmiştir ve 10mm/dk uzama sağlayacak şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.4'te test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Başlangıç malzemesi ve folyo haddeme işlemi sonrası çekme testi sonuçları.

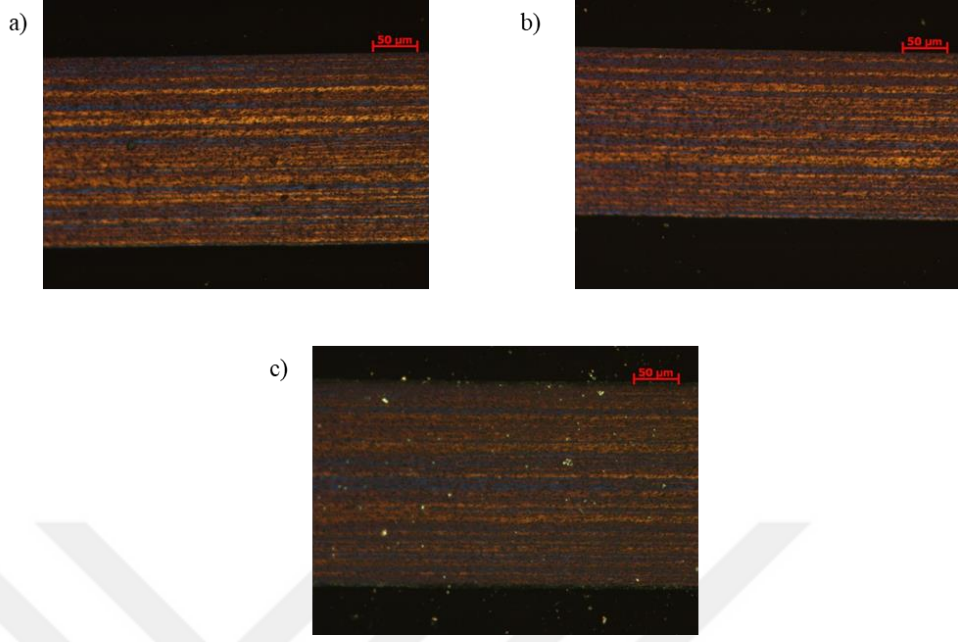
Malzeme Kalınlığı ve Proses	Kullanılan Merdane (R _a)	Akma Muk (Mpa)	Çekme Muk (Mpa)	Uzama (%)
330 – Proses 1	işlem görmedi	134	172	1,9
330 – Proses 2	işlem görmedi	133	167	1,6
330 – Proses 3	işlem görmedi	135	170	1,9
210 – Proses 1	0,30-0,35	161	230	2,1
210 – Proses 2	0,30-0,35	169	242	2
210 – Proses 3	0,55-0,60	165	235	1,8
105 – Proses 1	0,20,0,25	197	274	2,3
105 – Proses 2	0,14-0,16	202	279	1,9
105 – Proses 3	0,20-0,25	195	269	2

Çekme testi sonuçlarına göre herhangi işlem görmemiş 330 µm kalınlığındaki malzemelerin akma ve çekme mukavetleri benzerlik göstermiştir. Malzemelerin folyo hadde makinalarında farklı pürüzlülükte iş merdaneleri ile aynı deformasyon oranı ile haddelenmesinden sonra yapılan çekme ölçümlerinde malzemelerin özellikleri arasında anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Tüm proseslerdeki deformasyon sertleşmesi benzerlik göstermiştir.

