

Makine Mühendisliğinde Yenilikçi İmalat Teknolojileri ve Malzeme Bilimi

Editör: Kaan Emre Engin

Makine Mühendisliğinde Yenilikçi İmalat Teknolojileri ve Malzeme Bilimi

Editör:

Kaan Emre Engin



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

Makine Mühendisliğinde Yenilikçi İmalat Teknolojileri ve Malzeme Bilimi

Editör: Kaan Emre Engin

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-5646-19-4

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub770>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Engin, K. E. (ed) (2025). *Makine Mühendisliğinde Yenilikçi İmalat Teknolojileri ve Malzeme Bilimi*.

Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub770>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>



Ön Söz

Günümüz dünyasında teknoloji büyük bir hızla ilerlemektedir. Makine mühendisliği alanının kapsamı açısından ele alındığında hızla değişen sanayi ihtiyaçlarının karşılanabilmesi, yeni ürünlerin ve malzemelerin imalatının daha verimli ve daha sürdürülebilir olarak gerçekleştirilebilmesi için klasik üretim yöntemlerinin de gelişmesi ve dönüşmesi gerekmektedir. Bu dönüşümün merkezinde ise yenilikçi imalat teknolojileri ve malzeme bilimi yer almaktadır.

Bu kitap, geniş bir uygulama sahasına sahip olan makine mühendisliği alanına ait yedi adet çalışmaya yer vermektedir. Bu eserin ortaya çıkmasında değerli çalışmaları ile katkıda bulunan tüm bölüm yazarlarımıza en derin teşekkürlerimizi ve şükranlarımızı sunarız.

Bilgi temelli üretim anlayışının ön planda olduğu bu dönemde, hazırladığımız bu kitabın bilim dünyasına ve sanayiye katkı sunmasını temenni ederiz.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

Düşük Üretim Hacimli Enjeksiyon Kalıplama İçin 3B Baskı ile Hızlı Kalıp
İmalatı

1

Omer Eyericioglu

Bölüm 2

Fused Deposition Modeling (Fdm): Theory, Application, and Innovative
Approaches

11

Zilmi Alp Çevik

Bölüm 3

Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Uygulama Temelli
Karşılaştırılması

25

Hakan Çandar

Bölüm 4

Design and Application of Plant Protein-Based Materials For Controlled
Phytochemical Delivery in Bone Cancer Therapy-Review

43

Mehtap Demirel

Bölüm 5

İmalat Süreçlerinde Ortam Gazlarının Enerji Verimliliği Açısından
İzlenmesi

63

Ganime Tuğba Önder

Bölüm 6

A Comprehensive Investigation on the Effect of Growth Rate and Composition on Dendritic Microstructure and Arm Spacings in Directionally Solidified Al-Zn Alloys 75

Emin Çadırlı

Hasan Kaya

Uğur Büyük

Bölüm 7

Effect of Unsteady-State Heat Flow Regime Solidification on the Mechanical Properties of Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr Alloy 97

Emin Çadırlı

Uğur Büyük

Hasan Kaya

Erkan Üstün

Düşük Üretim Hacimli Enjeksiyon Kalıplama İçin 3B Baskı ile Hızlı Kalıp İmalatı

Omer Eyercioglu¹

Özet

Enjeksiyon kalıplama, polimerik parçalar üretmek için en yaygın üretim yöntemlerinden biridir. Genellikle, seri üretim için çoğu kalıp, uzun takım ömrü sağlayan takım çeliğinden veya daha düşük basınçlar için alüminyum alaşımından yapılır. Ancak, bu malzemelerden üretilen kalıpların önemli dezavantajları; uzun imalat süreçleri ve maliyetleridir. Özellikle istenilen geometri ve yüzey kalitesinin elde edilmesi klasik talaşlı imalat teknolojilerinin beraberinde elektriksel erozyon (EDM) veya elektro-kimyasal (ECM) işleme teknolojilerinin kullanılmasını gerektirir. Bu durum, prototip üretimi veya küçük partiler (küçük üretim hacmi) için takım maliyetlerinin üstesinden gelmeyi gerçekten zorlaştırır. Prototip için eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması önemli bir avantaj sağlasa da, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen parçaların mukavemeti genel olarak enjeksiyon kalıplamadan düşüktür ve ideal bir prototip üretimi için yeterli olmayabilir. Ancak, enjeksiyon kalıplarının eklemeli imalat yöntemi ile üretimi, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve düşük üretim hacimleri için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, iki yöntemi; düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ile 3D baskı/dijital ışık işleme yöntemlerini kalıp imalatı için birleştirmeye yöneliktir. Bu tür hibrit üretim, alüminyum/çelik kalıplardan daha ucuz bir alternatif sunmaktadır. Bu yöntemle imal edilen enjeksiyon kalıpları, yüksek verimlilik ve kısa teslim süreleri ile özellikle karmaşık geometrili parçalar üretme fırsatı sağlar. Bu çalışmada, düz-helisel çift plastik dişli (double gear) seçildi ve dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı bir tasarım yazılımı kullanılarak hazırlandı. Kalıp, UV duyarlı reçine kullanılarak basıldı ve yüksek yoğunluklu polietilen, düşük basınçlı bir enjeksiyon makinesi kullanılarak 3D yazdırılmış kalıba enjekte edildi. Ortaya çıkan parçaların yüzey kalitesine ve boyut doğruluğuna sahip olduğu görüldü. Sonuçlar, eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplamanın birleşiminin düşük miktarda üretim için sağlam bir hibrit yöntem olduğunu göstermektedir. 3D yazdırılmış kalıplar, hızlı takım üretimi sağlayan enjeksiyon sıcaklığını kontrol ederek birçok kez (10-100 adet) kullanılabilir.

1 Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Şhitkamil, 27310 Gaziantep
eyercioglu@gantep.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-9076-0972

1. Giriş

Enjeksiyon kalıplama, polimerik parçalar üretmek için en yaygın üretim yöntemlerinden biridir. Genellikle, seri üretim için çoğu kalıp, uzun takım ömrü sağlayan takım çeliğinden veya daha düşük basınçlar için alüminyum alaşımından yapılır. Ancak, bu malzemelerden üretilen kalıpların önemli dezavantajları; uzun imalat süreçleri ve maliyetleridir. Özellikle istenilen geometri ve yüzey kalitesinin elde edilmesi klasik talaşlı imalat teknolojilerinin beraberinde elektriksel erozyon (EDM) veya elektro-kimyasal (ECM) işleme teknolojilerinin kullanılmasını gerektirir. Bu durum, prototip üretimi veya küçük partiler (küçük üretim hacmi) için takım maliyetlerinin üstesinden gelmeyi gerçekten zorlaştırır [1]. Prototip için eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması önemli bir avantaj sağlasa da, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen parçaların mukavemeti genel olarak enjeksiyon kalıplamadan düşüktür ve ideal bir prototip üretimi için yeterli olmayabilir. Ancak, enjeksiyon kalıplarının eklemeli imalat yöntemi ile üretimi, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve düşük üretim hacimleri için önemli avantajlar sunmaktadır [2].

Hızlı takım imalatının (rapid tool manufacturing) temel amacı üretim maliyetini ve süresini azaltmak olsa da, aynı zamanda ürünleri özelleştirmeye yönelik artan ihtiyaçlar için de kullanılmaktadır. Günümüzde çoğu hızlı takım tipik olarak karmaşık şekiller elde etmeyi sağlayan eklemeli imalat (3B baskı) yöntemleri ile üretilmektedir [3].

Eklemeli imalat ilkesi, genellikle son frezeleme veya bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulmadan, malzemeyi katman katman, hassas geometrik şekillerde biriktirmek için bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanarak malzemeleri birleştirme sürecidir. Eklemeli imalat teknolojilerinin, sağladıkları avantajlara rağmen, uzun 3B baskı süresi, üretilebilecek parça sayısına kıyasla nispeten yüksek maliyet ve ön hazırlık süreçleri gibi birçok dezavantajı da vardır. Ayrıca, katmanların birbirine bağlanma mukavemeti ve muhtemel gözenekli yapısı, genellikle izotropik olmayan mekanik özelliklere neden olabilmekte ve orantılı olarak pürüzlü yüzeyler oluşturmaktadır. Bahsedilen sorunların tümü, eklemeli imalat yöntemi ile enjeksiyon kalıplamayı birleştirerek hızlı prototipleme için bir hibrit imalat yöntemi geliştirme fikrine yol açmıştır [4-5].

Birçok eklemeli imalat yöntemi (FDM, SLA, SLS, Binderjet, vb.) bu amaçla kullanılmakla beraber, Dijital Işık İşleme (DLP) yöntemi, yüzey kalitesi ve yüksek geometrik hassasiyeti nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir. Bu yöntem, 3B yazıcının parçanın kesitinin görüntüsünü reçine yüzeyine yansıttığı ve reçine polimerizasyon sürecini sağlamak için bir video UV ışık projektörünün kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerinden biridir.

Reçine, cihazın eksenine z eksenine doğru hareket ederken aynı anda katman katman ultraviyole ışınlarına sürekli olarak maruz kalması sonucunda sertleşmeye devam eder ve bu da nihayetinde parçanın yüksek bitirme hassasiyeti ve daha az kusurla tamamen inşa edilmesini sağlar [6]. Ancak, elde edilen parçanın mukavemeti ve özellikle enjeksiyon kalıplamada ihtiyaç duyulan sıcaklıklara dayanımı konusunda çalışmalar devam etmektedir.

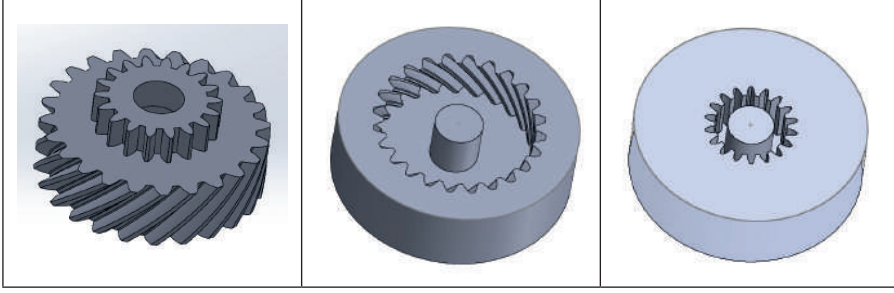
Bu çalışma, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve 3D baskı/dijital ışık işleme (DLP) yöntemlerinin birleştirilerek, hızlı kalıplama ile polimerik parça üretiminin fizibilitesini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma, zaman ve maliyeti minimum seviyelerde tutarken en iyi sonuçları elde edene kadar süreç parametrelerini kontrol etmeyi kapsamaktadır. Vaka çalışması için bir düz-helis çift dişli seçilmiş ve dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı bir tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıp, UV duyarlı reçine kullanılarak basılmış ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük basınçlı bir enjeksiyon makinesi kullanılarak 3D basılmış kalıba enjekte edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Vaka çalışması için düz-helis çift dişli seçilmiş olup, dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Konik dişlinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kalıp, enjeksiyon sonrası parçanın kalıptan kolayca çıkarılmasını sağlamak için gerekli eğim ve toleranslara sahip, üst ve alt kalıp olmak üzere iki parçalı olarak tasarlanmıştır. Kalıp bileşenlerinin katı modelleri Solidworks™ yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve 3B baskı için nihai modeller STL formatında üretilmiştir. Kalıp bileşenleri Anycubic™ Workshop Yazılımı kullanılarak baskıya hazırlanmıştır. Katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu sırasıyla 50 μm ve %100 olarak ayarlanmıştır. Bileşenlerin silindirik düz tabanları nedeniyle herhangi bir desteğe gerek duyulmamıştır. Şekil 1'de düz-helis çift dişlinin ve üst-alt kalıbının katı modelleri gösterilmektedir.

Tablo 1 Düz-helis çift dişlinin ölçüleri.

Dişli Tipi	Helisel dişli	Düz Dişli
Modül	1 mm	1 mm
Diş Sayısı	24	18
Mil Çapı	8 mm	8 mm
Basınç Açısı	20 °	20 °
Diş Geniliği	10 mm	5 mm



Şekil 1. Düz-belis çift dişli ve alt-üst kalıpların 3B katı modelleri.

