

Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri

Azim Gökçe *¹

Fehim Fındık ²

Ali Osman Kurt ³

ÖZ

Toz metalurjisi (TM), üreticilere diğer imal usullerine göre büyük avantajlar sunan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin aşamaları olan toz üretimi, toz işleme, presleme, sinterleme ve sinterleme sonrası işlemlerdeki küçük farklılıklar nihai ürün özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Alüminyum alaşımları günümüzde en çok kullanılan ikinci mühendislik alaşımıdır. Günümüzde otomotiv sektöründe bazı alüminyum parçalar TM uygulamaları ile üretilmektedir. Yüksek dayanımlı alüminyum TM alaşımlarının geliştirilmesi ile ileride daha fazla sayıda parçanın bu yöntemle üretilmesi beklenmektedir. Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarından TM ile parça üretimi hakkında bilgi verilmiş, özellikle mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Al-Cu, Al-Si ve Al-Mg alaşımlarıyla ilgili literatürdeki bir takım sonuçlardan örnekler sunulmuştur. Farklı alaşımların sinterlenmesi sonucu elde edilen özellikler hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz metalurjisi, alüminyum alaşımları, sinterleme

Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys

ABSTRACT

Powder metallurgy (PM) is a production method that offers manufacturers great advantages over other manufacturing processes. Little changes in the production steps of powder metallurgy method such as powder manufacture, powder processing, pressing, sintering affect the properties of the final product significantly. Aluminum alloys are second most used alloy in the engineering applications. Nowadays some parts in the automotive sector are produced with aluminum PM alloys. In the future, it is expected that more Al-PM parts will be produced with the development of new high strength Al based PM alloys. In this study, information about the production of the Al-PM parts is given and some examples about the sintering of Al-Cu, Al-Si and Al-Mg PM alloys from the relevant literature are presented. Properties of the various sintered PM Aluminum alloys are highlighted.

Keywords: Powder metallurgy, aluminium alloys, sintering

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 02.02.2017

Kabul/Accepted : 04.04.2017

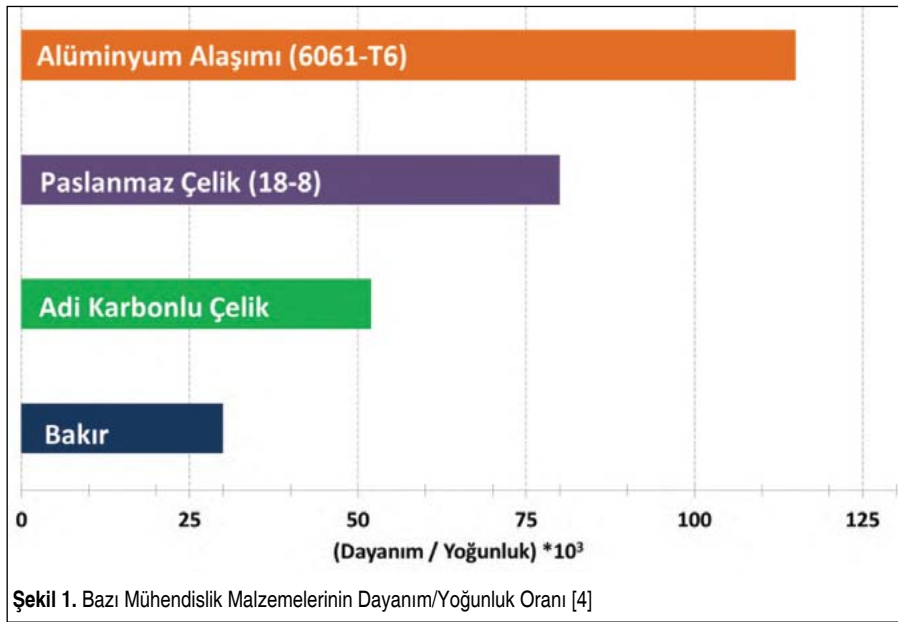
¹ Yrd. Doç. Dr., Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Sakarya
azimg@sakarya.edu.tr

² Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Biyomedikal, Manyetik, Yarıiletken Malzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi
(BİMAYAM), Sakarya - findik@sakarya.edu.tr

³ Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Sakarya
aokurt@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ

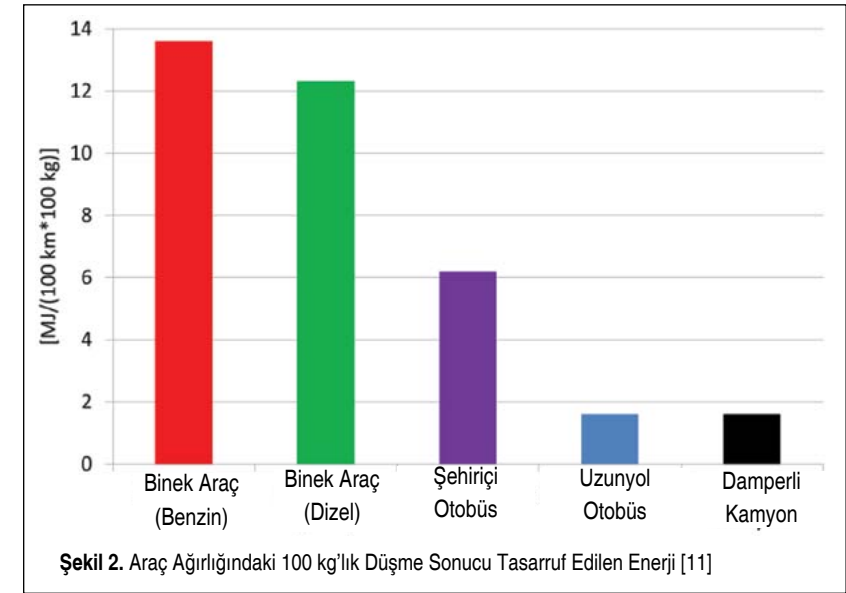
Alüminyum alaşımları günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan metalik mühendislik malzemeleridir [1]. Düşük yoğunluk ($2,7 \text{ gr/cm}^3$), yüksek korozyon dayanımı, yüksek elektriksel iletkenlik ve diğer mühendislik malzemelerine göre yüksek spesifik dayanım (Şekil 1) gibi özellikleri alüminyum alaşımlarına olan ilginin sebeplerindedir. Manyetik olmamasından dolayı manyetizmaya dayalı prensiplerle çalışan elektronik cihazların imalatında tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca, alüminyum alaşımları yüksek ısı iletkenliği, yanıcı ve parlayıcı olmaması, tamamıyla geri dönüştürülebilir olması, kaynaklanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı diğer mühendislik malzemelerine önemli üstünlükler de sağlamaktadır [2, 3].



Şekil 1. Bazı Mühendislik Malzemelerinin Dayanım/Yoğunluk Oranı [4]

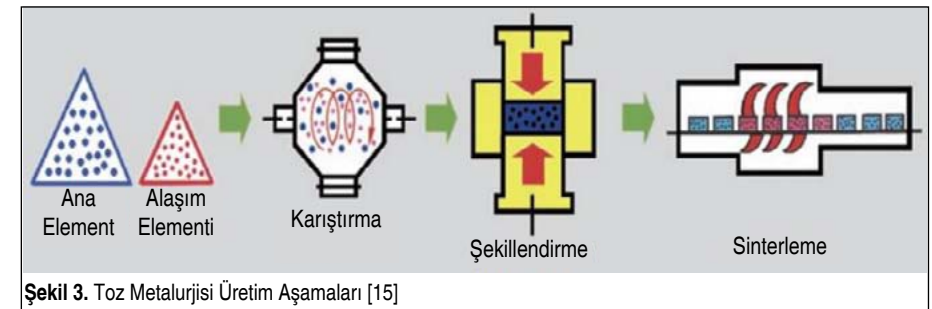
Alüminyum alaşımlarının günümüzde daha çok ilgi görmesinin başka bir sebebi ise taşımacılık sektöründe yaşanan gelişmelerdir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisi daha hafif, dolayısıyla daha az yakıt tüketen ve çevreye daha az zarar veren araçlar üretimi konusunda çaba göstermektedir. Daha hafif araçlar üretmek için günümüzde tercih edilen malzemelerden biri de alüminyum alaşımlarıdır [5–8]. Yapılan bir çalışmada [9], araç ağırlığında elde edilebilecek 100 kg'lık bir düşme ile yakıt sarfiyatında $0,3 \text{ lt}/100 \text{ km}$ 'lik bir azalma, CO_2 salınımlarında ise $7,5$ ila $12,5 \text{ gram}$ 'lık bir düşüş olduğu saptanmıştır. Araç ağırlığında meydana gelen 100 kg'lık bir düşme ile 100 km 'lik bir mesafede elde edilecek enerji tasarrufu Şekil 2'de verilmiştir. 2006 yılında bir

araçta 142 kg alüminyum alaşımı parça kullanılırken, yapılan öngörülere göre 2035 yılında bu değer 2 katından fazla artarak 325 kg olacaktır [10].



Şekil 2. Araç Ağırlığındaki 100 kg'lık Düşme Sonucu Tasarruf Edilen Enerji [11]

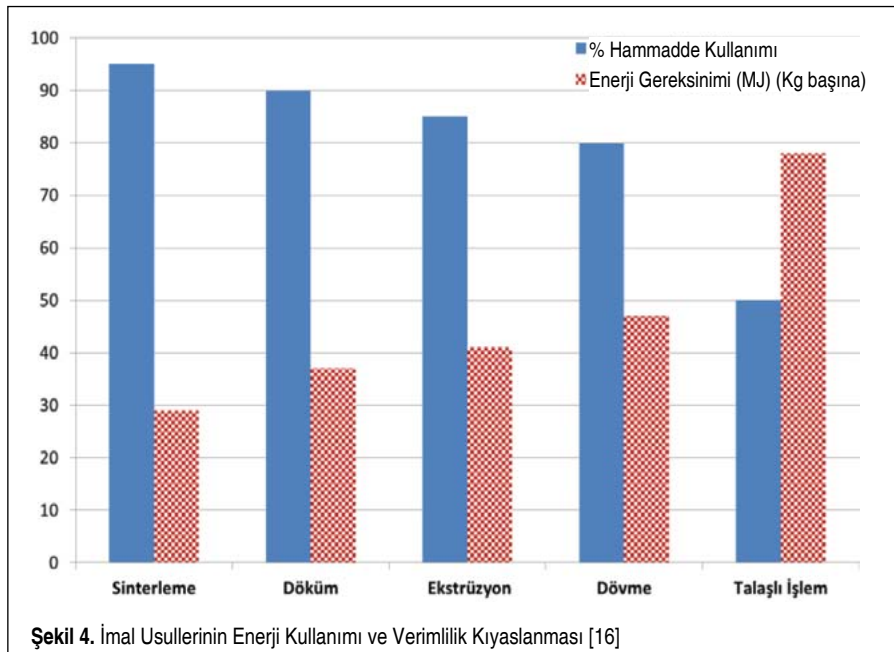
Toz metalurjisi (TM) kısaca, metal veya seramik tozlarını bir kalıpta şekillendirerek, şekillendirme esnasında veya sonrasında ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta pişirilmesi (sinterlenmesi) sürecidir (Şekil 3). Tarihi kaynaklara göre, toz metalurjisi yöntemini ilk olarak MÖ. 3000'li yıllarda Mısırlılar kullanmıştır [12]. Seramikler, mineraller, un, tuz, şeker gibi maddeler tarih boyunca sinterlenerek ürüne dönüştürülmüş olsa da TM yönteminin mühendislik malzemelerinin üretiminde asıl gelişimi 1900'lü yılların 2. yarısından sonra olmuştur [13]. Öncelikle, metalleri ergetmek için gerekli ısıyı üretmek için yeterli teknolojiye sahip olunmaması nedeniyle tercih edilen bir yöntem olan TM, gelişen teknolojiyle kolaylıkla yüksek sıcaklıkla-



Şekil 3. Toz Metalurjisi Üretim Aşamaları [15]

ra çıkılabilmesi nedeniyle uzun yıllar döküm yönteminin gerisinde kalmıştır. Ancak çok yüksek ergime sıcaklığına (3422 °C) sahip olması nedeniyle, döküm yöntemiyle üretimi halen dahi mümkün olmayan tungsten metalinden lamba flamanlarının bu yöntemle üretilebilmesi yöntemin gelişimi açısından bir milat olmuştur [14].