5.4 Mikroyapı Analiz Sonuçları

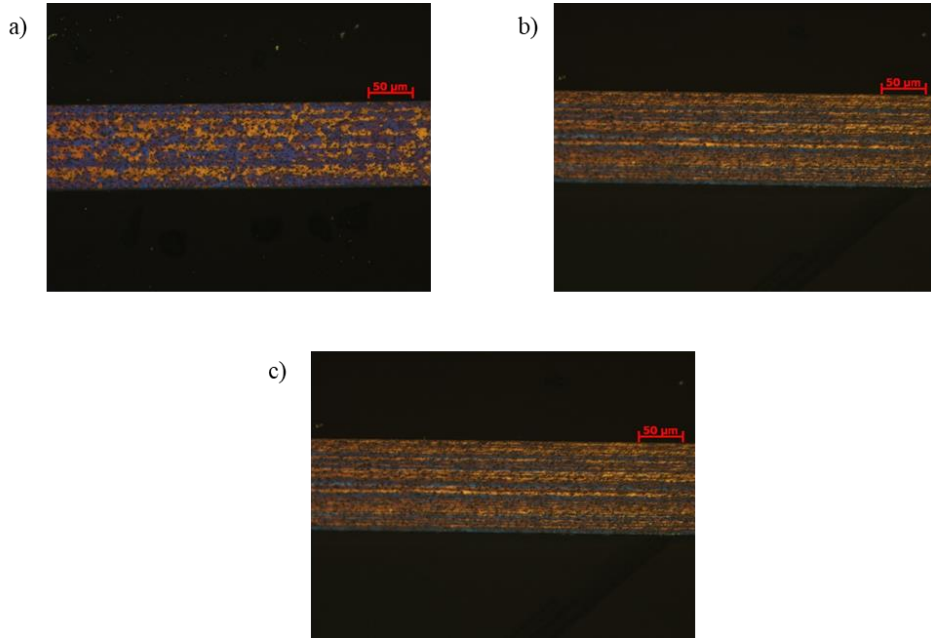
210 µm kalınlığında ilk haddeme işlemini görmüş ve 105 µm kalınlığında ikinci folyo haddeme işlemini görmüş numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Numuneler öncelikle 0,2M HF içeren çözelti içerisinde 30 sn bekletildikten sonra saf su ile ve sonrasında etanol ile temizlenmiştir. Temizleme işlemlerinin ardında kuru hava tutularak numuneler arındırılmıştır. Şekil 5.1’de 210 µm kalınlığındaki numunelere ait 50X büyütmedeki mikroyapılar gösterilmiştir.

Herhangi folyo haddeme işlemi görmemiş malzemelerin tane yönlenmeleri ve yoğunlukları irdelendiği zaman herhangi farklılık görülmemiştir. Malzemeler ilk folyo haddeme işleminden sonra; yani 0,21 mm kalınlığa indirildiğinde daha yüksek pürüzlülüğe sahip iş merdanesi ile haddelenen malzemenin tane yönlenme gruplaşmalarının daha sık olduğu görülmektedir. İkinci folyo haddeme işleminden sonra ise yine ilk haddeme işlemine benzer görüntüler elde edilmiştir. Aynı seriye ait malzeme incelendiği zaman yönlenmelerin daha sık farklılaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1 : 210 µm 8156 alaşımlı folyo numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapısı
(a) Proses 1'e ait mikroyapı görüntüsü (b) Proses 2'ye ait mikroyapı görüntüsü (c)
Proses 3'e ait mikroyapı görüntüsü.

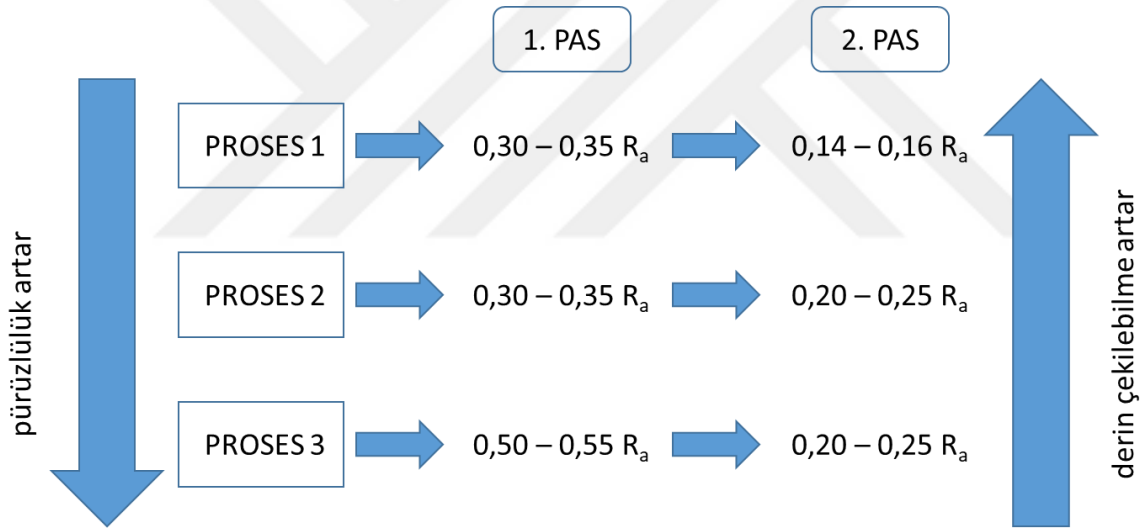
Şekil 5.2'de 105 µm kalınlığındaki numunelere ait 50X büyütmedeki mikroyapılar gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : 105 µm 8156 alaşımlı folyo numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapısı
(a) Proses 1'e ait mikroyapı görüntüsü (b) Proses 2'ye ait mikroyapı görüntüsü (c)
Proses 3'e ait mikroyapı görüntüsü.

Daha önceki sonuçlar göz önünde bulundurulduğu zaman; nihai ürünlerdeki tane yönelmelerinin daha dar aralıklarla değiştiği malzemelerin Erichsen testi sonuçlarında daha az uzamalar elde edilmiştir.