Alt ve üst kalıbı oluşturulan dilimleme dosyası daha sonra DLP yazıcıya yüklenmiştir. Ön testlerden sonra, 60 saniyelik iki alt katman pozlama süresinin yapı plakasının yapışmasını sağlamak için yeterliydi olduğu tespit edilmiştir ve 8 saniyelik pozlama süresinin diğer katmanları başarıyla kürlediği görülmüştür. 3B Yazıcı LCD tabanlıdır ve UV entegreli bir ışık (dalga boyu 405nm) kaynağına sahiptir. Yazıcının XY çözünürlüğü 47 mikrondur (2560x1440) ve gücü 50W'tır. Bu şartlarda kalıpların baskı süresi 70 dakika olarak gerçekleşmiştir.

DLP baskı için ışığa duyarlı reçine olarak yüksek sıcaklık reçinesi (Phrozen TR300) kullanılmıştır. Reçinenin kimyasal bileşimi akrilat oligomer, Tris (2-hidroksi etil) izosiyanurat triakrilat, akrilolil morfolin, difenil (2, 4, 6-trimetil benzoil) fosfin oksit (<%5) ve pigment <%1 içerir. Tablo 2, üreticinin web sitesinde belirttiği gibi Phrozen TR300 reçinesinin mekanik ve fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Table 2. PHROZEN TR300 yüksek sıcaklık reçinesinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk	1.17 g/cm ³
Viskozite	160-250 Cp
Sertlik (yüzey)	80 Shore D
Kopma Mukavemeti	54 Mpa
Kopma Uzunluğu	2%
İzod darbe enerjisi	20.2 J/m
Çekme Modülü	2749 Mpa
Isıl Sapma Sıcaklığı HDT 0.45 MPa	156 °C
Cam geçiş Sıcaklığı, Tg	220 °C

3B baskı tamamlandıktan sonra kalıplar, yüzeylerindeki fazla reçineyi çıkarmak için yıkanmıştır. Yapışkan reçineyi çıkarmak için çözücü olarak izopropil alkol (IPA) kullanıldı ve bu işlem 4 dakika sürmüştür. Daha sonra yaklaşık 2 dakika boyunca 40W UV ışığı altında son kürleme gerçekleştirilmiştir. Yıkama ve son kürleme için Şekil 2'de gösterildiği gibi Anycubic yıkama ve kürleme makinesi kullanılmıştır.



Şekil 2. Anycubic DLP 3B photon 3Baskı ve yıkama-kürleme cihazları.

Enjeksiyon kalıbı alüminyum blok ve 3d baskıdan elde edilen kalıp çekirdeğinin montajı ile tamamlanmıştır. 3D yazdırılmış kalıplar alüminyum bloğun silindirik haznesine yerleştirilmiştir. Alüminyum bloğun amacı kalıp ek parçasını enjeksiyon basıncına karşı daha fazla desteklemektir. Şekil 3'te gösterilen düşük basınçlı bir enjeksiyon kalıplama makinesi dişlinin üretimi için kullanılmıştır.



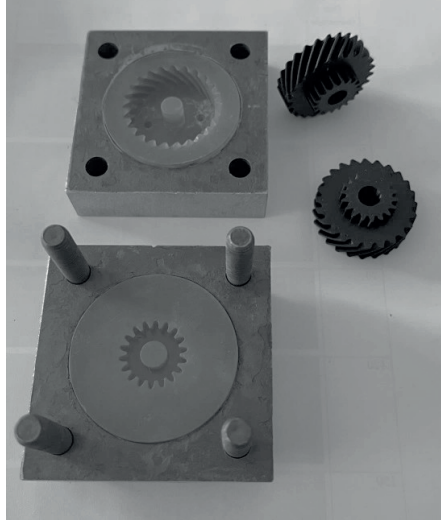
Şekil 3. Düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama makinası.

Dişli malzemesi için ticari yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) granüller kullanılmıştır. Enjeksiyon makinesinin haznesi polimer granüllerle doldurulmuş ve enjeksiyon sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. HDPE'nin erime noktası 131 °C'dir, ancak kalıbın doldurulmasının tamamlandığından emin olmak için enjeksiyon sıcaklığının daha yüksek olması gerekmektedir.

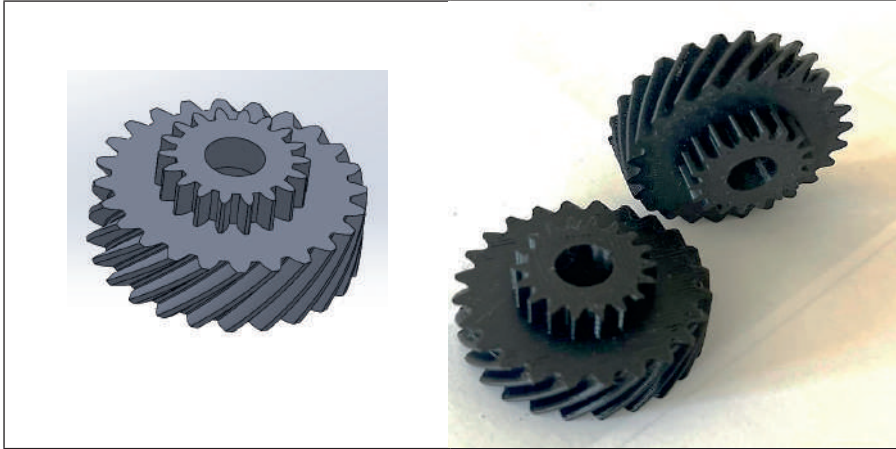
3. DeneySEL Bulgular ve Tartışma

Enjeksiyon sıcaklığı basitlik açısından deneme yanılma yöntemi ile bulunmuş, kalıp doldurma simülasyonları bu aşama kullanılmamıştır. Sonuç olarak, 185 °C enjeksiyon sıcaklığı kalıp dolumu uygun bulunmuştur. Enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon malzemesine, geometriye ve kalıbın yolluk sistemine bağlıdır. Daha uzun kalıp doldurma süresi için daha fazla ısıtma gerekebilir. Hem kalıp reçinesi ve hem de sıvı polimerin bozulma tehlikesi nedeniyle enjeksiyon sıcaklığı sınırlı tutulmalıdır. Enjeksiyondan sonra, herhangi bir büzülme boşluğu oluşumunun üstesinden gelmek için kalıp, enjeksiyon basıncı altında bir süre bekletilmiştir. Kalıp malzemesinin (polimer) düşük ısı iletkenliği nedeniyle, dişlinin kalıptan çıkarılması, dişlinin uygun şekilde katılaşması ve soğuması için yaklaşık 3 dakika beklenilmiştir. Bu süreler endüstriyel uygulamalar için simülasyonlarla optimize edilmelidir.

Enjeksiyon işlemi aynı kalıp kullanılarak 10 kez tekrarlanmıştır. Ancak kalıp, çalışmaya devam etmesini engelleyen bir hasara maruz kalmadan şeklini ve boyutlarını koruduğu görülmüştür. Aynı şekilde, enjekte edilen parçalar kabul edilebilir kalitede ve dış görünüşleri oldukça benzer şekilde elde edilmiştir. Şekil 4, alüminyum destek bloğu dahil olmak üzere kalıp montaj bileşenlerini gösterirken, Şekil 5 tasarlanan modeli ve enjekte edilen parçayı göstermektedir.



Şekil 4. Kalıp bileşenleri ve üretilen dişliler

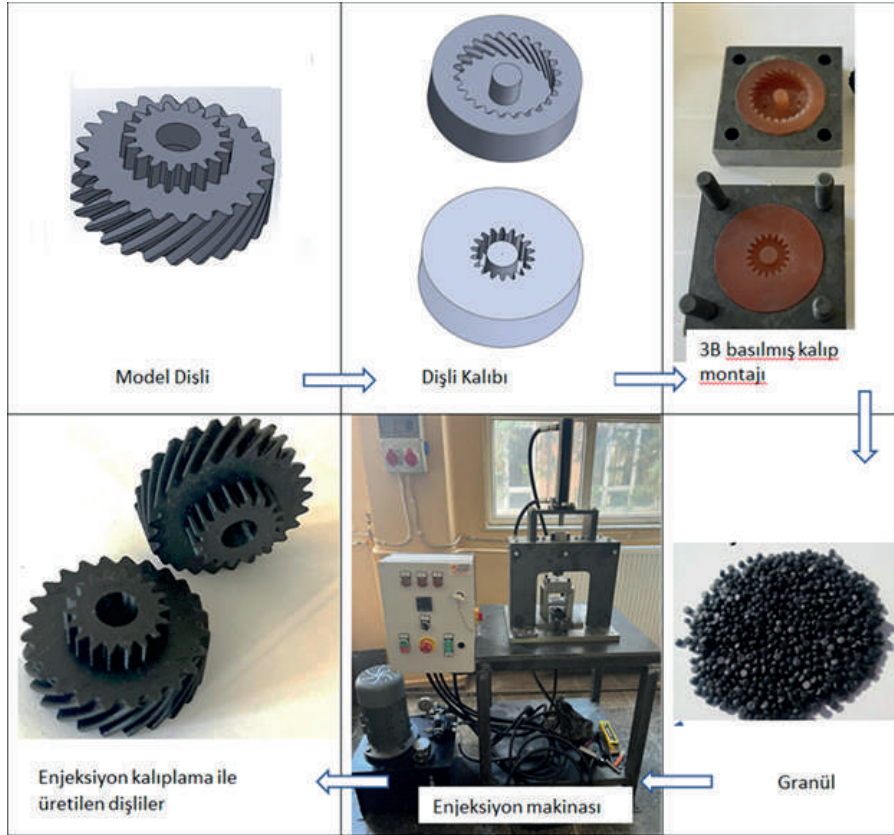


(a)

(b)

Şekil 5. Düz-helis çift dişli a) tasarlanan model b) enjeksiyon ile üretilen dişliler.

Eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hızlı enjeksiyon kalıp imalatının genel süreç döngüsü Şekil 6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hızlı enjeksiyon kalıp imalatının genel süreç döngüsü.

4. Sonuç

Bu çalışmada, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ile polimerik parça üretiminde, eklemeli imalat yöntemi ile hızlı kalıp üretiminin bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yukarıda aşamaları sunulan hibrit üretim yöntemi, alüminyum/çelik kalıplardan daha ucuz bir alternatif sunmaktadır. 3D Baskı/dijital ışık işleme (DLP)) ile imal enjeksiyon kalıpları, düşük maliyet ve daha kısa teslim süreleri ile karmaşık geometrili parçaları daha verimli üretme fırsatı sunmaktadır. Kalıp akış simülasyonları, konformal soğutma kanalları ile enjeksiyon kalıplama çevrim sürecinin düşürülmesi ve çeşitli katkılarla

UV reçinelerin daha yüksek sıcaklık ve mukavemete ulaştırılması ile kalıp ömrünün uzatılabilmesi (daha fazla sayıda parça üretimi) mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmaya sağlanan mali destek için Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projeleri Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Kaynakça

- 1- Bagalkot, D. Pons, D. Clucas, and D. Symons, “ A methodology for setting the injection molding process parameters for polymer rapid tooling inserts,” Rapid Prototyp. J., no. January, p. RPJ-10-2017-0217, Jan. 2019.
- 2- Daniele Fariolia , Matteo Stranoa , Francesco Briatico Vangosab , Veronica Geraldine Zaragozac , Andrea Aicard, Rapid tooling for injection molding inserts, 24th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2021).
- 3- C. M. Cheah, C. K. Chua, C. W. Lee, C. Feng, and K. Totong, “Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 25, no. 3–4, pp. 308–320, 2005.
- 4- Hegab,H.A, design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys; a review, manufacturing review.2016 ,3,11.
- 5- Guardia, L, Fiore, O , Lovo Italo, P, De Camargo, L, Rejane, C, Carlos, C, Fortulan, A , 3D DLP additive manufacturing: printer and validation , 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, January, 2017.
- 6- VELLA A, ROCHMAN Arif, VELLA P, Rapid tooling development for low volume injection molding of cosmetic compacts, ESAFORM 2023 Materials Research Forum LLC Materials Research Proceedings 28 (2023) 207-216.