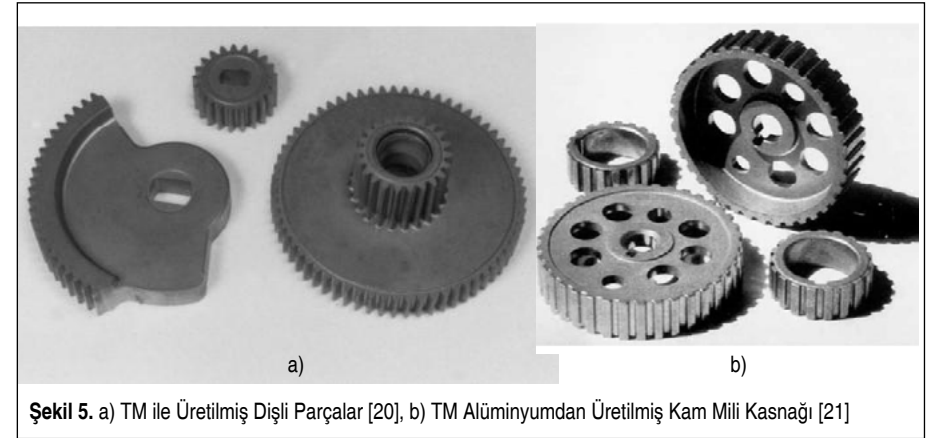
Toz metalurjisi yöntemi enerji sarfiyatı ve hammaddenin ürüne dönüşmesi açısından diğer geleneksel imal usullerine göre büyük avantaj sunmaktadır (Şekil 4). Şekil 4'teki verilere göre, talaşlı imalatta hammaddenin ancak %50'si ürüne dönüşürken TM'de bu miktar %95 civarındadır. Tam tersi olarak 1 kg parça üretmek için talaşlı imalatta yaklaşık 78 MJ enerji gerekirken bu miktar TM süreçlerinde talaşlı işlemler için gerekenin yarısından daha azdır [16]. Üretim hızı diğer usullere göre çok daha yüksektir. Karmaşık şekilli parça üretimi çok daha kolaydır. TM süreçlerinin bir türü olan Toz Enjeksiyon Kalıplama (PIM) ile pres-sinter yöntemine göre çok daha karmaşık şekilli parçaların üretimi mümkündür. Kontrollü gözeneklilik ile üretimin mümkün olması bu yöntemin başkaca avantajlarındandır. Böylelikle metalik filtreler, kendinden yağlamalı yatakların üretimi mümkün olmaktadır. Dökülmesi veya talaşlı işlenmesi mümkün olmayan WC-Co gibi seramik metal kompozit malzemeler bu yöntemle ürüne dönüştürülebilmektedir. Diğer yöntemlerle alaşım haline getirilmesi mümkün olmayan, ergime sıcaklıkları arasında büyük fark bulunan metaller de TM ile kolayca alaşım veya homojen formda karışım haline getirilebilmektedir. Mikroyapı kontrolü diğer yöntemlere göre daha kolaydır [17].



Şekil 4. İmal Usullerinin Enerji Kullanımı ve Verimlilik Kıyaslanması [16]

2. ALÜMİNYUM TOZ METALURJİSİ

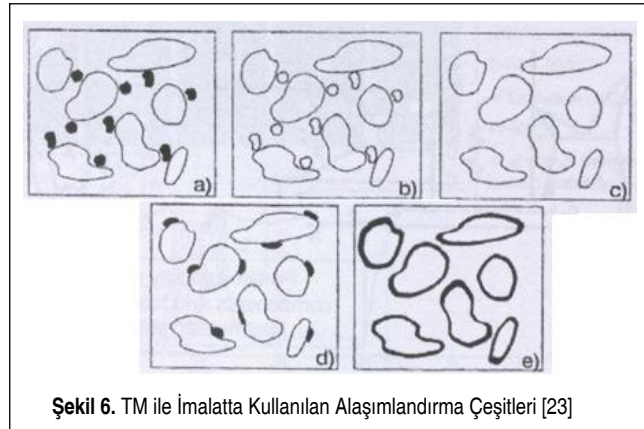
Alüminyum tozlarının şekillendirme esnasında kalıp duvarına sıvanması, kalıba soğuk kaynaklanarak birleşmesi ve iyi akış özelliği göstermemesinden dolayı TM sektörünün alüminyum alaşımlarına ilgisi ancak 1940'lı yıllarda görülmüştür [18]. TM yöntemiyle üretilen parçaların büyük kısmı otomotiv imalat sektöründe kullanılmaktadır [19]. Bu parçaların büyük kısmından ise diferansiyel ve motor parçaları olarak yararlanılmaktadır (Şekil 5a) ve genellikle demir esaslı tozlar kullanılmaktadır. Toz metal alüminyum alaşımlarının motor parçalarında kullanımı eksantrik mili parçası (Şekil 5b) gibi birkaç parça ile sınırlı kalmaktadır [15].



Şekil 5. a) TM ile Üretilmiş Dişli Parçalar [20], b) TM Alüminyumdan Üretilmiş Kam Mili Kasnağı [21]

2.1 Ticari Alüminyum Tozları

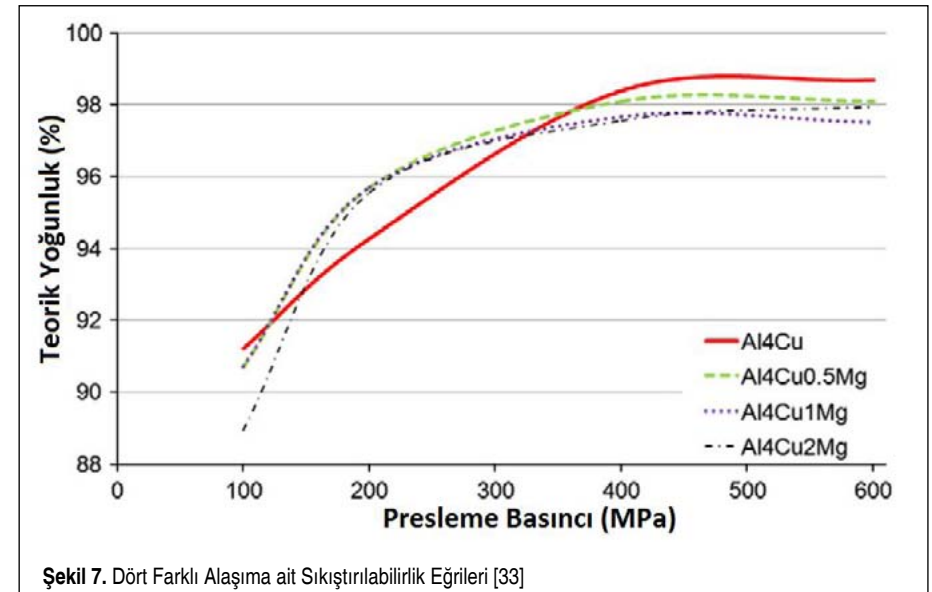
Toz metalurjisi yönteminde alaşımlama 5 farklı yöntem kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 6). Bunlardan birincisi, istenilen bileşime göre tartılmış elementel tozların homojen bir şekilde karıştırılması ile oluşturulmuş elementel toz karışım yöntemidir (Şekil 6a). Bir diğer yöntem, ana alaşım tozları (master alloy) kullanımdır (Şekil 6b). Bu yöntemde bir ana alaşımın (örneğin Al50Si) çeşitli yöntemlerle (atomizasyon vs.) toz haline getirilmesi ve sonrasında, istenilen bileşime getirilmesi için elementel tozlarla karıştırılması esas alınır. TM süreçlerinde en sık kullanılan toz türlerinden biri de önalaşım tozlarıdır (Şekil 6c). Önalaşım tozları istenilen bileşimde dökülerek külçe haline getirilmiş alaşımın toz haline getirilmesi ile üretilir. Önalaşım tozlarının en büyük avantajı kimyasal bileşimin her bir partikülde aynı olması ve karıştırma işlemlerinin çok daha kısa süreli olmasıdır. Bu tip tozların kullanımında karıştırma işlemi sadece farklı boyutlardaki parçacıkların homojen dağıtılması ve olası topaklanmaların ortadan kaldırılması için yapılır. Difüzyonla birleştirilmiş tozlar (Şekil 6d) birbirine difüzyon yöntemi ile birleştirilmiş tozların karıştırılarak kullanılmasını kapsar. Bu



Şekil 6. TM ile İmalatta Kullanılan Alaşımlandırma Çeşitleri [23]

Tablo 1. Bazı Ticari Alüminyum Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri

Üretici	Ürün Kodu	Bileşim (% Ağı.)									
		Cu	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Zn	Yağlayıcı	Al	Ref
ALCOA	602	--	0,6	0,4	--	--	--	--	--	Kalan	[24]
	601	0,25	1	0,6	--	--	--	--	--	Kalan	
	202	4,0	--	--	--	--	--	--	--	Kalan	
	201AB	4,4	0,5	0,8	--	--	--	--	1,5	Kalan	[25]
	201 AC	4,4	0,5	0,8	--	--	--	--	--	Kalan	
ALCAN	24	4,4	0,5	0,9	0,4	--	--	--	--	Kalan	[26]
	22	2	1	0,3	--	--	--	--	--	Kalan	
	69	0,25	1	0,6	--	--	--	--	1,5	Kalan	
	76	1,6	2,5	--	--	--	--	--	1,5	Kalan	
ECKART	Alumix 123	4,5	0,5	0,7	--	--	--	--	--	Kalan	[19]
	Alumix 13	4,5	0,5	0,2	--	--	--	--	--	Kalan	[27]
	Alumix 231	2,5	0,6	14	--	--	--	--	--	Kalan	[28]
	Alumix 431	1,5	2,5	--	--	--	--	5,5	1,2	Kalan	[29]
	Alumix 321	0,21	0,95	0,49	--	--	0,07	--	--	Kalan	[30]
AMPAL	2712	3,8	1	0,75	--	--	--	--	--	Kalan	[24]
ALPOCO	2124	4,24	1,4	0,03	0,85	--	--	--	--	Kalan	[31]
	6061	0,44	0,82	0,6	0,08	0,3	--	--	--	Kalan	[32]



Şekil 7. Dört Farklı Alaşıma ait Sıkıştırılabilirlik Eğrileri [33]

yöntem daha çok demir esaslı alaşımlarda kullanılır. Kaplanmış tozlar (Şekil 6e) ise bir element tozunun çeşitli yöntemlerle başka bir element veya bileşikle kaplanması ile elde edilir.