Şekil 5.3'te proseslerin özet görüntüsü ve karşılaştırmaları verilmiştir. Genel olarak prosteki etkin parametre olan iş merdane pürüzlülüğünün etkisi irdelendiği zaman, iş merdaneleri pürüzlülük değerlerindeki yükselme, soğuk haddelenmiş malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetinde ters etki yaptığı görülmüştür. Aynı zamanda iş merdane pürüzlülüğü, soğuk haddelenen malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü de etkilemiştir. İş merdane pürüzlülükler ile yüzey pürüzlülükleri arasında doğrudan ilişki tespit edilmiştir. Derin çekme sırasında, malzeme yüzeyinin daha pürüzlü olması sürtünmeyi etkin parametre haline getireceği tahmin edilmektedir. Bu nedenle, iş merdane pürüzlülüğünden etkilenen malzeme yüzey pürüzlülükleri, malzemenin derin çekilebilme kabiliyetini etkilemiştir.



Şekil 5.3 : Proseslerin genel görünümü ve özellikleri.

6. GENEL SONUÇLAR

Folyo haddelene işleme sırasında kullanılan iş merdanelerinin pürüzlülüğünün, haddelenen malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetleri üzerindeki etkisini görebilmek için üç farklı proses belirlenmiştir. Nihai kalınlık olarak 105 µm gelen malzemelerde inceleme yapılmıştır. Herhangi folyo hadde makinasında işlem görmemiş malzemeler, 330 µm kalınlığında iki kere üst üste soğuk haddelenerek 105 µm indirilmiştir. Her iki folyo haddelene işlemindeki farkı görebilmek için; ilk işlemden 2 benzer 1 farklı pürüzlülükte; ikinci işlemden de 2 benzer 1 farklı pürüzlülükte iş merdaneleri kullanılmıştır.

Öncelikle 330 µm kalınlığındaki malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Yapılan pürüzlülük ölçümü, Erichsen testi, çekme testi ve mikroyapı görüntüleri incelendiği zaman malzemeler arasında farklılıklar olmadığı tespit edilmiştir. Haddelene işleminde sonra oluşabilecek farklılıkları yorumlamak adına malzemeler arasında farklılık olmaması önem taşımaktadır.

Haddelene işlemleri sırasında eşit hadde kuvvetleri kullanılmıştır. Her iki haddelene sırasında da kaba olan merdaneler ile daha yüksek hızlarda haddelene işleme yapıldığı görülmüştür.

Yapılan pürüzlülük testi sonuçları incelendiği zaman merdane pürüzlülükleri ile malzeme pürüzlülükleri arasında benzerlik olduğu tespit edilmiştir. Ancak, ilk haddelene işleminde sonraki benzerlik ikinci haddelene işleme göre daha düşük kalmaktadır. Bu durumla ilgili olarak, kaba merdaneler ile yapılan işlemler sonucunda malzemeler merdanelere göre daha parlak bir görüntü sergilemekte; parlak merdane ile yapılan işlemler sonrasında ise birbirlerine çok yakın bir görüntü vermektedirler. Daha kalın malzemeler yüzey pürüzlülüklerine karşı direnç gösterirken; ince malzemelerde bu durum gözlenmemiştir.

Erichsen testi sonuçları incelendiği zaman kaba merdaneler malzemenin uzamasını olumsuz olarak etkilemektedir. İlk haddelene işleminde sonra benzer pürüzlülüğe sahip iş merdaneleri ile inceltelen malzemeler test sonuçlarında benzerlik gösterirken;

kaba merdane ile çalışılan malzeme daha az uzama vermiştir. İkinci haddeleme işleminden sonra yine parlak merdane ile çalışılan malzemenin daha iyi uzama verdiği görülmüştür. İkinci işlem sırasında aynı pürüzlülükte iş merdanesi ile haddelenen malzemelerde de farklılık görülmüştür. Bu durum ilk işlem sırasında kullanılan merdanelerin etkisinin ikinci haddeleme işleminden sonra da devam ettiğini göstermiştir.

Çekme testi sonuçları incelendiği zaman her iki haddeleme işleminden sonra da farklılık görülmemiştir.