Fused Deposition Modeling (Fdm): Theory, Application, and Innovative Approaches

Zihni Alp Çevik¹

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM), one of the most widely used additive manufacturing technologies, has gained significant attention due to its cost-effectiveness, flexibility in material selection, and ease of use. This method involves the layer-by-layer deposition of thermoplastic filaments melted through a nozzle to fabricate three-dimensional objects based on digital models. FDM is extensively utilized in both industrial and academic settings for prototyping and producing functional components across various sectors, including automotive, aerospace, biomedical engineering, and education. The process enables the creation of complex geometries that are difficult to achieve with traditional manufacturing methods, while also minimizing material waste. However, despite its advantages such as rapid prototyping, simplicity, and compatibility with a wide range of materials—including PLA, ABS, PETG, and fiber-reinforced composites—FDM has inherent limitations. These include anisotropic mechanical properties, surface roughness, limited dimensional accuracy, and potential printing errors such as warping, layer shifting, and nozzle clogging. Several process parameters, such as layer height, nozzle temperature, infill percentage, and build platform temperature, significantly influence the final product's quality and mechanical performance. Optimization of these parameters is crucial for improving part strength, dimensional accuracy, and surface finish. Recent advancements aim to enhance FDM's capabilities through innovations like continuous fiber reinforcement, 4D printing, and the use of recycled materials. This review highlights the theoretical background, working principles, materials, parameters, challenges, and application areas of FDM technology. It also emphasizes the importance of ongoing research in material development, process optimization, and system design to expand FDM's applicability beyond prototyping into serial production and high-performance industries.

1 Dr. Öğr. Üyesi Adıyaman University Besni, Vocational School, Department of Mechatronics, Adıyaman, Turkey: zcevik@adiyaman.edu.tr 0000-0003-3141-0160

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing, which refers to the production of three-dimensional (3D) objects, is a process in which materials are deposited layer by layer—i.e., through successive addition—to create physical 3D models. This method is based on dividing the model into thin layers and then fabricating the object stepwise, layer by layer, according to these divisions. Additive manufacturing offers numerous advantages as a modern fabrication technique, particularly due to its capability to produce highly complex geometries, including both micro- and macro-scale components that are otherwise difficult to manufacture. In this production method, the prototyping process is notably fast, and it also allows for the design and realization of customized products tailored to individual needs [1].

Fused Deposition Modeling (FDM), one of the most prominent additive manufacturing technologies and processes, has gained widespread visibility due to its relatively low cost, operational flexibility, and the ability to process a broad range of materials. Although FDM is often perceived as a recently developed technology, its origins date back to the late 1980s when it was first developed and commercialized by Stratasys Inc. In 1984, Charles Hull, a physics professor, became the first person to develop an advanced 3D printer [2]. The introduction of color printing began in 1995 with the development of the first color 3D printer. Around 2007, the proliferation of open-source platforms accelerated the development of 3D printers, followed shortly by the emergence of desktop or personal 3D printers.

By 2010, 3D printing had begun to see rapid growth driven by increased media exposure, rising industrial demand for prototypes, academic acceptance, decreasing costs, and an expanding variety of printable models and materials [3]. One of the primary factors contributing to this growth was the significant material waste associated with conventional subtractive manufacturing methods, such as chip formation and scrap generation [4]. In contrast, additive manufacturing involves minimal material loss during the production process.

2. PRODUCTION PROCESS

3D printing technology provides the opportunity to produce customized products that meet personal needs. Various techniques are available for both industrial and personal 3D printers, including Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP), and Fused Deposition Modeling (FDM). Among these, FDM (Fused Deposition Modeling) is the most used

technique in personal applications. In this method, filament materials are used as raw material.

As seen in Figure 1, computer-aided design software capable of creating 3D models is required for production with 3D printers. Among the most widely used programs are SolidWorks and AutoCAD. Additionally, web-based platforms such as Tinkercad, 123D Design, and Google SketchUp also offer accessible modeling capabilities. Alternatively, ready-to-print models can be obtained by scanning a person or object using 3D scanners. Once the model generation process is completed, the file must be converted into the STL (Standard Tessellation Language) format, which is the standard file format used in 3D computer-aided design, before being transferred to the 3D printer for manufacturing. After the transfer, a slicing process is carried out to divide the model into layers. Following this, the sliced data is transferred to the machine via an SD card, and the 3D printing process is performed based on this information [5].



Figure 1. Production process of 3D printers

Table: FDM Manufacturing Parameters [15]

Yığılma modelleme (prototipleme) özellikleri	
Weight of Produced Part (kg)	0.1-10
Minimum Cross-section (mm)	1.2-100
Capability of Producing Complex Shapes	High
Tolerance (mm)	0.3-2
Surface Roughness (μm)	75-100
Economic production quantity	1-100

3. COMPONENTS OF FDM SYSTEMS

The FDM printing machine and its components, consisting of mechanical and electronic components, are shown in Figure 2. These components and their descriptions are given below.

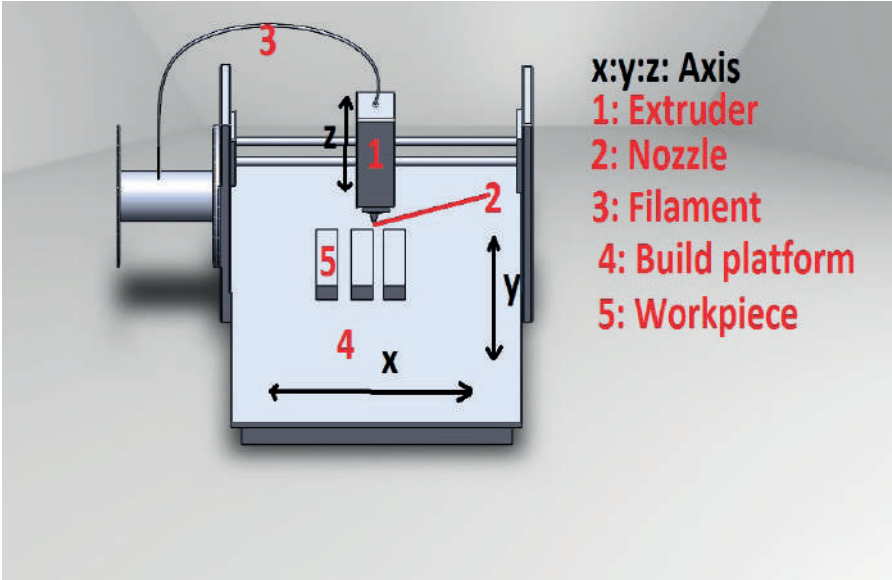


Figure 2. Schematic representation of production with FDM

Nozzle and Hotend: The part where the filament is melted, typically made from brass or stainless steel.

Extruder: The system responsible for feeding the filament into the hotend. It can be either direct drive or Bowden type.

Build Platform (Heated Bed): Ensures proper adhesion of the first layer and reduces warping issues.

Stepper Motors: Control movement along the X (left-right), Y (forward-backward), and Z (up-down) axes.

Cooling Fans: Facilitate rapid cooling of printed layers, thereby improving print quality.

Control Board: The main board that coordinates all components and serves as the interface between hardware and software.

4. MATERIALS USED (FILAMENTS)

There are many types of filaments used for 3D printing. In FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printers, the raw material used is thermoplastic filament. Each type of filament has distinct properties and is manufactured in various dimensions and diameters. These filaments, which are sold in spool form, are wound like a thin thread around a reel and then loaded into the 3D printer [8].

The filament processing mechanism can be briefly described as follows: The filament is pulled toward the hot end by the drive gears connected to the motor. It is then heated until it reaches a liquid or semi-liquid state. After being held at this state for a short period, the melted or semi-molten filament is extruded through the nozzle located at the print head. Following this, temperature control is performed via an indicator panel that shows whether the desired temperature has been reached. Finally, the molten material is deposited onto a heated build platform within a controlled chamber, where the three-dimensional object is formed layer by layer, completing the printing process [9]. The filament workflow is illustrated in Figure 3.

Among the most commonly used materials in 3D printing are polypropylene (PP), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyethylene (PE), polylactic acid (PLA), thermoplastic polyurethane (TPU), high-impact polystyrene (HIPS), polyvinyl alcohol (PVA), polycarbonate (PC), nylon (PA), polycaprolactone (PCL), PETG, and polyether ether ketone (PEEK). These materials are widely preferred due to their suitable mechanical properties, cost-effectiveness, and ease of printability [10,11,18,19,20].

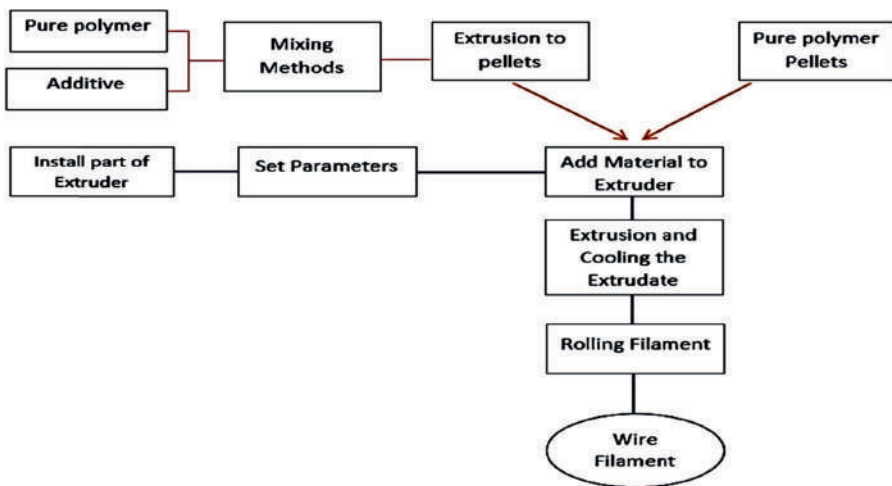


Figure 3. Filament workflow [16].

5. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF THE FDM PROCESS

Some of the advantages of the Fused Deposition Modeling (FDM) process can be listed as follows:

Simple Setup Procedures: The setup operations are relatively straightforward. It involves loading the filament spool and heating the device to the desired temperature.

No Special Training Required: The system is user-friendly and does not require any specialized training for operation.

Easy Post-Processing: Removing the printed part and cleaning the machine after the printing process is very simple.

Fast Printing Speed: Compared to conventional manufacturing methods, the printing speed is significantly faster. This is mainly due to the rapid heating of the nozzle to the required temperature, which accelerates the production process.

High Print Resolution: In terms of print clarity, FDM provides better resolution than traditional manufacturing techniques [6].

- Simplicity and Ease of Use
- Ease of Maintenance
- Lower Cost Compared to Other 3D Printing Technologies
- Less Material Waste
- Variety of Build Styles and Patterns
- Ability to Manufacture Components with Various and Complex Geometries

However, there are also several disadvantages associated with the FDM process:

- Rough or Grainy Surface Finish
- Limitations in Product Size
- Material Shrinkage During Cooling
- Relatively Low Build Speed Compared to Some Other Methods
- Anisotropic Mechanical Properties
- The mechanical strength varies depending on the direction of the layers.

- Reduced Mechanical Strength Compared to Conventional Manufacturing Technique [7]

The quality of materials produced by 3D printers can be categorized into three main stages: pre-processing (preparation phase), processing (printing phase), and post-processing [14]. In the FDM material production process, various issues that arise in composites, along with all factors affecting the quality and performance, are illustrated in detail in Figure 3.