Alüminyum alaşımlarının TM ile üretiminde genellikle elementel tozlar, önalaşımli tozlar veya ana alaşım tozları kullanılır. Difüzyonla birleştirilmiş alüminyum tozlarına literatürde rastlanılmamakla birlikte, alüminyum tozlarının oksitlenmesinin engellenmesi için polimer esaslı kaplamalarla kaplandığı bazı çalışmalar mevcuttur.

Günümüzde alüminyum tozları ticari olarak elementel, önceden karıştırılarak istenilen bileşime getirilmiş (pre-mix) veya önalaşımli (pre-alloyed) olarak bulunmaktadır. Bu alaşımların bileşimleri (Tablo 1) genellikle döküm veya işlenmiş (wrought) alüminyum alaşımlarına benzerdir. İlk olarak 1920'lerde pulsu yapıda üretilmesine rağmen, patlayıcı özelliğinden dolayı bilyeli değirmenin icadına kadar iş güvenliği bağlantılı sebeplerden dolayı yaygınlaşmamıştır. İkinci dünya savaşı sırasında patlayıcı imalatında büyük oranda alüminyum tozları kullanılmıştır [22].

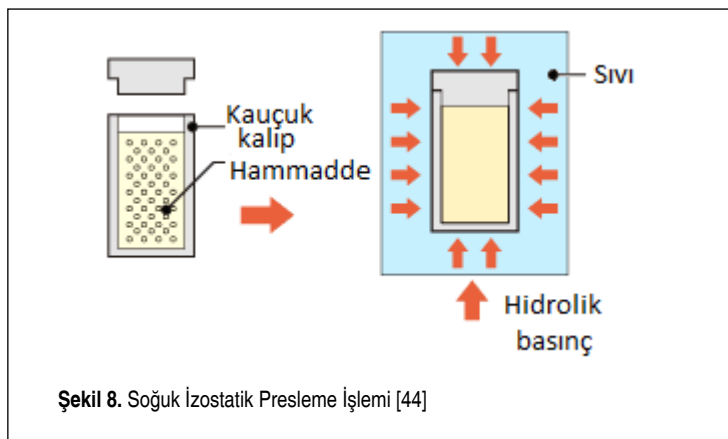
2.2 Şekillendirme İşlemleri

Karıştırma veya harmanlama işlemi uygulanmış tozların şekillendirilebilme özellikleri sıkıştırılma eğrileri ile ölçülür. Sıkıştırılma eğrisinin oluşturulabilmesi için toz hammadde düşük değerlerden başlanarak çeşitli basınçlarla preslenir. Belli bir basınç değerinden sonra kompaktların ham yoğunluğu ya hiç değişmez ya da çok az

değişir. Eğrinin sıkıştırma basıncı ile değişmediği bu değer, tozların en yüksek ham yoğunluğa ulaşması için gerekli en düşük basıncı gösterir. TM işlemlerinde en yüksek giderlerden biri kalıp maliyetidir ve yüksek basınçlı sıkıştırma işlemlerinde kalıp ömrü düşmektedir. Bu yüzden tozların sıkıştırma eğrilerinin doğru şekilde belirlenmesi önemlidir. Örnek bir sıkıştırılma eğrisi Şekil 7’de verilmiştir. Şekilde verilen 4 alaşım için eğrinin X eksenini paralellik göstermeye başladığı 400 MPa değeri bu 4 alaşım için en uygun presleme basıncı olarak kullanılmıştır. Grafikte dikkat çeken bir diğer nokta, 600 MPa ile preslenen numunelerin ham yoğunluğunda düşme görülmeye başlamasıdır. Bu durum yazarlar tarafından numunelerin yüksek basınç altında gösterdikleri geri yaylanma (spring back) davranışına bağlanmıştır [33].

Alüminyum tozlarının sertlikleri düşük olduğu için tek eksenli presleme ile kolaylıkla yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılabilir [34]. Bu noktada alaşımların sinter sonrası yoğunlukları üzerinde basınçtan sonra en büyük etki tozların alaşımlanmasında kullanılan yöntemdir. Elementel toz karışımları nispeten daha düşük sertlikte olduğu için düşük şekillendirme basınçlarında bile yüksek ham yoğunluk değerlerine ulaşabilirken, daha sert olan önalaşımli tozların yüksek ham yoğunluk değerlerine ulaşabilmesi için daha yüksek presleme basınçları kullanılması gerekmektedir. Youseffi ve Showaiter [32], önalaşımli ve elementel karışım ile hazırlanmış 6061 alaşımı tozları kullandıkları çalışmada elementel tozlar ile 400 MPa basınç kullanarak ulaştıkları ham yoğunluk değerlerine önalaşımli tozlarda 800 MPa basınçla ulaşabildikleri. Elementel karışımla hazırlanan alüminyum alaşımlarının tek eksenli preslenmesinde optimum presleme basıncı literatürde genellikle 400 MPa olarak belirtilmiştir [35, 36].

Soğuk izostatik presleme (CIP), tek eksenli kalıpla sıkıştırmada karşılaşılan gözenekliliğin homojen olmaması sorununun aşılması için tozların çok eksenli sıkıştırılması



Şekil 8. Soğuk izostatik Presleme İşlemi [44]

için üretilmiş bir sistemdir. Sistem, oda sıcaklığında çalışır ve tozları elastik bir kalıp içinde şekillendirir. Elastik kalıp içine konan numune bir yağ içine daldırılır ve yağ haznesi sıkıştırılır (Şekil 8). Parça üzerine gelen basınç bütün yönlerden eşit düzeyde olduğu için gözeneklilik bütün noktalarda aynıdır. CIP ile 1400 MPa üzerinde basınçlara çıkılabilir; ancak genellikle 420 MPa altındaki basınçlarla çalışılır [37]. Anderson ve arkadaşları, saf alüminyum tozlarını 200 MPa basınçla soğuk izostatik presledikleri çalışmada %93 teorik yoğunluğa [38], Al-Cu-Fe tozlarında ise 280 MPa basınçla izostatik presleyerek %90 teorik yoğunluğa [39] ulaşmışlardır. Tek eksenli preslemede görülen kalıp duvarı ile kompakt arasında görülen sürtünme izostatik preslemede görülmez. Kalıp maliyeti tek eksenli presleme kalıpları kadar yüksek değildir [40].

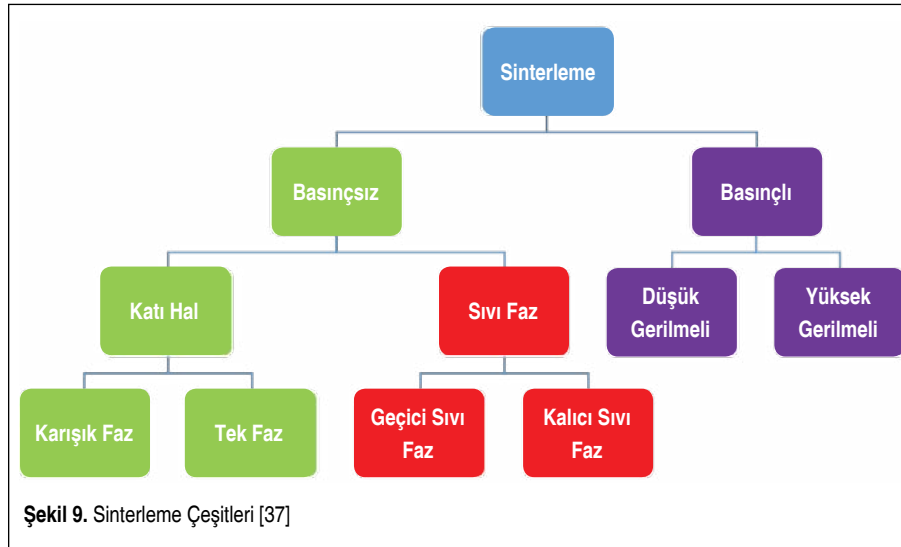
Sıcak izostatik presleme (HIP) cihazı çalışma prensibi soğuk izostatik presleme ile aynı olmakla birlikte, sıcak izostatik presleme de sıvı yerine gaz kullanılır. Kullanılan gaz genellikle argondur; ancak diğer soygazlar da kullanılabilir. HIP işlemi genelde 2200 °C sıcaklığa ve 200 MPa basınca kadar uygulanabilir. Basınç odacıkları 1,5 m çap ve 2,5 m yüksekliğe ulaşabilir. Alüminyum ve alaşımlarının sıcak izostatik preslenmesinde genellikle sıcaklık olarak 500 °C, basınç olarak 100 MPa kullanılır [41]. Bu yöntemde dezavantaj olarak numune yüzeyinin elastik kalıptan safsızlık bulaşması ve ikincil işlemle temizlenmesi gerekliliği gösterilebilir. Gerek soğuk ve gerekse sıcak izostatik presleme işlemlerinde üretim hızı tek eksenli preslemeye göre oldukça düşüktür. Soğuk izostatik preslemede kalıbın kauçuk olmasından dolayı ölçü toleransları fazladır.

Alüminyum tozlarının, geleneksel yöntemler olarak kabul edilen pres-sinter, HIP ve CIP ile kolaylıkla yüksek ham yoğunluklara çıkabiliyor olması diğer yöntemlerle üretilmesini büyük oranda gerek duyulmamasına sebep olmuştur. Yapılan kısıtlı çalışmalardan birinde Kim ve arkadaşları [42] Toz Enjeksiyon Kalıplama (PIM) ile Al tozlarını kalıplamışlardır. Choudhury ve arkadaşları [43], alüminyum tozlarının PIM ile şekillendirilmesi amaçlı yeni bir bağlayıcı sistemi geliştirmiştir.

2.3 Sinterleme İşlemleri

Sinterleme işlemi, toz parçacıklarının birbirine bağlanmasını sağlayan, böylece dayanımlarını artıran, yüzey alanlarını düşüren bir ısı sürecidir [37]. Sinterleme işlemleri sinterlenecek malzemeye göre ve sinterleme sürecine göre değişik şekillerde yapılabilir (Şekil 9).

Sinterleme işlemi yüksek sıcaklıklarda atom difüzyonu mekanizmasıyla gerçekleşen bir işlemdir. Birim hacimdeki parçacık miktarı arttıkça, o birim hacimdeki yüzey enerjisi artar. Bu nedenle, daha fazla yüzey alanına sahip parçalar daha kolay sinterlenir. Sinterleme işlemi, oluşturulmuş yüksek serbest enerjiye sahip toz kompaktı, daha az gözenekli rijit bir cisme çevirme işlemidir [45]. Bazı özel malzemeler dışında bü-



tün tozmetal parçalar uygun bir sıcaklıkta sinterlenir. Kompaktlama sonucunda parça, sürtünmeden dolayı oluşan fiziksel yapılaşma etkisiyle, elle tutulacak kadar sağlam bir yapıdadır. Buna rağmen bütün parçacıklar yapıda bağımsız biçimde kalmıştır. Sinterleme işlemlerinde parçacıklar arası temas noktalarından başlayarak oluşan difüzyon olayları vasıtasıyla, ham parçanın yüksek dayanımlı bir nihai ürüne ulaşması amaçlanır.