Mikroyapılarda oluşan tane yönlenmeleri incelendiği zaman yüksek R_a ile haddelenen malzemelerin yönlenme gruplaşma sıklığının arttığı görülmüştür. Bu durum ikinci işlemde de benzer etkiyi göstermiştir. Yönlenmelerin daha yoğun şekilde değiştiği malzemeler Erichsen testi sonuçlarına göre daha az uzama vermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Dutta, G., Apujani, P. ve Gupta, N. (2016). An Introduction to the Aluminum Industry and Survey of OR Applications in an Integrated Aluminum Plant. *Indian Institute of Management*, 3-12.
- [2] Eroğlu, G. ve Şahiner, M. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum, *Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü*, 5-16.
- [3] Kubaş, A. ve Saral, M. (2017). Alüminyum Sektör Analizi. *Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi*, 83-85.
- [4] HYDRO. (2012). Aluminum Environment and Society, Norveç.
- [5] Oğuz, B. (1990). *Demir Dışı Metallerin Kaynağı*. Oerlikon Yayını.
- [6] Addemir, O. Demir Dışı Metaller Üretimi Ders Notları.
- [7] Arslan, S. (2016). *Kırmızı Çamurun Susuzlandırma Performansının Arttırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] <https://spslt.ru/obzhigovoe-oborudovanie>
- [9] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası. *Alüminyum Raporu*. Alüminyum Komisyonu, 1-9.
- [10] Güner, A.T. (2013). *Yarı-Katı Halde Şekil Verilmiş Alüminyum Alaşımalarının Mekanik Özelliklerine Su Verme Sıcaklığının Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] Aleris. Aluminium Casting Alloys, İsviçre.
- [12] European Aluminum Association.
- [13] Polmear, I., Stjohn, D., Nie, J.F. ve Qian M. (2017), *Metallurgy of the Light Metals, LightAlloys* (Fifth Ed.), 157-263. doi:10.1016/B978-0-08-099431-4.00004-X
- [14] Kaufmann. ve J.G. (2000). Application for Aluminium Alloys and Tempers. Chapter 6, 87-118.
- [15] Gilbert, K.J. (2000). Introduction to Aluminium Alloys and Tempers. ASM International, 258-259.
- [16] Davis, J.R. (2001). *Light Metals and Alloys: Aluminum and Aluminum Alloys*. 352-368. doi: 10.1361/autb2001p351
- [17] Sirel, Z. (2007). İkiz merdane döküm yöntemiyle üretilen alüminyum folyoların haddelenmesi ve oluşabilecek hata türleri, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 1-3.
- [18] Hirsch, J. (2011) Aluminium Sheet Fabrication and Processing, Hydro Aluminium Deutschland GmbH. *Woodhead Publishing Limited*, 728-729.

- [19] **Kara, G.** (2002). *İkiz Merdane Döküm Yöntemi ile Üretilen AA8006 Alaşımli Levhaların Termomekanik Davranışın İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20] **Alper, G.** (2003). *Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi ile Üretilmiş 5052-5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] **Öztürk, R.** (2011). Folyo İşletmesi Proses, Assan Alüminyum.
- [22] **Chandramouli, R.** Cup Drawing or Deep Drawing, Joint Initiative of IITs and IISc, 1-9. (2011)
- [23] **Singh, C.P. ve Agnihotri, G.** (2015). Study of Deep Drawing Process Parameters: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5, 1-10.
- [24] **Swapna, D., Rao, C.S. ve Radhika, S.** (2017). A Review on Deep Drawing Process. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 146-149.
- [25] **Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M. ve Soliman, H.H.** (2002). Roughness parameters, 133-138.
- [26] **Slamova, M., Karlik, M., Cieslar, M., Chalupa, B. ve Merle, P.** (2002). Structure Transformations During Annealing of Twin Roll Cast Al-Fe-Mn-Si (AA 8006) Alloy Sheets: Effect of Cold Rolling and Heating Rate, 390-395.
- [27] **Delijic, K., Asonovic, V. ve Radonjic, D.** (2006). Mechanical and Corrosion Properties of AA8011 Sheets and Foils, 83.
- [28] **Fujii, Y., Maeed, Y. ve Ifuku, R.** (2014). Prediction of surface roughness on rolled sheet by texture roll. *Procedia Engineering*, 161-166.
- [29] **Gali, O.A., Shafiei, M., Hunter, J.A. ve Riahi, A.R.** (2014). The tribological behavior of PVD coated work roll surfaces during rolling of aluminum. *Surface & Coating Technology*, 230-238. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.06.071
- [30] **Kjima, H.** (2015). An experimental investigation on the influence of lubrication on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 1-8. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.05.023
- [31] **Lenard, J.G.** (2004). The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 144-153. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.03.026.
- [32] **Gali, O.A., Shafiei, M., Hunter, J.A. ve Riahi, A.R.** (2016). The influence of work roll roughness on the surface/near-surface microstructure evolution of hot rolled aluminum–magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 1-11. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.06.012

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Serhat Akcan
Doğum Tarihi ve Yeri : İzmir, 01/01/1991
E-posta : serhatcanakcan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **2016 Şubat-halen**: Üretim mühendisi, Folyo Üretim Departmanı, Assan Alüminyum.