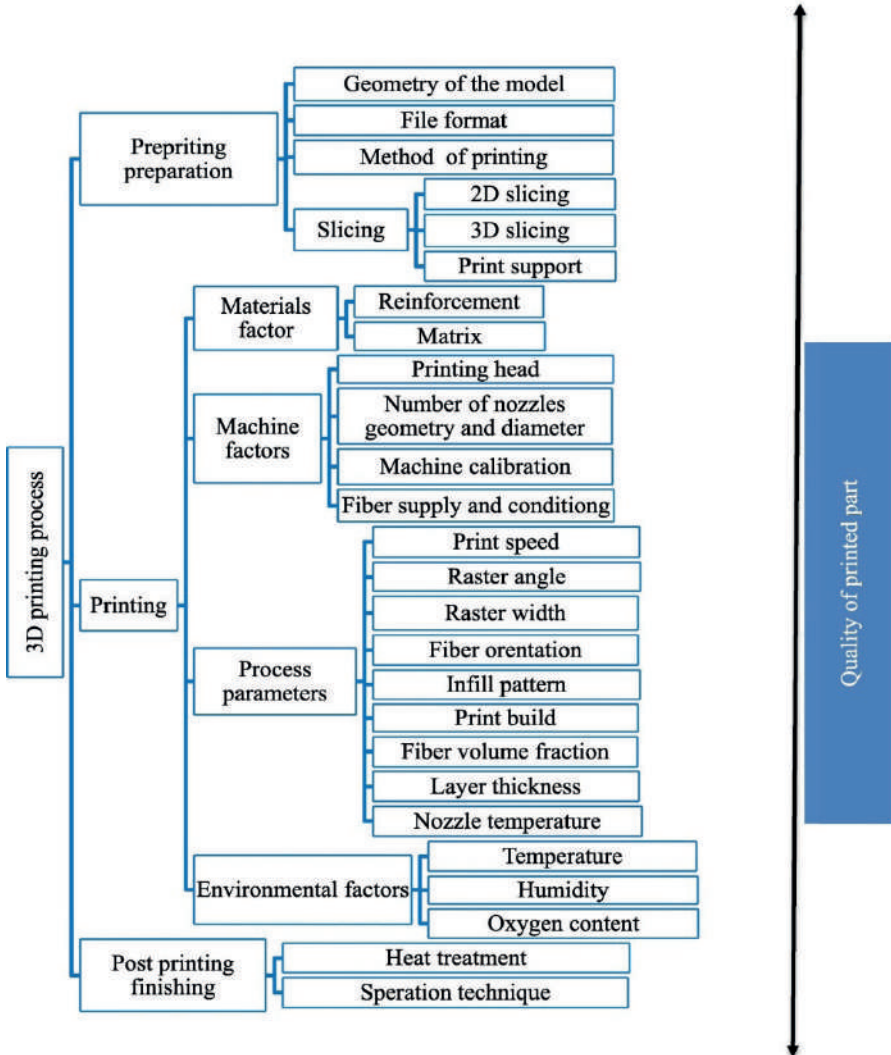


Figure 4. List of preparatory, machine, process and environmental factors affecting quality of 3D printed composites [13].

6. PRINTING PARAMETERS AND THEIR EFFECTS

Key parameters affecting the success of FDM printing include:

Layer Height: Thinner layers result in higher resolution.

Nozzle Size and Temperature: Varies depending on the material type.

Heated Bed: Affects initial layer adhesion.

Infill Percentage: Influences structural strength.

Support Structures: Necessary for overhanging surfaces.

Below are examples of printing parameters for different composite materials found in literature:

Table 2. Print Parameters for PLA Composites [8]

Print parameter	Value
Nozzle size	0.8 mm
Layer height	0.15 mm
Top and bottom solid layers	2
Perimeter	2
Filling pattern	Rectilinear
Filling angle	45
Infill percentage	80%
Infill overlap	21%
Nozzle temperature	200°C
Heated bed	45°C

Table 3. Print parameters for ABS reinforced CFRP composites [12].

Print parameter	Value
Nozzle size	0.35 mm
Layer height	0.2 mm
Top and bottom solid layers	1.2-1.5
Perimeter	2
pattern Filling	Rectilinear
Filling angle	45
Infill percentage	100%
Nozzle temperature	230°C
Heated bed	45°C

Table 4. Print parameters for PA12 composites [17].

Print parameter	Value
Nozzle size	0.4 mm
Layer height	0.2 mm
Printing speed	30 mm/s
pattern Filling	Rectilinear
Filling angle	45
Infill percentage	100%
Nozzle temperature	250°C
Heated bed	120°C

7. COMMON ERRORS AND SOLUTION PROPOSALS

Clogging: Nozzle cleaning should be performed carefully, and it is recommended to clean the nozzle after every printing operation. In addition, using high-quality filaments should be prioritized to prevent clogging.

Warping: This issue can be mitigated by increasing the build platform temperature or by using a brim structure during printing

Layer Shifting: The tension of the printer's belt mechanisms should be checked regularly to avoid misalignment between layers.

First Layer Issues: Proper bed leveling should be ensured, and accurate Z-offset calibration must be performed for optimal first-layer adhesion.

STL File Errors: During the conversion to STL format, complex geometries, such as topological objects, may cause errors. Therefore, it is essential to verify and validate the STL file before printing [21].

8. INDUSTRIAL AND EDUCATIONAL APPLICATIONS

Parts produced via Fused Deposition Modeling (FDM) are primarily used for prototyping but have also found applications across various industrial sectors today. Some of the most common application areas include:

Automotive Industry: FDM is frequently used in the production of assembly jigs, crash-test plastic components, and prototype parts.

Aerospace Industry: In aircraft manufacturing, FDM is utilized to reduce the weight of structural components while enhancing their mechanical strength. It is also employed in the cost-effective production of lightweight parts for expensive aerospace systems [22,23].

Biomedical Field: Due to its ability to produce customized medical devices, FDM has rapidly gained popularity in this sector. It is widely used in the fabrication of orthopedic implants, prosthetics, and various dental products related to oral health [24].

Education: 3D printing plays a crucial role in education, particularly in engineering and design disciplines. It facilitates the development of analytical thinking and practical skills among students, from primary to secondary schools. At the university level, 3D printers are extensively used in engineering education and project-based learning. Moreover, numerous academic studies focus on the mechanical, thermal, and tribological properties of materials produced via FDM technology [25].

9. RESULTS AND EVALUATION

In this section of the book, Fused Deposition Modeling (FDM), one of the most widely used methods in additive manufacturing, is discussed in detail. FDM is a fabrication technique based on the principle of extruding thermoplastic filaments through a nozzle after heating, followed by building the desired object layer-by-layer. It is currently employed extensively by both individual users and industrial sectors.

The main advantages of the FDM method include low equipment costs, ease of use and maintenance, minimal material waste, the ability to produce highly complex geometries, and compatibility with a wide range of materials. Due to these characteristics, FDM holds significant importance in prototyping and design processes. It is actively utilized across various fields such as automotive, aerospace, biomedical engineering, and education, where it is used to manufacture lightweight structural components, prosthetics, dental products, educational tools, and many other items.

When considering its limitations, several disadvantages can be identified, including rough surface finish, anisotropic material behavior, restrictions on part size, relatively slow production speed, and mechanical properties that are generally inferior compared to those achieved by conventional manufacturing techniques. Additionally, printing errors encountered during the process—such as nozzle clogging, warping, and layer shifting—are critical quality control issues that can potentially be resolved through parameter optimization.

FDM technology has rapidly expanded due to the increasing availability of open-source software, the growing variety of filament materials, and the transformation of 3D printers into consumer-level devices. In the future, advancements such as the incorporation of continuous fiber-reinforced

composites, 4D printing technologies, and the utilization of recycled materials are expected to further enhance the capabilities of FDM. Ongoing research in these areas aims to enable FDM not only for prototyping but also for serial production applications.

In conclusion, FDM occupies a significant place within the field of additive manufacturing due to its accessibility, flexibility, and cost-effectiveness. However, for the technology to produce higher quality, durable, and functional parts in the future, further research is required in areas such as material science, process parameter optimization, and system design. As the technology continues to expand into educational and academic settings, it is expected to play a pivotal role in shaping the manufacturing methods of the future.

References

1. Ren, J., Zhang, Y., Zhao, D., Chen, Y., Guan, S., Liu, Y., ... & Chen, W. (2022). Strong yet ductile nanolamellar high-entropy alloys by additive manufacturing. *Nature*, 608(7921), 62-68.
2. Ntboxmag, (2017). 3D Yazıcının Mucidi: Chuck HULL. <http://www.ntboxmag.com>
3. Karaduman, H. (2018). SOYUTTAN SOMUTA, SANALDAN GERÇEĞE: ÖĞRETMEN ADAYLARININ BAKIŞ AÇISIYLA ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 18(1), 273-303.
4. Yılmaz, F., Arar, M. E., & Koç, E. (2013). 3D baskı ile hızlı prototip ve son ürün üretimi.
5. Demir, K., Demir, E. B. K., Çaka, C., Tuğtekin, U., İslamoğlu, H., & Kuzu, A. (2016). Üç boyutlu yazdırma teknolojilerinin eğitim alanında kullanımı: Türkiye'deki uygulamalar. *Ege Eğitim Dergisi*, 17(2), 481-503.
6. Finnes, T. (2015). High definition 3D printing—comparing SLA and FDM printing technologies. *The Journal of Undergraduate Research*, 13(1), 3.
7. Karimi, A., Rahmatabadi, D., & Baghani, M. (2024). Various FDM mechanisms used in the fabrication of continuous-fiber reinforced composites: a review. *Polymers*, 16(6), 831.
8. Ayyappan, V., Rangappa, S. M., TENGsuthiwat, J., Fiore, V., & Siengchin, S. (2024). Investigation of thermo-mechanical and viscoelastic properties of 3D-printed Morinda citrifolia particle reinforced poly (lactic acid) composites. *Polymer Composites*, 45(6), 5372-5385.
9. Rahmatabadi, D., Ghasemi, I., Baniassadi, M., Abrinia, K., & Baghani, M. (2023). 4D printing of PLA-TPU blends: Effect of PLA concentration, loading mode, and programming temperature on the shape memory effect. *Journal of Materials Science*, 58(16), 7227-7243.
10. Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93-103.
11. Cheng, P., Peng, Y., Li, S., Rao, Y., Le Duigou, A., Wang, K., & Ahzi, S. (2023). 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110450.
12. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.

13. Kabir, S. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232, 111476.
14. Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., Goh, G. L., & Yeong, W. Y. (2020). Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113-133.
15. Ashby, M. F., & Johnson, K. (2013). *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Butterworth-Heinemann.
16. Patel, R., Jani, S., & Joshi, A. (2023). Review on multi-objective optimization of FDM process parameters for composite materials. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5), 2115-2125.
17. Liao, G., Li, Z., Cheng, Y., Xu, D., Zhu, D., Jiang, S., ... & Zhu, Y. (2018). Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*, 139, 283-292.
18. Farina, I., Singh, N., Colangelo, F., Luciano, R., Bonazzi, G., & Fraternali, F. (2019). High-performance nylon-6 sustainable filaments for additive manufacturing. *Materials*, 12(23), 3955.
19. Hanitio, E. W., Lutfhyansyah, N. R., Efendi, B. M., Mardiyati, Y., & Steven, S. (2023). From Electronic Waste to 3D-Printed Product, How Multiple Recycling Affects High-Impact Polystyrene (HIPS) Filament Performances. *Materials*, 16(9), 3412.
20. Letcher, T. (Ed.). (2020). *Plastic waste and recycling: Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions*. Academic Press.
21. Demir, S., Sezer, H. K., & Özdemir, V. (2018). Topolojik nesnelerin FDM yöntemiyle üretimi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2), 76-87.
22. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., ... & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of cleaner production*, 135, 1559-1570.
23. Wang, Y. C., Chen, T., & Yeh, Y. L. (2019). Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 4059-4069.
24. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
25. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Vc Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.

Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Uygulama Temelli Karşılaştırılması

Hakan Çandar¹

Özet

Bu çalışmada, modern imalat süreçlerinde önemli bir yere sahip olan geleneksel olmayan kesme yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Lazer kesim, tel erazyon (EDM), plazma kesim ve aşındırıcı su jeti (ASJ) teknolojileri; temel çalışma prensipleri, uygulama alanları, avantajları, dezavantajları ve sınırlamaları açısından sistematik olarak incelenmiştir. Her bir yöntemin teknik özellikleri; iş parçası malzemesi, kalınlık aralığı, geometrik karmaşıklık, yüzey kalitesi gereksinimi, işlem süresi ve maliyet gibi parametrelere göre değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, söz konusu yöntemlerin farklı endüstriyel uygulamalardaki etkinliği karşılaştırmalı örneklerle analiz edilmiştir. Lazer kesim, yüksek hassasiyet ve ince kesim gerektiren uygulamalarda; tel erazyon, iletken ve karmaşık geometrili parçalarda; plazma kesim, kalın ve büyük çelik yapıların hızlı işlenmesinde; su jeti ise ısıl etkiden kaçınılması gereken kırılğan malzemelerde öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, üretim sürecine özgü gereksinimlere uygun yöntemin doğru seçilmesinin önemini vurgulamakta; söz konusu teknolojilerin modern ve sürdürülebilir imalat süreçlerindeki stratejik rolünü ortaya koymaktadır.