Katı faz sinterleme, tek fazlı sistemlerde veya birbiri içinde çözünmeyen sistemlerde partiküllerin temas noktalarından atom difüzyonu ile gerçekleşen sinterleme mekanizmasıyla sıvı faz sinterleme parçacıklar arasındaki boşlukları doldurabilecek bir sıvı faz oluşumunun sinterlemeyi hızlandırması ve yoğunlaşma miktarını artırması esasına dayanır. Alüminyum alaşımlarında sıvı faz sinterleme sıklıkla kullanılmaktadır.

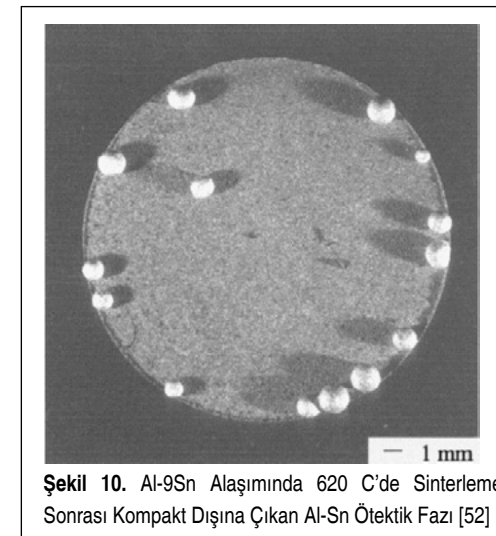
2.3.1 Al₂O₃ Tabakası

Alüminyum ve alaşımlarının sinterlenmesinde en büyük problem, toz parçacıklarının yüzeyinde üretimden gelen Al₂O₃ tabakasının partiküller arasında difüzyonun oluşmasını engellemesidir. Alüminyum tozları hangi yöntemle üretilirse üretilsin, açık atmosfere çıktığı anda alüminyumun oksijene olan yüksek afinitesinden dolayı yüzeylerinde oksit tabakası oluşması kaçınılmaz olur [46]. Birçok metalin yüzey oksidini hidrojen altında sinterleyerek su buharı olarak sistemden atmak mümkündür. Ancak termodinamik açıdan bakıldığında, Al₂O₃'ü indirgemek için kullanılacak hidrojenin 600 °C'de çığ noktasının <-140 olması gerekir. Ancak -140'dan küçük bir çığ noktası veya 10⁻⁵⁰ atm kısmi basınca ulaşılması mümkün olmadığından alüminyum yü-

zeyindeki oksijenin kullanılan atmosfer (hidrojen) vasıtasıyla indirgenmesi mümkün değildir [47]. Al₂O₃'ün oluşması için 100 °C'de 10⁻¹⁴⁵ atm, 900 °C'de 10⁻³⁹ atm kısmi basınç yeterlidir [48]. Bu kısmi basınç değerlerine gerek vakum ve gerekse koruyucu atmosfer kullanılarak ulaşılması ise mümkün değildir.

Oksit tabakasının kalınlığı üretildiği andaki sıcaklık, saklama koşulları, özellikle de saklandığı ortamdaki neme bağlı olarak değişmektedir [46]. Külçe alüminyum yüzeyindeki oksit kalınlığı 10-20 Å'dur. Alüminyum yüzeyindeki oksit genellikle amorfudur [49] ve nemlidir [46, 50]. Oksit 350 °C üzeri sıcaklıklarda tavlanırsa γ-Al₂O₃ yapısında kristallenir. Oksit tabakası düşük ergime derecesine sahip metallerin katı faz sinterlenmesini engelleyici etki gösterir [51, 52]. Ancak tozların yüzeyindeki oksit tabakası alüminyumun havayla temasını keser ve patlayıcı özelliklerinin azalmasını sağlar [53].

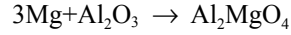
Alüminyum tozları yüzeyindeki oksit tabakası, sıvı faz sinterleme sırasında ıslatma açısını artırarak sinterlemeyi olumsuz yönde etkiler [54]. ıslatma açısının artması ile oluşan zayıf ıslatma davranışı dolayısıyla kompaklarda şişme ve sıvı fazın kompakt dışına çıkması (Şekil 10) çoğunlukla gözlenmektedir [55]. Liu ve arkadaşları [56], şekillendirilmemiş ve dolayısıyla plastik deformasyona uğramamış tozların yüzeyindeki oksidin de alüminyum ve alümina arasındaki termal genleşme farkından dolayı kırılabilirliğini ileri sürmüştür. Alüminyumun termal genleşme katsayısı 27,4x10⁻⁶/°C iken alüminanın termal genleşme katsayısı bunun yaklaşık ¼'ü kadardır (7,4x10⁻⁶/°C). Bu yüzden, sıcaklık artışıyla birlikte parçacıkların yüzeyindeki oksit tabakasında büyük bir gerilme meydana gelir [57]. Yapılan hesaplamalara göre, 600 °C'de oksit tabakası üzerindeki gerilme yaklaşık 4000 MPa'dır ve bu gerilme



oksit tabakasının kırılması için yeterlidir. Küresel parçalardaki oksidin kırılması için sıcaklığın 67 °C'ye çıkarılması yeterlidir. Düzensiz şekilli parçalarda gerilimin farklı noktalarda yoğunlaşması dolayısıyla oluşan farklılıkların oksit tabakasının kırılması için daha elverişli olduğu literatürde belirtilmiştir [56].

Alüminyum tozları üzerindeki oksit tabakasının elimine edilmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biri de oksijene afinitesi alüminyumdan daha fazla olan bir alaşım elementi ilavesi ile oksit fazının indirgenme-

sidir. Bu amaçla en sık kullanılan element magnezyumdur [23, 33, 58, 59]. Alüminyum tozları yüzeyindeki oksidin magnezyum tarafından indirgenmesi aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir [52].



Bu sebeple, toz metal alüminyum alaşımlarının bileşiminde genellikle magnezyum bulunmaktadır (Tablo 1).

2.3.2 Koruyucu Atmosfer

Alüminyum ve alaşımlarının sinterlenmesinde en önemli konulardan biri sinterleme atmosferinin seçimidir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesinin yüksek olması açık atmosferde yapılan sinterleme işlemlerinde, alüminyum parçacıkları üzerinde alüminyum oksit tabakası oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımları genel olarak bir koruyucu atmosfer altında sinterlenebilmektedir. Pieczonka, Alumix 431D (Al5.8Zn1.6Cu2.6Mg) tozları ile yaptığı çalışmada [60] azot, argon ve %95 azot - %5 hidrojen karışımını koruyucu atmosfer olarak kullanmış ve en iyi sonuçlara azot gazı ile ulaşmıştır. Aynı zamanda Pieczonka [60], kullanılan koruyucu atmosferin sinterleme mekanizmasını etkilemezken, oluşan genleşme ve büzülme miktarlarını değiştirdiğini tespit etmiştir. Başka bir çalışmada [61] ise en yüksek eğme dayanımı değerlerine azot atmosferinde sinterleme ile ulaşıldığını belirtmiştir (Tablo 2). Literatürdeki bazı çalışmalarda [61–65] da azotun en iyi koruyucu atmosfer olduğu ve azot kullanılması ile daha yüksek yoğunluklara ulaşabileceği rapor edilmiştir. Schaffer ve arkadaşları [65], azot atmosferinde sinterleme esnasında alüminyum partikül yüzeylerinde AlN tabakası oluştuğunu ve yüksek sıcaklıklarda oluşan sıvı fazın AlN tabakasını ısıtma açısının Al₂O₃ tabakasına göre daha düşük olmasına bağlamışlardır.

Tablo 2. %99,5 Safiyette Al Tozlarının Sinterlenmesinde Koruyucu Atmosfer Etkisi [61]

Sinterleme Atmosferi	Eğme Dayanımı (MPa)
N ₂	243,1
N ₂ /5%H ₂	123,2
Ar	164,7
Ham Kompakt	21,5

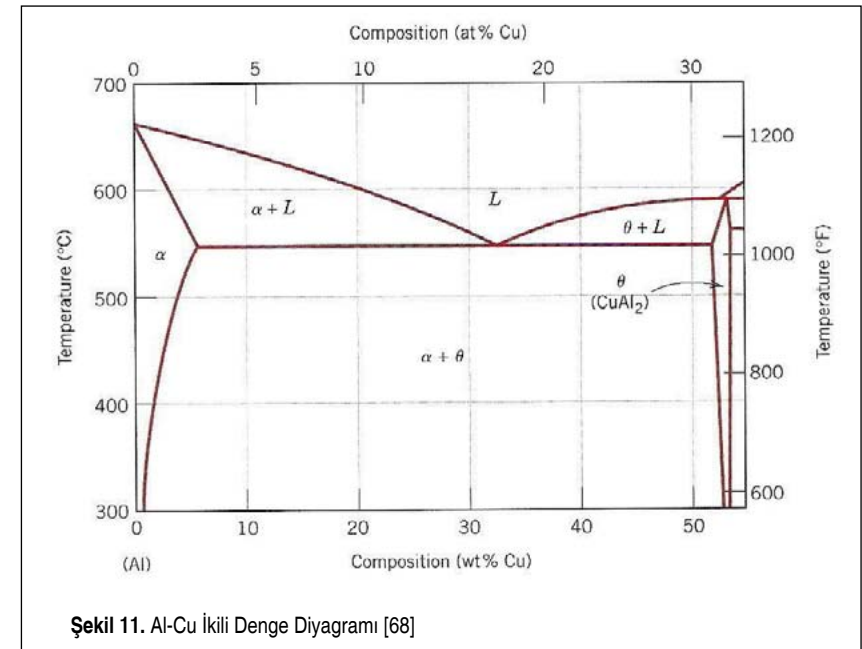
2.4 TM Alüminyum Alaşım Sistemleri

Tozmetal alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri genellikle döküm ve işlenmiş alüminyum alaşımlarına benzerdir.

2.4.1 Al-Cu TM Alaşımları

Bakır ticari alüminyum alaşımlarında özellikle ısıl işleme dayanım artışına imkan verdiği için sıklıkla kullanılan bir alaşım elementidir. Al-Cu alaşımları günümüzde tozmetal alüminyum alaşımları içinde en çok dikkat çeken alaşımlardır. Al-Cu ikili denge diyagramına göre (Şekil 11), ötektik sıcaklık olan 548 °C alüminyum içinde ağırlıkça %5,65 bakır çözünür. Elementel olarak hazırlanmış bir karışımda sıcaklık artışı ile birlikte bakır alüminyum içine yayılır. İki alüminyum atomu bir bakır atomu ile bileşik oluşturarak Al₂Cu intermetalini oluşturur. Denge sağlanana kadar yapıda difüzyon devam eder. Ötektik bileşimdeki (%33 Cu-%67 Al) bölgeler ötektik sıcaklığa ulaşınca ergir ve ilk sıvı faz oluşur [66]. Dolayısıyla ilk ergime Al-Al₂Cu tane sınırlarında meydana gelir. Dolayısıyla 548 °C üzerinde yapılan tüm sinterleme işlemleri sıvı faz sinterlemedir. Al-Cu ikili sisteminde sinterleme işlemlerinde görülecek sorunlardan biri bakır ve alüminyumun birbiri içindeki difüzyon hızlarının farklı olmasından dolayı oluşacak Kirkendall tipi gözeneklerdir [66, 67].