1. Giriş

İmalat sanayii, insanlık tarihinin en köklü mühendislik alanlarından biridir ve teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli bir evrim içersindedir. Özellikle 20. yüzyılda yaşanan endüstriyel dönüşüm, üretim yöntemlerinin çeşitlenmesini beraberinde getirmiş; farklı malzemeler, daha karmaşık geometriler ve artan kalite beklentileri imalat süreçlerine yeni yaklaşımların dahil edilmesini zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan

1 Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Şehitkamil, 27310 Gaziantep, candar@gantep.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-3697-1584

geleneksel imalat yöntemleri başta talaşlı imalat olmak üzere dövme, haddelme, ekstrüzyon ve kaynak gibi işlemler bugün hâlâ üretim sektörünün büyük bölümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle seri üretime uygunlukları, göreceli düşük maliyetleri ve geniş uygulama alanlarıyla birçok mühendislik problemi geleneksel yöntemlerle etkili biçimde çözülebilmektedir. Ancak, gelişen teknolojiyle birlikte mühendislik parçalarının yalnızca üretilmesi değil, aynı zamanda yüksek hassasiyetle, karmaşık geometrilerle ve özel malzeme sınırlamalarıyla üretilmesi gerekliliği doğmuştur. Bu da geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlayan yeni üretim ihtiyaçlarını ortaya çıkarmıştır. Örneğin, 50 mm boyutlarında kompakt bir parçaya 1 mm çapında, yüksek derinlikte ve hassas toleransta bir delik delmek ve bu deliğin iç yüzeyini pürüzsüz bir şekilde parlatmak, klasik tezgâh sistemleriyle hem zor hem de maliyetli bir süreçtir. Yine, optik cihazlar için kullanılan cam yüzeylerde keskin köşelere sahip, detaylı geometrik kesimlerin yapılması gerektiğinde, malzemenin kırılgan yapısı nedeniyle geleneksel yöntemler ciddi deformasyon ve çatlama riskleri taşır. Aynı şekilde, çok katmanlı kompozit malzemelerde geleneksel mekanik kesme sırasında oluşan tabaka ayrışmaları, çapaklanma veya ısıl hasarlar ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir. Mikron düzeyinde detay içeren mikro parçaların üretiminde de konvansiyonel yöntemler, gerekli hassasiyeti ve kontrolü sağlamakta yetersiz kalır. Bu tür örnekler, geleneksel yöntemlerin yalnızca belirli sınırlar içinde etkin olduğunu; bu sınırların ötesine geçildiğinde farklı fiziksel prensiplere dayanan, daha karmaşık üretim teknolojilerine ihtiyaç duyulduğunu açıkça ortaya koymaktadır. İşte bu noktada devreye geleneksel olmayan imalat yöntemleri girmektedir. Bu yöntemler, yaklaşık 80 yıllık bir geçmişe sahip olup ilk olarak nükleer enerji, havacılık ve savunma sanayii gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla gelişerek daha yaygın hâle gelen bu yöntemler, günümüzde tıbbi cihaz üretiminden elektronik ve otomotive kadar birçok sektörde önemli bir yer edinmiştir.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri, temelde iki yönden geleneksel yöntemlerden ayrılır. Birincisi, kullanılan enerji türüdür. Geleneksel imalat işlemleri büyük oranda mekanik enerjiye dayanırken, bu yeni nesil yöntemler termal, kimyasal, elektriksel, elektro-kimyasal veya hidrodinamik enerji türlerini kullanır. İkinci temel fark ise, takım ile iş parçası arasında doğrudan mekanik temasın bulunmamasıdır. Bu temas eksikliği sayesinde takım aşınması en aza indirgenir, iş parçasında deformasyon oluşmaz ve çok daha yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir. Ayrıca, temas olmadan gerçekleşen bu işlemler sayesinde kırılgan, ince ya da karmaşık yapıları malzemeler zarar görmeden işlenebilir. Bu teknoloji ailesine elektriksel boşalma ile işleme (EDM), lazer işleme, elektron ışını ile işleme, ultrasonik işleme, kimyasal

aşındırma, elektro-kimyasal işleme ve aşındırıcı su jeti gibi çeşitli yöntemler dâhildir. Her biri farklı enerji prensiplerine ve uygulama alanlarına sahip olan bu teknikler, üretim süreçlerinde yüksek hassasiyet, malzeme esnekliği ve düşük deformasyon avantajları sağlar.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri içinde, kesme işlemleri özel bir yer tutmaktadır. Çünkü üretimin temel adımlarından biri olan kesme, yalnızca biçimlendirme değil, montaj öncesi hazırlık ve son işlem süreçlerinde de kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda lazer kesim, plazma kesim, tel erozyon (Wire-EDM) ve aşındırıcı su jeti kesim gibi yöntemler, geleneksel kesme tekniklerinin yetersiz kaldığı alanlarda devreye girerek yüksek hassasiyet, karmaşık şekil işleme ve termal deformasyon kontrolü gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin her üretim senaryosunda en uygun çözüm olduğunu söylemek mümkün değildir. Geleneksel olmayan kesme teknikleri genellikle yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri, özel operatör bilgi ve donanım gereksinimleri gibi sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, hangi yöntemin kullanılacağına karar verirken; malzeme türü, parça geometrisi, üretim hacmi, tolerans gereksinimi ve yüzey kalitesi gibi faktörlerin bir arada değerlendirilmesi gerekir.

Bu bölümde, söz konusu dört geleneksel olmayan kesme yöntemi; lazer kesim, plazma kesim, tel erozyon ve aşındırıcı su jeti kesim ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Her bir yöntemin teknik çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları incelenecek; ardından karşılaştırmalı analizlerle hangi koşullarda hangi yöntemin tercih edilmesinin daha uygun olacağına dair yol gösterici bilgiler sunulacaktır.

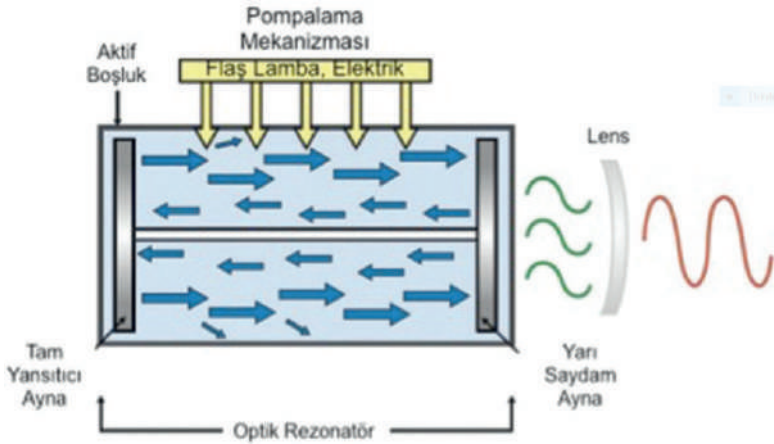
2. Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerine Genel Bakış

2.1. Lazer Kesim Yöntemi

Lazer kesim teknolojisi, 1960'lerden itibaren endüstriyel imalatta yerini almış ve özellikle son yıllarda ileri teknoloji üretim süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Lazer kelimesi, İngilizce "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ifadesinin kısaltmasıdır ve bu teknoloji, yüksek yoğunluklu ve koherent (uyumlu) ışık demetlerinin kullanılmasıyla malzeme üzerinde son derece hassas ve kontrollü kesim yapılmasını sağlar [1].

Lazer ışınının oluşumu, atom veya moleküllere dışarıdan enerji verilmesiyle başlar. Bu enerji; ısı, elektriksel akım veya kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla sağlanabilir. Enerji verilmesi sonucunda, atomun elektronları alt enerji seviyelerinden üst enerji seviyelerine çıkar. Enerji kaynağı kesildiğinde,

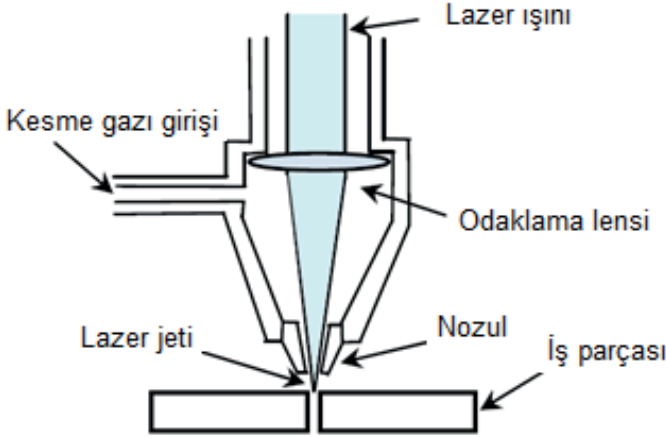
elektronlar daha kararlı olan alt seviyeye döner ve bu esnada elektromanyetik dalga, yani foton yayımlarlar. Albert Einstein, 1917 yılında yaptığı çalışmada, uygun koşullar sağlandığında yayılan bu fotonların başka atomları da aynı şekilde uyarabileceğini ifade etmiştir. Bu sürece “uyarılmış emisyon” denir ve lazer ışığının temel fiziksel prensibini oluşturur. Uygun ortamdan kasıt, yeterli enerji kaynağı ve fotonların çoğalmasını sağlayan bir geri besleme (feedback) mekanizmasının varlığıdır. Bu mekanizma Şekil 1 de gösterildiği gibi genellikle iki aynadan oluşan optik rezonatör ile sağlanır; biri tam yansıtıcı, diğeri yarı saydamdır. Bu yapı içinde fotonlar defalarca yansır, uyarılmış emisyonla çoğalır ve sonunda yarı saydam aynadan odaklanmış, koherent, tek dalga boyuna sahip ve yüksek yoğunluklu bir lazer ışını çıkar [2].



Şekil 1 Tipik bir lazer rezonatörünün şematik gösterimi [3]

Lazer kesim işlemi Şekil 2’de gösterildiği üzere temel olarak lazer ışını, odaklama lensi, basınçlı gaz girişi ve nozul gibi ana bileşenlerden oluşur. Kesim sırasında, nozuldaki basınçlı gaz, lazer ışını ile hizalanarak ya da belirli bir açıyla püskürtülür. Bu gazlar aktif (örneğin oksijen, azot) veya soygazlar (helyum, argon) olabilir ve seçimi, kesim yapılacak malzemenin türü ile istenen kesim kalitesine bağlıdır [4], [5]. Özellikle oksijen kullanımı, oksidasyon reaksiyonu sayesinde kesim sıcaklığını artırarak işlemin hız ve verimliliğini yükseltir; ancak bu yanma reaksiyonu, kesim bölgesinde daha pürüzlü bir yüzey oluşmasına yol açabilir. Buna karşılık, soygazlardan olan azot gazı daha temiz ve pürüzsüz kesim sağlar [6]. Lazer ışınları ise darbe modunda (pulsed) veya sürekli dalga (continuous wave - CW) olarak uygulanabilir. Endüstride lazer kesim, odaklanmış ve yüksek enerjili ışın demetinin CNC

kontrollü bir sistemle iş parçasının yüzeyine yönlendirilmesiyle gerçekleşir. Lazer ışını, malzemenin yüzeyinde yoğun bir ısı kaynağı görevi görerek, malzemenin erime noktasına ulaştırılmasını, eritilmesini, buharlaştırılmasını veya kontrollü oksidasyon yoluyla kesilmesini sağlar. Kesim esnasında eriten malzemenin kesim bölgesinden uzaklaştırılması ise nozuldan püskürtülen yardımcı gazlar sayesinde gerçekleşir. Bu parametrelerin doğru seçimi, hem kesim verimliliğini hem de ürün kalitesini doğrudan etkiler.



Şekil 2 Lazer Işını ile Kesim Prensibi [4]

Lazer kesim teknolojisinde farklı lazer türleri kullanılmakta olup, her biri belirli malzeme türleri ve uygulamalar için farklı avantajlar sunar. Temel olarak katı, sıvı ve gaz halindeki aktif ortamlara göre sınıflandırılan lazerler arasında en yaygın olanları CO₂ lazer, fiber lazer ve Nd:YAG lazerlerdir. CO₂ lazerler genellikle 10600 nm dalga boyunda çalışır ve metal olmayan malzemelerde (ahşap, plastik, deri, tekstil gibi) yüksek kesim kalitesi ve hız sağlar. Fiber lazerler 1060–1080 nm dalga boyunda olup, özellikle metal kesiminde yüksek enerji verimliliği, düşük bakım gereksinimi ve hızlı kesim kabiliyeti ile öne çıkar. Nd:YAG lazerler ise 1064 nm dalga boyunda olup, mikro ve hassas kesim işlemlerinde tercih edilir ancak genellikle diğerlerine kıyasla daha düşük enerji verimliliğine sahiptir. Lazerin kesim performansı, güç, dalga boyu, odaklama hassasiyeti ve kullanılan yardımcı gaz gibi parametrelere bağlıdır. Yardımcı gaz seçimi (örneğin azot, oksijen, argon) kesim kalitesini, hızı ve malzemenin kimyasal yapısını doğrudan etkiler. Endüstriyel uygulamalarda malzeme türü ve üretim gereksinimlerine uygun lazer türü ve parametrelerin seçimi kritik öneme sahiptir. Tablo 1’de farklı

lazer türlerinin temel özellikleri, avantajları, dezavantajları ve tipik uygulama alanları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [7], [8].

Lazer kesimin en önemli avantajlarından biri, yüksek hızda kesim yapabilme yeteneğidir. Ayrıca, parça üzerinde birbirinden bağımsız ve karmaşık geometriler arasında hızlı geçişler sağlanması da lazer kesimin öne çıkan özelliklerindendir. Çok ince kesimler ve delik açma işlemlerinde yüksek hassasiyet sunması, ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) oldukça dar olması ve çok çeşitli malzeme türlerinde uygulanabilirliği, lazer kesim teknolojisinin temel avantajları arasında yer alır. Metal, plastik, seramik, cam ve kompozit gibi farklı malzemelerin lazerle kesilmesi mümkündür. CNC tabanlı kontrol sistemleri sayesinde karmaşık, tekrarlanabilir ve hızlı kesimler gerçekleştirilir. Bu avantajlar sayesinde lazer kesim, otomotiv endüstrisinde şasi parçalarının üretiminde, havacılıkta titanyum alaşımlarından türbin kanatlarının imalatında, elektronik sektöründe devre kartı kesimlerinde ve medikal alanda implant ile cerrahi alet üretiminde tercih edilmektedir [4].

Tablo 1. Farklı Lazer Türlerinin Temel Özellikleri ve Endüstriyel Kullanım Alanları [4]

Lazer Türü	Dalga Boyu (nm)	Maksimum Güç (kW)	Verimlilik (%)	Uygulama Alanları	Avantajlar	Dezavantajlar
CO ₂ Lazer	10600	100	%10 - %20	Metal olmayan malzemeler, metal kesim (ince metaller)	Yüksek güç çıkışı, iyi kesim kalitesi, yaygın kullanım	Düşük verimlilik, büyük sistem boyutu
Fiber Lazer	1070	20	%25 - %30	Metal kesimi, hassas kesim	Yüksek verimlilik, küçük sistem, düşük bakım ihtiyacı	Sınırlı güç aralığı, maliyet yüksek olabilir
Nd:YAG Lazer	1064	6	%5 - %15	Mikro kesim, hassas işlemler	Yüksek yoğunluklu ışın, kompakt yapı	Düşük verimlilik, sınırlı güç çıkışı

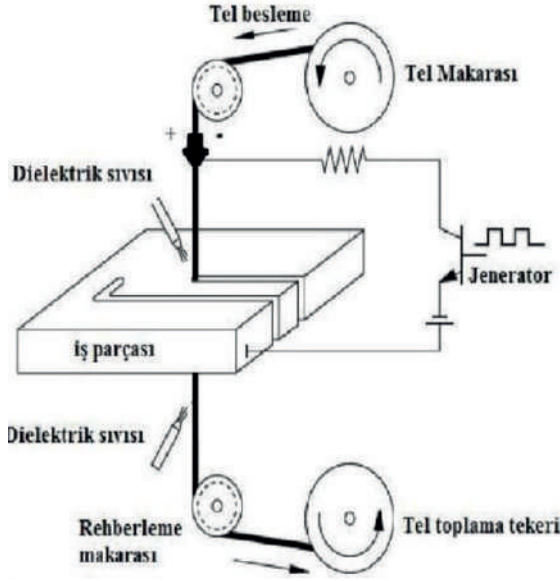
Lazer kesim teknolojisi birçok avantajına rağmen bazı dezavantajlar ve sınırlamalara da sahiptir. Öncelikle, sistemlerin bakım gereksinimleri ve yüksek enerji tüketimi, işletme maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle kalın ve yüksek yansıtıcı özelliklere sahip malzemelerde, örneğin kalın alüminyum plakalar gibi, lazerin kesim etkinliği belirgin şekilde azalır. Bu nedenle lazer kesim genellikle en fazla 20-30 mm kalınlığa kadar olan malzemelerde kullanılabilir. Kesim sırasında malzeme yüzeyinde oluşan yüksek ısı, mikroyapısal değişikliklere, sertleşmeye veya mikroçatlaklara yol açabilir; bu da hassas mekanik özelliklerin korunmasının

kritik olduğu uygulamalarda önemli bir sorun oluşturur. Ayrıca, lazer ışınlarının odaklama lensinden geçtikten sonra kesim bölgesine açılı olarak gelmesi, kesme kalınlığını sınırlamanın yanı sıra kerf açılanmasına neden olur. Lazer ışınının kesim bölgesinde belirli bir hacme yayılması nedeniyle kesim hattı beklenenden daha geniş olur ve bu durum, çok hassas toleransların gerektiği durumlarda dezavantaj yaratır. Tüm bu nedenlerle, lazer kesim yüksek hassasiyet ve malzeme özelliklerinin korunmasının kritik olduğu parçalarda dikkatle uygulanmalı, özellikle kalın ve yüksek yansıtıcılı malzemelerde alternatif yöntemler tercih edilmelidir.

2.2. Tel Erezyonla Kesme Yöntemi

Tel erezyonla kesme, elektriksel deşarj prensibine dayanan, yüksek hassasiyet ve karmaşık geometrilerin işlenmesine olanak sağlayan bir kesme teknolojisidir. Tel erezyon yöntemi, genellikle elektriksel olarak iletken malzemelerin işlenmesinde tercih edilir ve özellikle sert, sertleştirilmiş metallerin veya karmaşık şekilli parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır [9]. Bu yönüyle sert parçaların işlem öncesi ısıl işlem ile yumuşatılması gerekliliğini ortadan kaldırır.

Tel erezyonla kesimin temel çalışma prensibi, iş parçası ile sürekli hareket eden ince bir tel elektrot arasında kontrollü elektrik boşalmaları oluşturarak malzemenin küçük parçacıklar halinde eritilmesi ve buharlaştırılmasıdır (Şekil 3). Elektriksel boşalmalar (kıvılcımlar), iş parçası yüzeyi ile tel arasında oluşan çok yüksek sıcaklıklar (10,000 °C'ye kadar) sayesinde lokal erime ve buharlaşma meydana getirir. Bu süreç, temas gerektirmeden malzemenin kesilmesini sağlar ve mekanik stres yaratmaz [10]. Kesim esnasında, tel sürekli olarak makineden beslenir ve telin kesim hattı boyunca hareketi sağlanır; bu sayede tel aşınması minimize edilir ve istenilen kesim geometrisi elde edilir.



Şekil 3 Tel erzyon mekanizması

Tel elektrot, tel erzyon işleminin en kritik bileşenlerinden biridir. Genellikle bakır, pirinç veya tungsten alaşımları gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemeler kullanılır. Tel elektrottan beklenen temel özellikler; yüksek elektriksel iletkenlik, aşınma ve crimeye karşı dayanıklılık, mekanik sağlamlık ve düşük termal genişleme katsayısıdır. Bu özellikler, özellikle yüksek sıcaklıklarda kararlı kıvılcım oluşumu ve hassas kesim için büyük önem taşır [11]. Tel çapı genellikle 0.02 mm ile 0.3 mm arasında değişir; daha ince tellerle daha hassas kesimler yapılabilirken, kopma riski de artmaktadır.

Kesim işlemi sırasında tel ve iş parçası arasındaki boşluk, çoğunlukla deiyonize su olmak üzere bir dielektrik sıvı ile doldurulur. Bu sıvı, üç temel işleve sahiptir: kıvılcım oluşumunu kontrol altına almak, tel ile iş parçası arasında yalıtkanlık sağlamak ve işlem sırasında oluşan eriyik parçacıkları sistemden uzaklaştırmak. Dielektrik sıvının özellikleri (iletkenlik, sıcaklık, viskozite) kesim kalitesini ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler [12]. En yaygın kullanılan sıvı olan deiyonize su; düşük iletkenliği, yüksek soğutma kapasitesi ve çevresel güvenliği sayesinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, sıvının iletkenliği zamanla artabileceği için filtrasyon sistemiyle sürekli yenilenmesi ve izlenmesi gereklidir [13].

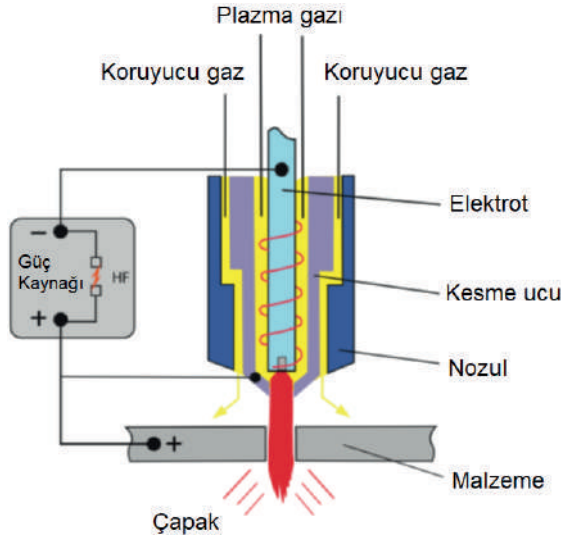
Tel erzyon yöntemi, çok ince kesim hattı (kerf) ve yüksek yüzey kalitesi sunar. Kerf açılmasının minimal olmasının temel sebebi, kullanılan telin çok ince olması ve elektriksel boşalmaların kontrollü oluşmasıdır.

Bu sayede mikron seviyesinde hassas kesimler mümkündür. Tel erzyonla kesim, özellikle karmaşık şekilli kalıpların, ince dişlilerin ve hassas parçaların üretiminde tercih edilir [14]. Bununla birlikte, tel erzyon yöntemi sadece elektriksel olarak iletken malzemelerle sınırlıdır. Ayrıca, kesim hızı lazer kesime kıyasla genellikle daha düşüktür ve telin aşınması nedeniyle malzeme ve tel maliyeti artabilir. Enerji tüketimi ve dielektrik sıvının yönetimi de dikkate alınması gereken diğer faktörlerdir. Ancak yüksek hassasiyet, yüzey kalitesi ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesi, tel erzyonu birçok yüksek teknoloji uygulamasında vazgeçilmez kılar.

2.3. Plazma Ark ile Kesme

Plazma ark kesme (Plasma Arc Cutting – PAC), yüksek sıcaklıktaki iyonize gaz (plazma) kullanılarak elektriksel olarak iletken metallerin kesilmesini sağlayan termal bir kesme yöntemidir. Bu teknoloji, özellikle kalın ve yüksek iletkenliğe sahip metallerin hızlı ve verimli şekilde kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Plazma ark kesme yöntemi, hem manuel hem de CNC kontrollü sistemlerde uygulanabilir olmasıyla üretim endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmuştur.