Al-Cu TM alaşımları literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Al-Cu alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda genellikle sinter şartlarının ve hammadde alaşımının sinter sonrası özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kehl ve Fischmeister [69], atomize alüminyum ve elektrolize bakırın sinterlenmesi üzerine ilk çalışmalardan birini ortaya koymuşlardır. Pickens [14], Al-Cu tozmetal alaşımlarıyla ilgili ilk çalışmalardan biri olan

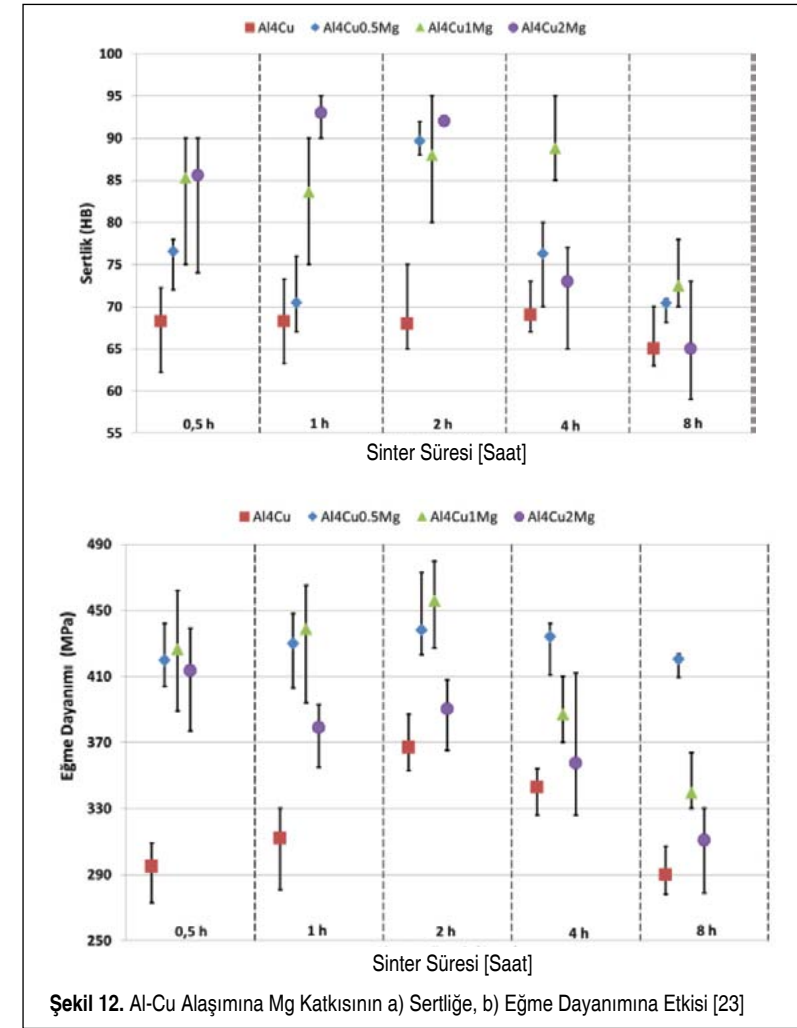


Şekil 11. Al-Cu ikili Denge Diyagramı [68]

makalesinde 2712 serisi alaşımı incelemiştir. Upadhyaya ve arkadaşları [70] ise 2712 alaşımının mikrodalga sinterleme teknolojisi ile tozmetal bir malzeme haline dönüşümünü incelerken, Chelluri, aynı alaşım tozlarını dinamik manyetik sıkıştırma adını verdiği bir sistemle tam yoğunlukta sinterlemeyi başarmıştır. 2712 alaşımı üzerine yapılan başka bir çalışmada Min ve arkadaşları [71], şekillendirme basıncı ve sinter sıcaklığının mikroyapı üzerine etkisini incelemişler ve en yüksek yoğunluğa 610 °C'de 10 saat sinterleme sonucu ulaşmışlardır. Chang ve arkadaşları [72, 73], saf alüminyum tozlarının sinter sonrası özelliklerini incelemiş sonrasında bu tozlara % 6 bakır ve % 3 bakır ekleyerek farklı atmosferler altındaki sinter sonucu oluşan mikroyapıları incelemişlerdir. Başka bir çalışmada [74] ise Al₄.4Cu0.5Mg0.6Si elementel karışımının termal analizleri irdelenmiştir. Durmuş ve Meriç [75] ise önalaşımli 2014 tozlarının sinter ve ısıl işlem sonrası davranışlarını mikroyapısal olarak ve sertlik bakımından incelerken, Navas ve arkadaşları, [76] aynı alaşıma TiC ve VC katarak kompozit oluşturmuşlardır. 2014 önalaşımli tozları ile yapılan başka bir çalışma [77], bu tozlara ilave edilen Al-Si önalaşımli tozlarının ısıtma açısını düşürerek yoğunlaşmayı artırdığını ortaya koyarken, Sellars ve arkadaşları [78], aynı alaşıma SiC ekleyerek kompozit oluşturmuş ve oluşturulan kompozitin mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Spigarelli ve arkadaşları, önalaşımli 2014 tozlarının [79] ve 2024 tozlarının [80] sinter sonrası sürünme davranışını incelemişlerdir. 2014 tozmetal alaşımı ile başka bir kompozit çalışmasını da Swanson ve arkadaşları [81] yapmıştır ve %25 SiC katkılı kompoziti başarıyla üretmişlerdir. Xiang ve arkadaşları [82], 2024 önalaşımli tozlarına demir ve nikel katkısı ile yaşlanma davranışında azalma tespit etmişler ve oluşan intermetaliklerle ilgili ayrıntılı bilgi vermişlerdir. Anderson yaptığı çalışmada [83], yeni bir gaz atomizasyon yöntemi oluşturmuş ve bu yöntemle oluşturduğu alaşımların sinterlenme özellikleri üzerinde durmuştur. Benzer şekilde, Ridder ve Shechtman da önalaşımli Al-Cu tozları üretimi üzerine bir çalışma [84] yapmışlardır. Kaftelen ve arkadaşları [85] ise Al-4Cu esaslı kompozit oluşturmak için önce alaşıma TiC eklemiş, sonrasında oluşan ergiyiği atomize etmişlerdir. Benzer bir kompozit yapısına Pathak ve arkadaşları [86], Al₄Cu tozlarına TiN tozları ekleyerek sinterleme sonucu ulaşmışlardır. Rainforth ve arkadaşları [87], önalaşımli 2124 alaşımın; Bishop ve arkadaşları [88] ise 2014 alaşımının kuru aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Savitskii ve arkadaşları ise Al-Cu alaşımlarının sinterlenmesinde tozların tane boyutunun [89] ve çözünürlük değerlerinin kompaktların genleşme büzülme davranışları üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

2024 alaşımı üzerine yapılan çalışmalara örnek olarak Erde ve arkadaşlarının [90] sinter ve ekstrüzyon davranışlarını incelediği, Badini ve arkadaşlarının [91] yaşlanma davranışını incelediği, Momeni ve arkadaşlarının [92] sinter ve yoğunluk ilişkisini incelediği çalışmalar gösterilebilir. Zhang ve arkadaşları [93], atomize alüminyum ve elektrolize bakır tozları ile ürettikleri Al₄.5Cu1.8Mg alaşımının mikro-



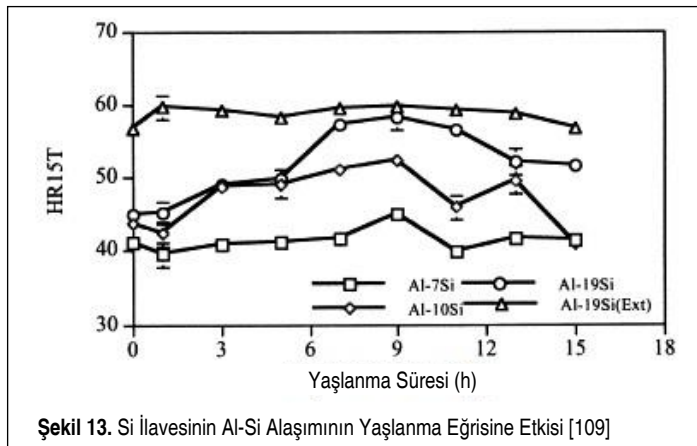
yapısal özelliklerini irdemişlerdir. Dhokey ve arkadaşları [94], elementel tozlarla ürettikleri Al₄.5Cu1Si0.8Mg alaşımında toz karıştırma şartlarının sinter sonrası mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Laska ve Kazior [95], bazı 2XXX serisi alaşımların sinterleme esnasında boyut değişimlerini ve yoğunluk değerlerine etkisini incelemişlerdir. Simchi ve Vetl [96], Al₄.5Cu alaşımının; Meluch ve Chang [97] ise Al₄.5Cu0.5Mg0.6Si alaşımının sıcak preslenme özellikleri üzerine çalışmalar yapmış ve sıcak preslenme ile daha yüksek yoğunluk elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Kurt ve arkadaşları [23, 33, 35, 59, 66, 98], Mg katkısı ve Si katkısının Al-Cu elementel karışımlarının mekanik özelliklerine artışa sebep olduğunu rapor etmişlerdir (Şekil 12).

Martin ve Castro [99, 100], 2XXX serisi alaşımlarda sinterleme atmosferi ve sıcaklığının mikroyapı ve sertlik değerleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Kim ve Lee [101], Al4.4Cu önalaşımına SiC whiskerler ekleyerek yaptıkları çalışmada termal analizler ve TEM çalışmalarıyla whiskerler etrafında dislokasyonlarda yığılma tespit etmişlerdir. Sarkar ve Lisagor [102], 2124 önalaşımına %0,5 ila %1,5 Mn eklemiş, düşük mangan ilavesinde dayanımda büyük artışlar tespit etmişlerdir.

2.4.2 Al-Si TM Alaşımları

Alüminyum silisyum TM alaşımları yüksek aşınma dayanımı, yüksek dayanım, düşük termal genişleme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen malzemelerdir. Hiperötektik Al-Si alaşımlarının geleneksel döküm teknikleri ile üretiminde, silisyumun geniş birincil silisyum fazı olarak katılması mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, döküm yöntemi ile üretilen Al-Si alaşımlarında alaşım elementi olarak eklenebilecek silisyum miktarı sınırlıdır. Bu sebeple bu alaşımların TM yöntemi ile üretimi döküm yöntemine nazaran üstünlükler sunmaktadır [103].