Plazma ark kesimin temel prensibi, yüksek hızlı bir gazın (genellikle hava, azot, argon veya hidrojen) dar bir nozül içerisinden geçirilerek elektrik arkıyla iyonlaştırılması sonucu plazma haline getirilmesi ve bu yüksek enerjili plazmanın iş parçası yüzeyine yönlendirilerek malzemenin eritilerek kesilmesidir (Şekil 4). Elde edilen plazma arkı, 20.000 °C'ye kadar ulaşabilen sıcaklığı ile metali hızla eritirken, yüksek hızla çıkan gaz eriyen malzemeyi kesim bölgesinden uzaklaştırır. Bu işlem sonucunda, temiz ve hızlı bir kesim sağlanır [16].



Şekil 4 Plazma ark kesme mekanizması

Plazma kesme sistemleri genellikle güç kaynağı, plazma torcu, gaz besleme ünitesi ve kontrol sisteminden oluşur. Torç içinde yer alan elektrot genellikle tungsten gibi yüksek erime noktasına sahip malzemelerden yapılır. Kesim işlemi sırasında elektrot ile nozül arasında oluşan pilot ark, plazma gazını iyonize ederek yüksek sıcaklıkta bir plazma jetine dönüştürür. Torç ucundaki nozül, plazma jetini daraltarak kesim hattında yüksek yoğunlukta ısı enerjisi oluşturur. Bu sayede hızlı ve düzgün kesim sağlanırken, termal etki bölgesi (Heat Affected Zone - HAZ) sınırlı kalır [17].

Plazma kesme işleminde kullanılan gazın türü ve basıncı, kesim kalitesini, hızını ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler. Örneğin; ince levhaların kesiminde sıkça kullanılan hava, uygun maliyetli ve çevre dostu bir seçenek sunarken, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi metallerin kesiminde argon-hidrojen gibi özel gaz karışımları tercih edilerek daha temiz kesim yüzeyleri elde edilebilir [18].

PAC yöntemi, yüksek kesim hızı, düşük işletme maliyeti ve geniş malzeme uyumluluğu sayesinde endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, otomasyon sistemlerine kolay entegrasyonu, seri üretim süreçlerinde zaman ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Kesim kalınlığı açısından oldukça geniş bir aralık sunar; 0.5 mm'den başlayarak 150 mm'ye kadar çeşitli kalınlıklardaki metalleri kesmek mümkündür.

Ancak, plazma kesme yönteminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle ince ve hassas parçaların kesiminde, kesim aralığı (kerf) tel crezyon

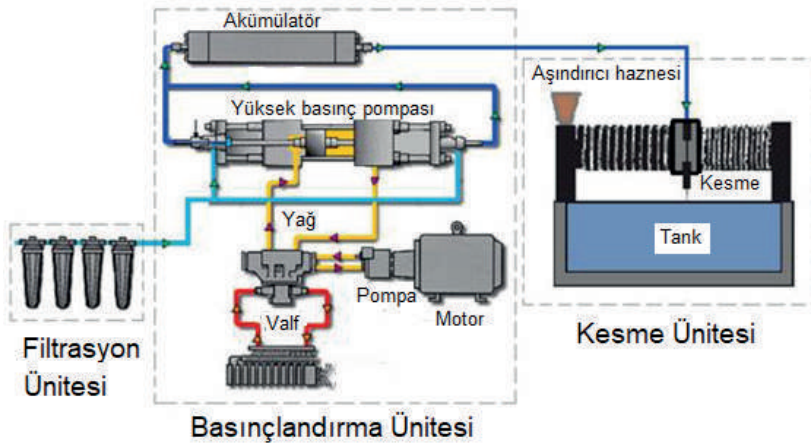
veya lazer kesime göre daha geniştir. Ayrıca, ısı girdisi nedeniyle oluşabilecek çapaklanma ve termal deformasyon, bazı hassas uygulamalar için olumsuz etki yaratabilir. Bu nedenle kesim sonrası temizleme veya ikincil işlemler gerekebilir [19]. Bununla birlikte, plazma ark kesme, özellikle inşaat, gemi yapımı, otomotiv ve metal işleme sektörlerinde, hızlı ve ekonomik kesim çözümü sunması nedeniyle yaygın bir uygulama alanına sahiptir.

2.4. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme

Aşındırıcılı su jeti ile kesim (Abrasive Water Jet Machining - AWJM), yüksek basınçlı suyun içerisine aşındırıcı partiküller eklenerek yönlendirilmesiyle gerçekleştirilen, temassız ve termal etkisiz bir kesme yöntemidir. Bu yöntem, özellikle ısıya duyarlı, yanıcı ya da konvansiyonel yöntemlerle kesilmesi güç malzemelerin hassas işlenmesinde etkin bir çözüm sunar. Aşındırıcılı su jeti, seramik, cam, taş, kompozitler, metaller ve çeşitli polimerik malzemeler gibi geniş bir malzeme yelpazesinde kullanılabilir [20].

ASJ teknolojisinin tarihçesi 1950'li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak 1956 yılında Dr. Norman Franz, yüksek basınçlı su jeti kullanarak kereste parçalarını kesmeye yönelik bir sistem geliştirmiştir. Bu ilk uygulama, sadece yumuşak ve lifli malzemelerle sınırlı kalmış, sanayide yaygın bir etki yaratmamıştır. Ancak 1980'li yıllarda Dr. Mohamed Hashish tarafından gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda su jeti içerisine aşındırıcı partiküllerin eklenmesiyle daha sert ve karmaşık yapıdaki malzemelerin de kesilebilmesi sağlanmış ve böylece günümüzde bilinen anlamıyla aşındırıcılı su jeti kesim teknolojisi doğmuştur [21].

Aşındırıcılı su jeti kesimin temel prensibi, yaklaşık 4000–6000 bar arasında basınçlandırılmış suyun dar çaplı bir nozül aracılığıyla iş parçasına yönlendirilmesi ve bu su jeti içerisine garnet, alümina veya silisyum karbür gibi aşındırıcı partiküllerin eklenmesidir (Şekil 5). Oluşan yüksek hızlı (yaklaşık 800–1000 m/s) ve yüksek enerjili aşındırıcı akış, iş parçası yüzeyinde mikroskobik aşındırma etkisi yaratarak malzemenin yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Bu süreç, termal enerji kullanılmadan gerçekleştiği için, kesim sırasında Isıl Etki Bölgesi (HAZ) oluşmaz, malzemenin mikro yapısında değişim meydana gelmez [22].



Şekil 5 Aşındırıcı su jeti kesme mekanizması [23]

ASJ sistemi, temel olarak üç ana ünitelerden oluşur: filtrasyon, basınçlandırma ve kesme ünitesi. Filtrasyon ünitesi, kullanılan suyun içindeki partikülleri arındırarak sistem bileşenlerinin zarar görmesini engeller ve nozülün tıkanmasını önler. Basınçlandırma ünitesi, sistemin en kritik bileşenlerinden biridir. Bu üniteye yer alan yüksek basınç pompası (intensifier), düşük basınçlı hidrolik enerjiyi 4000 bar seviyesine kadar yüksek basınçlı suya dönüştürür. Intensifier'lar, ASJ'nin süreklilik ve stabilite açısından güvenilir çalışmasını sağlayan temel aktörlerdir [23].

Aşındırıcı su jeti ile kesme işlemi, düşük basınçlı şebeke suyunun filtrasyon ünitesine giriş yapmasıyla başlar. Su, daha sonra yüksek basınç pompasına iletilir. Elektrik motoru tarafından çalışan yağ pompası, yüksek basınç pompasına yağ basar ve pompadaki seramik pistonu hareket ettirir. Piston, ileri ve geri hareket ederek yüksek basınç silindirindeki suyun basıncını kesit alan oranında artırır. Bu oran genellikle 1/20'dir; yani 200 barlık yağ basıncı, suyun basıncını 20 kat artırarak yaklaşık 4000 bar seviyesine çıkarır. Basınçlandırılan su, basınç dalgalanmalarını azaltmak amacıyla önce akümülatöre, ardından kesme ünitesine gönderilir. Kesme ünitesi, yüksek basınçlı suyun aşındırıcı partiküllerle karıştırılarak nozül aracılığıyla dışarı atıldığı bölümdür. Bu karışım venturi prensibi ile sağlanır; su jeti negatif basınç oluşturarak aşındırıcı partikülleri kendine çeker ve bu karışımı kesim yüzeyine yönlendirir. Kesme kafasından çıkışta suyun basıncı yaklaşık 4000 bar, hızı ise ses hızının yaklaşık üç katıdır (3 mach) [23].

ASJ yönteminde kesim kalitesini etkileyen başlıca parametreler; su basıncı, nozül çapı, aşındırıcı partikül tipi, tane boyutu, debisi, nozül-malzeme mesafesi ve kesim hızı gibi değişkenlerdir. Aşındırıcı olarak en

yaygın kullanılan malzeme garnet olup, bu partikül hem maliyet etkin hem de yüksek aşındırma kapasitesine sahiptir. Uygun parametrelerle kesim hattı genişliği (kerf) 0.8 mm'ye kadar indirilebilir ve yüzey pürüzlülüğü oldukça düşük seviyelerde tutulabilir [24].

ASJ'nin en büyük avantajı, malzemeye herhangi bir termal, mekanik ya da kimyasal zarar vermeden kesim gerçekleştirmesidir. Bu nedenle, diğer kesme yöntemleriyle işlenmesi zor olan çok katmanlı kompozit yapılar, ısıya duyarlı alaşımlar veya cam gibi kırılğan malzemeler bu yöntemle yüksek hassasiyetle işlenebilir. Ayrıca, işlem sırasında çapak oluşumu minimaldir ve çoğu zaman ikincil yüzey işleme gerekmez. CNC kontrollü sistemlerle entegre edilerek otomatik, tekrarlanabilir ve karmaşık kesim işlemleri de kolaylıkla yapılabilir.

Bununla birlikte ASJ'nin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle sistemin ilk yatırım maliyeti yüksektir ve işlem sırasında kullanılan aşındırıcı miktarının sarfiyatı işletme maliyetlerini artırabilir. Ayrıca, kesim sırasında oluşan yüksek ses seviyesi ve atık sıvının çevreye duyarlı şekilde yönetilmesi gereklidir. Aşındırıcı partiküller, geri dönüşüm sistemleriyle kısmen yeniden kullanılabilir, ancak bu da sistemin bakım maliyetine ek yük getirebilir.

ASJ, sahip olduğu bu üstün özellikleri sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayi, elektronik ve mimari dekorasyon gibi hassas ve yüksek kaliteli kesim gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3. Uygulama Alanlarına Göre Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Geleneksel olmayan kesme yöntemlerinden, Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ), Plazma, Lazer ve Tel Erozyon ile kesme yöntemleri, malzeme sertliği, geometrik karmaşıklık veya ısıl hassasiyet gibi nedenlerle geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı veya uygulamanın maliyetli olduğu modern üretim ortamlarında kritik öneme sahiptirler. Bu yöntemlerin bireysel olarak değerlendirilmesinden ziyade, gerçek uygulama senaryoları üzerinden değerlendirilmesi daha öğreticidir. Her yöntemin etkinliği; malzeme tipi ve kalınlığı, istenen toleranslar, yüzey kalitesi, termal etkiler ve ekonomik faktörlere göre önemli ölçüde değişir. Bu bölümde, çeşitli endüstrilerdeki pratik uygulamalar üzerinden, her yöntemin en verimli olduğu çalışma alanları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Lazer kesim, özellikle ince ve orta kalınlıktaki metalik malzemelerde yüksek hassasiyet ve temiz kenar kalitesi gerektiren durumlarda uygundur. Örneğin, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelik sac üzerinde dar iç konturlara sahip bir kontrol braketinin kesiminde lazer, minimum çapak ve ısı etkisi olmadan yüksek kaliteli sonuç verir. Fiber lazerler, kısa dalga boyları ve

yüksek odaklama kabiliyetleri sayesinde kesim çözünürlüğünü artırmakta ve enerji kaybını azaltmaktadır [25]. Benzer şekilde, elektronik üretiminde elektromanyetik koruma ve baskılı devre kartları için kullanılan 0.5 mm kalınlığındaki bakır levhaların mikro işlemede lazerler tercih edilmektedir. 100 μm 'nin altındaki mikro ölçekli detayları işleyebilme yeteneği, lazerleri yüksek hassasiyet gerektiren bu alanlarda vazgeçilmez kılar. Ayrıca, medikal cihaz sektöründe lazer kesim, nikel alaşımları ve titanyum gibi malzemelerden cerrahi alet ve damar stendi üretiminde kullanılır. Bu parçalar, boyutsal hassasiyetin yanı sıra mekanik gerilim içermemeli; lazer kesimin temassız doğası bu gereksinimleri karşılamaktadır.