TM ile Al-Si alaşımı üretimi konusunda öncü çalışmalardan biri 1965 yılında Dixon ve Skelly tarafından yapılmış ve çalışma sonucunda, ağırlıkça %25, 35 ve 45 Si içeren önalaşımın sıcak preslenmesi ve ekstrüzyonu ile yüksek dayanım ve sertlik değerlerine ulaşılmıştır [104]. Akechi ve arkadaşlarının [105] 1985 yılında yaptıkları çalışmada, hızlı katılaşmış (Rapid Solidified) Al-Si-Fe önalaşımın tozlarından soğuk presleme, sıcak işlem ve dövme işlemleri ile benzer bileşimdeki döküm alaşımlarından daha yüksek dayanım gösteren TM alaşım üretilmiştir. Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg (Ağ.%) bileşimindeki tozların sıcak ekstrüzyonu ile yapılan bir çalışmada mikroyapıda Al₃FeSi, Al₇Cu₂Fe ve Al₄Cu₂Mg₈Si₇ fazları tespit edilmiştir [106]. Schubert vd., Ecka Alumix 231 tozlarının sinterlenmesi ile T1 ısıl işlemi sonrasında 231 MPa çekme dayanımı ve 100 HB sertliğe yapay yaşlandırma sonrası 340 MPa çekme dayanımı ve 140 HB sertliğe ulaşımlardır [28]. Casellas vd., Al-14Si alaşımında en



Şekil 13. Si ilavesinin Al-Si Alaşımının Yaşlanma Eğrisine Etkisi [109]

yüksek sertlik değerine (102 HB) 560 °C'de 85 dakika sinterleme ile ulaşımlardır [107]. Kennedy, Al7Si0.3Mg alaşımının elementel tozlarla oluşturarak sinterlemiş ve 99 MPa akma dayanımına 138 MPa çekme dayanımına ulaşımlar [108]. Gupta ve Ling [109], alüminyuma yapılan silisyum ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişler ve ötektik-üstü ve ötektik-altı alaşımların metalürjik karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Şekil 13). Elde ettikleri sonuçlara göre, silisyum ilavesi sertlik ve yaşlanma kabiliyetinde artışa neden olmuştur.

Lee ve Hong, Al-19Si alaşımına Ce ve Ni ilavesi sonrası yaptıkları ekstrüzyon işlemleri sonucunda 730 MPa'ya kadar çekme dayanımı elde etmişlerdir [110]. Bae vd., Al5Si tozmetal alaşımının sinter sonrası çekme dayanımının yaklaşık 450 MPa olarak tespit etmişlerdir [111].

2.4.3 Al-Mg TM Alaşımları

Bölüm 2.3.1'de belirtildiği üzere magnezyum alüminyum, üzerindeki oksit tabakasının indirgenmesinde sıklıkla kullanılan bir elementtir. Magnezyumun birincil alaşım elementi olarak kullanıldığı ticari TM alüminyum alaşımları ALPOCO 6061, ECKART Alumix 321, Alumix 431, ALCAN 69 ve 76, ALCOA 601 ve 602 sayılabilir. Belirtilen alaşımlardan 6061 ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan birini German ve çalışma arkadaşları [112] yapmış; belirtilen alaşımın mekanik özelliklerine presleme basıncının, ısıtma hızının, sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin etkisini ortaya koymuşlardır (Tablo 3). Çalışma sonucunda, en yüksek eğme dayanımı ve sertlik değeri için en yüksek basınçta presleme, en düşük sıcaklıkta sinterleme, en yavaş ısıtma ve en kısa sinter süresinin gerektiğini, en yüksek çekme dayanımı ve % uzama değeri için, en uzun sinterleme süresi, en yavaş ısıtma hızı, en yüksek presleme basıncının gerekli olduğu ortaya çıkmıştır [112].

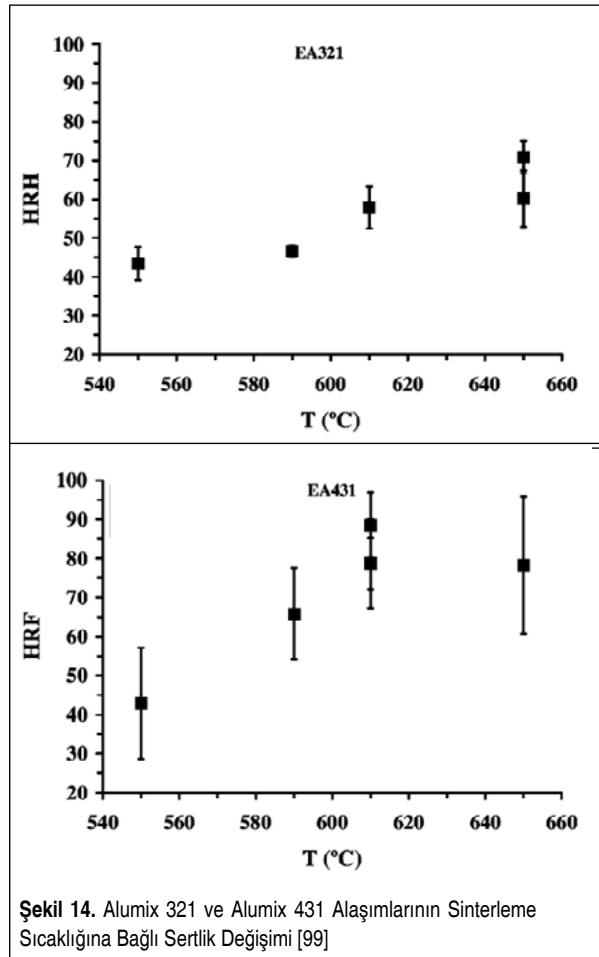
Tablo 3. 6061 TM Alaşımının Mekanik Özelliklerine Proses Parametrelerinin Etkisi [112]

Deney No	Presleme Basıncı	Ham Yoğunluk (%)	Sinter Sıcaklığı (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Sinter Süresi (dk)	Yoğunluk (%)	Sertlik (HV)	Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	550	91	610	1	10	95	41	9	101
2	110	72	610	10	20	80	25	1	32
3	330	87	610	5	30	92	32	10	130
4	330	87	630	5	10	96	29	6	75
5	550	91	630	10	20	96	41	17	107
6	110	72	630	1	30	74	22	5	116
7	110	72	650	5	10	81	23	7	119
8	330	88	650	1	20	89	28	9	127
9	550	91	650	10	30	96	39	18	131

Tablo 4. Alumix 321 Alaşımının T6 Isıl İşlemi Sonrası Mekanik Özellikleri [115]

Presleme Basıncı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
100	192±66	0,5±0,3
200	241±11	0,5±0,1
300	249±15	0,6±0,1
400	252±19	0,7±0,2

6061 alaşımı ile yapılan başka bir çalışmada [113], elementel olarak hazırlanan karışıma sinterleme katkısı mikro düzeyde Sn, Ag veya Pb ilavesi yapılmış ve farklı presleme basınçları ve sinterleme sıcaklıklarının özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, ağırlıkça %0,12 Pb ilavesi ile çekme dayanımının 266'dan



322'ye çıktığı fakat % uzamanın 12'den 9'a düştüğü görülmüştür. Sercombe [114], 6061 alaşımına yapılacak %0,5 Sn ve %0,1 Pb katkısının sıvı fazın partikülleri iletmesine olumlu etki yapacağını rapor etmiştir. Al-Mg alaşımının başka bir türü olan Alumix 321 alaşımı ile ilgili olarak yapılan çalışmada [115], 100-400 MPa arasında basınçla preslenen tozların ısıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi (Yapay Yaşlandırma) sonrasındaki özellikleri kıyaslanmıştır (Tablo 4).

Martin ve Castro, Alumix 321 ve Alumix 431 alaşımını 20 dakika azot atmosferinde farklı sıcaklıklarda sinterlemişler ve alaşımların optimum sinter sıcaklıklarına ulaşmayı amaçlamışlardır [99]. Alumix 321 alaşımında daha düşük miktarda magnezyum bulunması sebebiyle 660 °C'de sertlik artışı gözlemlenirken, Alumix 431 alaşımında 620 °C üzerindeki sıcaklıkta yapılan sinterleme sertlikte düşmeye sebep olmuştur (Şekil 14).

3. SONUÇ

Toz metalurjisi ile üretilen alüminyum parçalar endüstriyel uygulamalar için gerekli ihtiyaçları karşılayabilecek potansiyele sahip malzemelerdir. İstenilen özellikleri karşılamak amacıyla elementel tozları değişik bileşimlerde karıştırarak yeni alaşımlar üretilebilmesi yöntemin en büyük avantajlarından biridir. TM sektörünün en büyük müşterisi konumunda olan otomotiv sektöründe otomobil ağırlığının düşürülmesi amacıyla alüminyum alaşımlarının kullanım oranı günden güne artmaktadır. Yeni geliştirilen alaşımlar ve sinter sonrası işlemler (Isıl İşlem, Deformasyon vs.) ile üretilen daha yüksek dayanımlı alaşımlar ile önümüzdeki yıllarda alüminyum TM parçalarının endüstride daha geniş kullanım alanları bulacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, büyük oranda "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi" başlıklı doktora tezinden derlenmiştir. Çalışmanın esas alındığı doktora tezi Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 2009-50-02-20 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar bu desteğinden dolayı SAÜ-BAPK'a teşekkür eder. Ayrıca yazarlardan biri (AG) çalışmaya katkılarından dolayı İpek Gökçe'ye teşekkür eder.

KAYNAKÇA

1. **Altenpohl, D. G.** 1980. Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries. Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Heidelberg p. 21-126.
2. **Newkirk, J. W.** 2003. Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes, vol. 1, Marcel Dekker Inc., New York.
3. **Scamans, G.** 2009. "The Future of Light Metals," Materials Technology, vol. 24, no. 3, p. 129-30.

4. Capral Aluminium. 2008. "Aluminium and Aluminium Alloys - Characteristic Advantages and Beneficial Properties of Aluminium Extrusions," p. 1–12.
5. **Ghassemieh, E.** 2011. "Materials in Automotive Application , State of the Art and Prospects," *New Trends and Developments in Automotive Industry*, p. 365–94.
6. **Miller, W., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, a., et al.** 2000. "Recent Development in Aluminium Alloys for The Automotive Industry," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 280, no.1, p. 37–49.
7. **Hirsch, J.** 2004. "Automotive Trends in Aluminium-The European Perspective," *Materials Forum*, vol. 28, no. 3, p. 15–23.
8. **Hirsch, J.** 2011. "Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design," *Materials Transactions*, vol. 52, no. 5, p. 815–823.
9. **Pinto, A. S. A. F.** 2009. "Evolution of Weight , Fuel Consumption and CO2 of Automobiles," MSc Thesis, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisbon.
10. **Cheah, L., Evans, C., Bandivadekar, A., Heywood, J.** 2009. "Factor of Two: Halving the Fuel Consumption of New u.s. Automobiles by 2035," no. 9, p. 49–71.
11. **Helms, H., Lambrecht, U.** 2004. "Energy Savings by lightweighting (Final report)," IFEU-Institute for Energy and Environmental Research, no. 01, p. 103.
12. **German, R. M.** 2016. *Sintering Science : An Historical Perspective Sintering Science: German Materials Technology*, California.
13. **Ramakrishnan, P.** 1983. "History of Powder Metallurgy," *Indian Journal of History of Science*, vol.18, no.1, p. 109–14.
14. **Pickens, J. R.**1981. "Aluminium Powder Metallurgy Technology for High-Strength Applications," *Journal of Materials Science*, vol.16, no. 6, p. 1437–57.
15. **Dowson, G., Whittaker, D.** 2008. *Introduction to Powder Metallurgy the Process and its Products*, European Powder Metallurgy Association, London.
16. **Moon, J. R.** 2007. *Introduction to PM, A Residential Training Course for Young Materials Engineers*, Course Booklet, European Powder Metallurgy Association, London.
17. **Tengzelius, J.** 2007. "A Pressing Need to Broadcast Virtues of PM Processing," *Metal Powder Report*, vol. 62, no. 10, p. 28–32.
18. **Upadhyaya, G. S.** 1999. *Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties and Applications*, Chichester, New York.
19. **Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H. C., Baum, U., et al.,** 2005. "Aluminium PM is a Challenge that Industry Can Overcome" *Metal Powder Report*, vol. 60, no. 3, p. 32–7.
20. **Fujiki, A.** 2001. "Present State and Future Prospects of Powder Metallurgy Parts for Automotive Applications," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 67, no. 1–3, p. 298–306.
21. **Jangg, G., Danninger, H., Schroder, K., Abhari, K., Neubing, H., Seyrkammer, J.** 1996. "PM Aluminum Camshaft Belt Pulleys for," vol. 89, p. 179–89.
22. **Davis, J. R.** 1993. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, 978-0-87170-496-2, 3rd ed., ASM International, Ohio.
23. **Gökçe, A.** 2013. "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi," PhD Thesis, Sakarya University, Sakarya.
24. **Schaffer, G.B.** 2004. "Powder Processed Aluminium Alloys," *Materials Forum*, vol. 28, p. 65–74.
25. **Bauccio, M.**1993. *ASM Metals Reference Book*, 9780871704788, ASM international, OHIO.
26. **Ünal, A., Leon, D., Gurganus, T., Hildeman, G.** 1998. "Production of Aluminum and Aluminum-Alloy Powder," *ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications*, vol. 7, p. 148–59.
27. **Moreno, M. F., González Oliver, C.J.R.** 2011. "Densification of Al Powder and Al-Cu Matrix Composite (Reinforced with 15% Saffil Short Fibres) During Axial Cold Compaction," *Powder Technology*, vol. 206, no. 3, p. 297–305.
28. **Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H. C., Baum, U., et al.** 2004. *P/M Aluminium Structural Parts for Automotive Application*. In *Euro PM 2004*, European Powder Metallurgy Association (Editor: Danninger, H.) Vienna, p. 627–32.
29. **Eksi, A. K., Acar, A. N., Ekicibil, A.** 2015. "Some Transport Properties of Alumix-431 Materials by Prepared P / M Method," vol. 3, no. 5, p. 253–8.
30. **Bidulský, R., Grande, M. A., Bidulská, J., Kočíško, R., Kvačkaj, T.** 2011. "An Evaluation of Severe Plastic Deformation on the Porosity Characteristics of Powder Metallurgy Aluminium Alloys Al-Mg-Si-Cu-Fe and Al-Zn-Mg-Cu," *Aluminium Alloys, Theory and Applications*, Prof. Tibor Kvačkaj (Ed.), 978-953-307-244-9, InTech Publication, Croatia.
31. **Walker, J. C., Rainforth, W. M., Jones, H.** 2005. "Lubricated Sliding Wear Behaviour of Aluminium Alloy Composites," *Wear*, vol. 259, no.1–6, p. 577–89.
32. **Youseffi, M., Showaiter, N.** 2006. "PM Processing of Elemental and Prealloyed 6061 Aluminium Alloy With and Without Common Lubricants And Sintering Aids," *Powder Metallurgy*, vol. 49, no. 3, p. 240–52.
33. **Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A. O.** 2013. "Effects of Mg Content on Aging Behavior of Al4CuXMg PM Alloy," *Materials and Design*, vol. 46, p. 524–31.
34. **Boland, C. D., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2013. "Industrial Processing of a Novel Al-Cu-Mg Powder Metallurgy Alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 559, p. 902–8.
35. **Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A.O.** 2016. "Sintering and Aging Behaviours of Al4CuXMg PM Alloy," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 55, no. 4, p. 391–401.
36. **Boland, C. D., Paul Bishop, D., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W.** 2011. "Development of an Aluminum PM Alloy for "Press-Sinter-Size" Technology," *International Journal of Powder Metallurgy (Princeton, New Jersey)*, vol. 47, no. 1, p. 39–48.
37. **German, R. M.** 2005. *A - Z of Powder Metallurgy*, Elsevier, Michigan.
38. **Tang, F., Anderson, I. E., Biner, S. B.** 2002. "Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites," *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 4, p. 201–14.
39. **Tang, F., Anderson, I. E., Gnaupel-Herold, T., Prask, H.** 2004. "Pure Al Matrix Composites Produced by Vacuum Hot Pressing: Tensile Properties and Strengthening Mechanisms," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 383, no. 2, p. 362–73.

40. **Price, P. E., Kohler, S. P.** Cold Isostatic Pressing of Metal Powders. ASM Handbook Volume 7, Powder Metal Technologies and Applications, ASM international, Ohio.
41. **Atkinson, H. V., Davies, S.** 2000. "Fundamental Aspects of Hot Isostatic Pressing: An Overview," Metallurgical and Materials Transactions A, vol.31, no.12, p. 2981–3000.
42. **Kim, J. S., Jiang, K., Chang, I.** 2006. "A Net Shape Process for Metallic Microcomponent Fabrication Using Al And Cu Micro/Nano Powders," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 16, no. 1, p. 48.
43. **Choudhury, I. A., Azuddin, M., Yun, C. X.** 2013. "Investigation of Powder and Binder Mixing Mechanism in Metal Injection Molding," International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering, vol. 2013. Rajshahi, Bangladesh.
44. Kyocera Global. <http://global.kyocera.com/fcworld/first/process03.html>, son erişim tarihi: 02.02.2016.
45. **Schatt, W., Association, Wieters, K. P.** 1997. Powder Metallurgy: Processing and Materials, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury.
46. **Nylund, A., Oleffjord, I.** 1993. "Surface-Analysis of Air Exposed Rapidly Solidified Aluminum Powder," Powder Metallurgy, vol. 36, no. 3, p. 193–7.
47. **Lumley, R. N., Sercombe, T. B., Schaffer, G. M.** 1999. "Surface Oxide and The Role of Magnesium During The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, no. 2, p. 457–63.
48. **Kowalski, L., Korevaar, B. M., Duszczyk, J.** 1992. "Some New Aspects Of The Theory of Oxidation and Degassing of Aluminium-Based Alloy Powders," Journal of Materials Science, vol. 27, no. 10, p. 2770–80.
49. **Wysong, W. S.** 1947. "Thin Oxide Films on Aluminum," The Journal of Physical Chemistry, vol. 51, no. 5, p. 1087–103.
50. **Kim, Y. W., Griffith, W., Froes, F.** 1985. "Surface Oxides," Journal of Metals, vol. 8, p. 27–33.
51. **Smart, R., Ellwood, E.** 1958. "Sintering of Tin Powder," Nature, vol.182, p. 1638–40.
52. **Schaffer, G. B., Sercombe, T. B., Lumley, R. N.** 2001. "Liquid Phase Sintering of Aluminium Alloys," Materials Chemistry and Physics, vol. 67, no. 1–3, p. 85–91.
53. **MacAskill, I. A., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2010. "Effects Of Magnesium, Tin and Nitrogen on The Sintering Response of Aluminum Powder," Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, no. 15, p. 2252–60.
54. **Sercombe, T. B.** 1998. "Non-Conventional Sintered Aluminium Powder Alloys," PhD Thesis, The University of Queensland, Brisbane.
55. **German, R. M.** 1996. Sintering Theory and Practice, 047105786X, John Wiley & Sons Inc, Chicago.
56. **Liu, Z. Y., Sercombe, T. B., Schaffer, G. B.** 2007. "The Effect of Particle Shape on The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, vol. 38, no. 6, p. 1351–7.
57. **Miyake, S.** 2005. Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources: Proceedings of the International Symposium on Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources (MAPEES'04), Elsevier Science, Osaka, Japan.
58. **Kondoh, K., Kimura, A., Watanabe, R.** 2001. "Effect of Mg on Sintering Phenomenon of Aluminium Alloy Powder Particle," Powder Metallurgy, vol. 44, no. 2, p. 161–4.
59. **Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A. O.** 2011. "Microstructural Examination and Properties of Premixed Al-Cu-Mg Powder Metallurgy Alloy," Materials Characterization, vol. 62, no. 7, p. 730–5.
60. **Pieczonka, T., Kazior, J., Szexczyk-Nykiel, A., Hebda, M., Nykiel, M.** 2012. "Effect of Atmosphere on Sintering of Alumix 431D Powder," Powder Metallurgy, vol. 55, no. 5, p. 354–60.
61. **Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., Kieback, B.** 2005. "Sintering Behaviour of Aluminium in Different Atmospheres," no. August 2016, p. 5–8.
62. **Schaffer, G. B., Hall, B. J.** 2002. "The Influence of The Atmosphere on The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 33, no. 10, p. 3279–84.
63. **Yan, M., Yu, P., Schaffer, G. B., Qian, M.** 2010. "Secondary Phases And Interfaces in a Nitrogen-Atmosphere Sintered Al Alloy: Transmission Electron Microscopy Evidence for the Formation of Aln During Liquid Phase Sintering," Acta Materialia, vol.58, no. 17, p. 5667–74.
64. **Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., Kieback, B.** 2008. "Dimensional Behaviour of Aluminium Sintered in Different Atmospheres," Materials Science and Engineering A, vol. 478, no. 1–2, p. 251–6.
65. **Schaffer, G. B., Hall, B. J., Bonner, S. J., Huo, S. H., Sercombe, T. B.** 2006. "The Effect of the Atmosphere and the Role of Pore Filling on the Sintering of Aluminium," Acta Materialia, vol. 54, no. 1, p. 131–8.
66. **Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A. O.** 2014. Effects of Sintering Temperature and Time on the Properties of Al-Cu PM Alloy. In 7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition (Editors: Rahmi, Ü., Yusuf, U., Mehmet, T.), Turkish Powder Metallurgy Association, Ankara.
67. **Fuentes, J. J., Rodriguez, J. A., Herrera, E. J.** 2010. "Processing of Mechanically Alloyed Aluminum Powder: A Metallographic Study," Materials Characterization, vol. 61, no. 4, p. 386–95.
68. Amazonaws.com <http://s3.amazonaws.com/chegg.media.images/board/ec1/ec1b410b-4f86-4fdb-9722-8a8a7996e18a-original.png>, son erişim tarihi: 02.02.2017.
69. **Fischmeister, H. F., Kehl, W.** 1980. "Liquid Phase Sintering of Al-Cu Compacts," Powder Metallurgy, vol. 23, no. 3, p. 113–9.
70. **Padmavathi, C., Agarwal, D., Upadhyaya, A.** 2015, "Microwave Sintering of Aluminium Alloys," https://www.mri.psu.edu/sites/default/files/file_attach/162.pdf, son erişim tarihi: 02.02.2017, p. 153–157.
71. **Min, K. H., Kang, S. P., Lee, B. H., Lee, J. K., Kim, Y. Do.** 2006. "Liquid Phase Sintering of the Commercial 2xxx Series Al Blended Powder," Journal of Alloys and Compounds, vol. 419, no. 1–2, p. 290–293.
72. **Cook, R., Chang, I.T.H., Falticeanu, C.L.** 2007. "Aluminium and Aluminium Alloy Powders for P/M Applications," Materials Science Forum, vol. 534–536, p. 773–776.
73. **Kim, J., Chang, I. T., Falticeanu, C. L., Davies, G. J., Jiang, K. C.** 2007. "A Study of

- Debinding Behavior and Microstructural Development of Sintered Al-Cu-Sn Alloy,” vol. 536, p. 769–772.
74. **Padmavathi, C., Upadhyaya, A.** 2011. “Sintering Behaviour and Mechanical Properties Of Al-Cu-Mg-Si-Sn Aluminum Alloy,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 64, no. 4–5, p. 345–57.
 75. **Durmuş, H. K., Meriç, C.** 2007. “Age-hardening Behavior of Powder Metallurgy AA2014 Alloy,” Materials and Design, vol. 28, no. 3, p. 982–6.
 76. **Ruiz-Navas, E. M., Fogagnolo, J. B., Velasco, F., Ruiz-Prieto, J. M., Froyen, L.** 2006. “One Step Production of Aluminium Matrix Composite Powders by Mechanical Alloying,” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 37, no. 11, p. 2114–20.
 77. **Delgado, M. L., Ruiz-Navas, E. M., Gordo, E., Torralba, J. M.** 2005. “Enhancement of Liquid Phase Sintering Through Al-Si Additions to Al-Cu Systems,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., p. 280–5.
 78. **Carvalho, M. H., Marcelo, T., Carvalhinhos, H., Sellars, C. M.** 1992. “Extrusion and Mechanical Properties of Mixed Powder and Spray Co-Deposited Al 2014/Sic Metal Matrix Composites,” Journal of Materials Science, vol. 27, no. 8, p. 2101–9.
 79. **Bardi, F., Cabibbo, M., Evangelista, E., Spigarelli, S., Vukcevic, M.** 2003. “An Analysis of Hot Deformation of an Al-Cu-Mg Alloy Produced by Powder Metallurgy,” Mater. Sci. Engng A, vol. 339, p. 43–52.
 80. **Spigarelli, S., Langdon, T. G., Angeles, L.** 1997. “Creep Behavior of an Aluminum 2024 Alloy Produced By Powder Metallurgy,” vol. 45, no. 2, p. 529–40.
 81. **Chou, S.** 1988. “Mechanical Behavior of Silicon Carbide / 2014 Aluminum Composite,” In Testing Technology of Metal Matrix Composites, ASTM STP 964, (Editors: P. R. Di Giovanni and N. R. Adsit), American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
 82. **Xiang, S., Matsuki, K., Takatsuji, N., Yokote, T., Kusui, J., Yokoe, K.** 1999. “Investigation of the Age Hardening Behavior of PM 2024Al-Fe-Ni Alloys and the Effect of Consolidation Conditions,” Journal of Materials Science, vol. 34, no. 8, p. 1953–8.
 83. **Miller, M. K.** 2001. “Determining the Role of Surfaces and Interfaces in the Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloy Powders,” Surface and Interface Analysis, vol. 31, no. 7, p. 599–608.
 84. **Ridder, S. D., Shechtman, D.** 1986. “Microstructure of Supercooled Submicrometre Aluminum-Copper Alloy Powder,” In Rapidly Solidified Powder Aluminum Alloys (Editors: H. P. Mahy, J. R. Schroeder, K. A. Greene, W. T. Benzing), ASTM, Baltimore, p. 252–9.
 85. **Kaftelen, H., Henein, H., Ovecoglu, M. L.** 2013. “Fabrication of TiC and ZrC Reinforced Al-4 wt% Cu Composite Droplets Using Impulse Atomization,” Journal of Composite Materials, vol.47, no.5, p. 587–601.
 86. **Ray, A. K., Venkateswarlu, K., Chaudhury, S. K., Das, S. K., Ravi Kumar, B., Pathak, L. C.** 2002. “Fabrication of TiN Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites Through a Powder Metallurgical Route,” Materials Science and Engineering A, vol. 338, no.1–2, p. 160–5.
 87. **Ghazali, M. J., Rainforth, W. M., Jones, H.** 2005. “Dry Sliding Wear Behaviour of Some Wrought, Rapidly Solidified Powder Metallurgy Aluminium Alloys,” Wear, vol. 259, no.1–6, p. 490–500.
 88. **Bishop, D. P., Li, X. Y., Tandon, K. N., Caley, W. F.** 1998. “Dry sliding Wear Behaviour of Aluminum Alloy 2014 Microalloyed with Sn and Ag,” Wear, vol. 222, no. 2, p. 84–92.
 89. **Savitskii, A. P., Afanas’ev, O. B., Gopienko, V. G., Martunova, L. S., Romanov, G. N., Zayats, T. L.** 1986. “Effect of Aluminum Particle Size on the Volume Changes Experienced by Compacts From a Mixture of Aluminum and Copper Powders During Liquid-Phase Sintering,” Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, vol. 25, no. 9, p. 721–5.
 90. **Lianxi, H., Zuyan, L., Erde, W.** 2002. “Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy Consolidated From Rapidly Solidified Alloy Powders,” Materials Science and Engineering A, vol. 323, no. 1–2, p. 213–7.
 91. **Badini, G., Marino, F., Verne, E., Guo, X. B.** 1995. “Aging Investigafion on 2024/SiC Composite and 2024 Alloy,” Metallurgical Science and Technology, vol. 13, no. 1, p. 29–38.
 92. **Momeni, H., Razavi, H., Shabestari, S.G.** 2011. “Effect of Supersolidus Liquid Phase Sintering on the Microstructure and Densification of the Al-Cu-Mg Pre- Alloyed Powder,” vol. 8, no. 2, p. 10–7.
 93. **Zhang, Q., Xiao, B. L., Liu, Z. Y., Ma, Z. Y.** 2011. “Microstructure Evolution and Elemental Diffusion of Sicp/Al-Cu-Mg Composites Prepared From Elemental Powder During Hot Pressing,” Journal of Materials Science, vol. 46, no. 21, p. 6783–93.
 94. **Dhokey, N. B., Athavale, V. A., Narkhede, N., Kamble, M.** 2013. “Effect of Processing Conditions on Transient Liquid Phase Sintering of Premixed Aluminium Alloy Powders,” Advanced Materials Letters, vol. 4, no. 3, p. 235–40.
 95. **Laska, M., Kazior, J.** 2012. “Influence of Various Process Parameters On The Density Of Sintered Aluminium Alloys,” Acta Polytechnica, vol. 52, no. 4, p. 93–5.
 96. **Simchi, A., Veltl, G.** 2003. “Investigation of Warm Compaction And Sintering Behaviour Of Aluminium Alloys,” Powder Metallurgy, vol. 46, no. 2, p. 159–64.
 97. **Meluch, L., Chang, I. T. H.** 2009. “Study of Warm Compaction of Alumix 123 L,” Powder Metallurgy, vol. 53, no. 4, p. 323–8.
 98. **Toyran, O., Gökçe, A., Kurt, A. O.** 2011. “Effects of Micro Level Si Addition on The Properties of Aluminium PM Alloy,” In Proceedings of The 6th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition (Editors: Türker, M., Kalkanlı, A., Uslan, İ., Demir, T., Usta, Y., Dericioğlu, A.), Turkish Powder Metallurgy Association, Ankara.
 99. **Martín, J. M., Castro, F.** 2003. “Liquid Phase Sintering of P/M Aluminium Alloys: Effect of Processing Conditions,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 143–144, no. 1, p. 814–21.
 100. **Jose M, M., Francisco, C.** 2007. “Sintering Response and Microstructural Evolution of an Al-Cu-Mg-Si Premix,” International Journal of Powder Metallurgy, vol. 43, no. 6, p. 59–69.
 101. **Kim, T. S., Kim, T. H., Oh, K. H., Lee, H. I.** 1992. “Suppression of Theta Formation



- in the SiC Whisker-reinforced Al-4 wt % Cu Composites,” *Journal of Materials Science*, vol.27, p. 2599–605.
102. **Sarkar, B., W. B. L.** 1986. “Thermomechanical Treatment of 2124 PM Aluminum Alloys with Low and High Dispersion Levels,” In *Rapidly Solidified Powder Aluminum Alloys*. ASTM STP 890 (Editors: M. E. Fine and E. A. Starke, Jr.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
 103. **Heard, D. W., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2009. “Metallurgical Assessment of a Hypereutectic Aluminum-Silicon P/M Alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 18–19, p. 5902–11.
 104. **Dixon, C. F., Skelly, H. M.** 1965. “Hypereutectic Aluminum–Silicon Alloys Produced by Powder Metallurgy Techniques,” *International Journal of Powder Metallurgy* (Princeton, New Jersey), vol. 1, no. 4, p. 28–36.
 105. **Akechi, K., Odani, Y., Kuroishi, N.** 1985. “High Strength Aluminum Alloys From Powder Metallurgy,” *Sumitomo Electric Technical Review*, no. 24.
 106. **Shen, J., Xie, Z., Gao, Y., Zhou, B., Li, Q., Su, Z., et al.** 2001. “Microstructure Characteristics of a Hypereutectic Al-Si Alloy Manufactured by Rapid Solidification/Powder Metallurgy Process,” *Journal of Materials Science Letters*, vol. 20, no. 16, p. 1513–5.
 107. **Casellas, D., Beltran, A., Prado, J. M. M., Larson, A., Romero, A.** 2004. “Microstructural Effects on the Dry Wear Resistance of Powder Metallurgy Al-Si Alloys,” *Wear*, vol. 257, no. 7–8, p. 730–9.
 108. **Kennedy, A. R.** 2002. “The Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-B4C Metal Matrix Composites,” *Journal of Materials Science*, vol. 37, no. 2, p. 317–23.
 109. **Gupta, M., Ling, S.** 1999. “Microstructure and Mechanical Properties of Hypo/Hypereutectic Al-Si Alloys Synthesized Using a Near-Net Shape Forming Technique,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 287, no. 1, p. 284–94.
 110. **Lee, T. H., Hong, S. J.** 2009. “Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-X Alloys Fabricated by Gas Atomization and Extrusion Process,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 487, no. 1, p. 218–24.
 111. **Choi, H. J., Shin, J. H., Min, B. H., Bae, D. H.** 2010. “Deformation Behavior of Al-Si Alloy Based Nanocomposites Reinforced With Carbon Nanotubes,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 2, 327–329.
 112. **Arockiasamy, A., German, R. M., Wang, P. T., Horstemeyer, M. F., Morgan, W., Park, S. J., et al.** 2011. “Sintering Behaviour of Al-6061 Powder Produced by Rapid Solidification Process,” *Powder Metallurgy*, vol. 54, no. 3, p. 354–9.
 113. **Showalter, N., Youseffi, M.** 2008. “Compaction, Sintering and Mechanical Properties of Elemental 6061 Al Powder with and without Sintering Aids,” *Materials and Design*, vol. 29, no. 4, p. 752–62.
 114. **Sercombe, T. B.** 2003. “On the Sintering of Uncompacted, Pre-Alloyed Al Powder Alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 341, no. 1–2, p. 163–8.
 115. **Ibrahim, A., Bishop, D. P., Kipouros, G. J.** 2015. “Sinterability and Characterization of Commercial Aluminum Powder Metallurgy Alloy Alumix 321,” *Powder Technology*, vol. 279, p. 106–12.