Tel Erozyon, yüksek hassasiyet ve çok düşük tolerans gerektiren uygulamalarda, elektrik iletkeni malzemelerin işlenmesinde tercih edilen kritik bir yöntemdir. Özellikle dik ve karmaşık konturların oluşturulmasında üstün performans sağlar; geleneksel yöntemlerle mümkün olmayan keskin iç köşeler ve mikro detaylar Tel erzyon ile hassas şekilde işlenebilir. Örneğin, 8-15 mm kalınlığındaki sertleştirilmiş takım çeliklerinde, kalıpcılık sektöründe çok düşük toleranslarda ve yüksek yüzey kalitesinde oyuklar, yuvalar ve keskin köşeler tel erzyon kullanılarak başarılı şekilde elde edilir. Havacılık mühendisliğinde, aşırı termal ve mekanik yüklere maruz kalan Inconel türbin disklerindeki fir-tree yuvalarının üretiminde bu yöntem vazgeçilmezdir [27]. Tel erzyon, gerilmesiz ve mikro çatlak içermeyen yüzeyler sunarak parçaların uzun ömürlü ve güvenilir performans göstermesini sağlar. Ayrıca mikro üretim ve medikal cihaz sektörlerinde sub-milimetre ölçekli mikro iğne, sensör gövdesi ve cerrahi mikro aletlerin imalatında kullanılır. Yüksek hassasiyet ve kaliteli yüzey elde edilmesine rağmen, tel erzyon işlemi yavaş ilerler ve sadece elektrik iletkeni malzemelerle sınırlıdır.

Plazma kesim, yüksek hassasiyetten ziyade üretkenlik ve ekonomikliği ön planda tutan ağır sanayide öne çıkar. Gemi yapımı ve çelik konstrüksiyon üretiminde, 12 mm kalınlığındaki yumuşak çelik plakalar plazma ile hızlı kesilir ve gövde plakaları, destek elemanları gibi parçalar üretilir [26]. Bu yöntem, hızlı malzeme kaldırma kapasitesi, kaynak öncesi kabul edilebilir kenar kalitesi ve düşük işletme maliyetleri sunar. Plazma sistemleri, karbon çeliğinden alüminyum alaşımlarına kadar çeşitli malzemeleri, özellikle 6 mm üzerindeki kalınlıklarda işleyebilir. Lazer kesimin sınırlandığı, çok kalın ve ağır profillerde ise plazma kesim sıklıkla bir alternatif olarak tercih edilir. Özellikle su altı plazma kesim uygulamalarında, gemi gövdelerinin ve deniz yapılarının kalın çelik bileşenleri güvenli ve etkili bir şekilde işlenebilir. Bu sayede, lazerin fiziksel olarak erişemediği veya verimsiz olduğu kalınlıklar üzerinde yüksek verimle kesim sağlanır. Tarım makineleri ve madencilik ekipmanı üretiminde de 20–30 mm kalınlıklarındaki çelik parçaların hızlı

ve sağlam kesiminde plazma kullanılır. Ancak, plazma kesimde oluşan geniş HAZ ve çapak nedeniyle çapak giderme ve taşlama gibi işlemler gerekebilir.

Aşındırıcı Su Jeti, özellikle mermer, granit gibi doğal taşların kesiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otel ve lüks mekanlarda dekorasyon amaçlı uygulamalarda ASJ, malzemede çatlama, kırılma veya ısıl deformasyon riski olmadan karmaşık ve estetik tasarımların gerçekleştirilmesini sağlar. Örneğin, 15-30 mm kalınlığındaki granit plakaların hassas ve detaylı kesimlerinde ASJ tercih edilmekte olup, hem sert hem de kırılğan yapısı nedeniyle diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır [20]. Ayrıca, bu yöntemle doğal taşların yanı sıra kompozitler, seramik ve cam gibi termal olarak hassas malzemeler de zarar görmeden işlenebilmektedir. Soğuk kesim olmasından ötürü, ısıl etkilene bölgesi (HAZ) oluşmaz ve malzemenin mekanik özellikleri korunur. Havacılık sektöründe, 25 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) paneller ASJ ile kesilerek delaminasyon ve matris hasarları önlenmektedir. Bu tür kompozit malzemelerde ısıl kaynaklı deformasyon ve çatlak riskleri diğer yöntemlere göre daha azdır [20]. Ayrıca, gıda sektöründe aşındırıcı içermeyen saf su jetleri, donmuş ürünlerin hijyenik şekilde kesilmesini sağlar.

Tablo 2 Geleneksel Olmayan Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Öne Çıkan Özellikleri

Kesme Yöntemi	Başlıca Avantajları	Malzeme Uyumluluğu	Yüzey Kalitesi	Maliyet Etkinliği	İdeal Uygulama Alanları
ASJ Kesim	- Soğuk kesim, ısısal zarar yok	Doğal taşlar (mermer, granit), kompozitler, seramik, cam, gıda	İyi	Orta-yüksek (abrasiv ve bakım maliyetleri)	- Otel ve lüks dekorasyonlarda doğal taş
	- Çok yönlü malzeme uyumu				- Kalın CFRP paneller
					- Gıda kesimi
Lazer	- Yüksek hassasiyet	İnce metal levhalar (≤ 10 mm), bazı polimerler	Mükemmel	Orta-yüksek (yüksek ekipman maliyeti, hızlı kesim)	- İnce paslanmaz saclar
	- Minimal ısı etkisi				- Mikroelektronik
	- Otomasyona uygun				- Medikal cihazlar
Plazma	- Kalın metallerde hızlı	İletken metaller (çelik, alüminyum, bakır)	Orta	Düşük-orta (hızlı ama ek işlem gerekebilir)	- Yapısal çelikler (6–25 mm)
	- Düşük işletme maliyeti				- Gemi ve ağır makine imalatı

Tel Erezyon	- Çok yüksek hassasiyet	Elektrik iletkeni malzemeler (çelik, alaşımlar)	Mükemmel	Yüksek (yavaş işlem, sarf malzeme maliyeti)	- Sert takım çelikleri
	- Stressiz ve çapaksız kesim				- Türbin yuvaları
					- Mikro araçlar ve kalıplar

4. Sonuç

Geleneksel olmayan kesme yöntemleri, modern imalat teknolojilerinde artan malzeme çeşitliliği, hassasiyet gereksinimi ve üretim verimliliği talepleri doğrultusunda kritik bir rol üstlenmektedir. Aşındırıcılı su jeti, lazer, plazma ve tel erozyon gibi yöntemler; özellikle karmaşık geometrilere, dar toleranslara ve özel yüzey kalitelerine ihtiyaç duyulan uygulamalarda, konvansiyonel yöntemlere alternatif hatta çoğu durumda tercih edilen çözümler haline gelmiştir.

Bu yöntemlerin her biri; malzeme tipi, kalınlık aralığı, istenen yüzey kalitesi, üretim hızı, işlem maliyeti ve termal etkiler gibi birçok teknik parametreye göre avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, tek bir yöntemin tüm üretim ihtiyaçlarına cevap vermesi mümkün değildir. Bunun yerine, her bir uygulama için optimum performansı sağlayacak yöntemin dikkatle seçilmesi gerekir. Bu seçim sürecinde; üretim ölçeği, malzeme özellikleri, tolerans aralıkları, işletme maliyetleri ve çevresel etki gibi kriterler dikkate alınmalıdır.

Günümüzde bu teknolojilerin gelişimi yalnızca ekipman düzeyinde değil, aynı zamanda yazılım, sensör tabanlı kontrol sistemleri ve veri odaklı üretim stratejileri ile de desteklenmektedir. Bu gelişmeler, işlem sürelerini kısaltmakta, kaliteyi artırmakta ve üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini mümkün kılmaktadır. Ayrıca hibrit sistemlerin geliştirilmesiyle, birden fazla yöntemin avantajlarını bir arada sunan yeni çözümler ortaya çıkmakta, üretim esnekliği ve verimliliği daha üst seviyelere taşınmaktadır.

Sonuç olarak, geleneksel olmayan kesme teknolojileri, yüksek hassasiyet ve esneklik gerektiren imalat süreçlerinde stratejik bir konuma sahiptir. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde analiz edilmesi, malzeme ve uygulama özelinde optimize edilmesi, rekabetçi ve sürdürülebilir bir üretim altyapısının temel taşlarından biri olacaktır.

Kaynakça

- [1] P. Naresh and P. Khatak, "Laser cutting technique: A literature review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2484–2489, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.250.
- [2] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung," *Physikalische Zeitschrift*, vol. 18, pp. 121–128, 1917.
- [3] G. Kasnak and E. Firath, "Lazer fiziği ve lazer uygulamalarında temel kavramlar," *Türkiye Klinikleri Journal of Periodontology - Special Topics*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2016.
- [4] S. S. R. Depuru, S. S. R. Depuru, and S. S. R. Depuru, "Reviews on Laser Cutting Technology for Industrial Applications," *ResearchGate*, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/323567559_Reviews_on_Laser_Cutting_Technology_for_Industrial_Applications
- [5] A. Gusarov and M. Smurov, "Laser cutting of metals: High quality and productivity," *Physics Procedia*, vol. 5, pp. 429–438, 2010. doi:10.1016/j.phpro.2010.08.075
- [6] M. J. Matthews, J. A. Guss ve P. J. Martin, "Role of assist gases in laser cutting," *Applied Surface Science*, cilt. 254, sayı. 6, ss. 1477–1481, 2007.
- [7] A. El-Taweel, M. A. Abou-Ali, and S. A. Mahmoud, "Reviews on laser cutting technology for industrial applications," *Optik*, vol. 127, no. 20, pp. 9937–9946, 2016.
- [8] M. Malina, J. Petru, and J. M. Krug, "Laser cutting of metals: Experimental research and optimization," *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1074–1082, 2015.
- [9] H. T. Yang and Y. S. Tarng, "Design optimization of wire electrical discharge machining process," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, vol. 38, no. 4, pp. 479–497, 1998.
- [10] S. R. Shanmugam et al., "Machining characteristics of micro WEDM process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 135–144, 2005.
- [11] K. P. Rajurkar, W. M. Wang, and M. Hu, "Wire electro-discharge machining," in *Nontraditional Machining Processes*, Springer, 2016, pp. 123–160.
- [12] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, and B. Schumacher, "Advancing EDM through fundamental insight into the process," *CIRP Annals*, vol. 54, no. 2, pp. 64–87, 2005.
- [13] M. S. Hewidy, T. A. El-Taweel, and M. El-Safty, "Modeling the machining parameters of WEDM of Inconel 601 using RSM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 2, pp. 328–336, 2005.

- [14] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3rd ed., CRC Press, 2005.
- [15] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, 2nd ed., Pergamon Press, 1986.
- [16] B. E. Paton and I. B. Frolov, "Plasma arc cutting of metals," *Welding International*, vol. 4, no. 12, pp. 970–977, 1990.
- [17] M. Kouadri, "Thermal effects and HAZ in plasma arc cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, pp. 292–298, 2008.
- [18] K. P. Rajurkar et al., "Review of advanced hybrid micro-machining processes," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 1–17, 2012.
- [19] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3rd ed., CRC Press, 2005.
- [20] A. K. Tiwari and S. Kumar, "Abrasive water jet cutting of natural stones: An overview," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 2218–2225, 2020.
- [21] M. Hashish, "Development of the abrasive water jet cutting process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 109, no. 3, pp. 267–271, 1987.
- [22] L. R. Ananthapadmanabhan et al., "Thermal effects in abrasive water jet machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1017–1025, 2004.
- [23] H. Çandar, "Experimental study on optimisation of cutting parameters in abrasive waterjet machine," *Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep*, 2012.
- [24] K. Y. Choi and T. T. Lim, "Optimization of process parameters in abrasive water jet cutting of composite materials," *Composite Structures*, vol. 102, pp. 36–41, 2013.
- [25] T. J. S. Lee, "Laser cutting of engineering materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, no. 1–3, pp. 1–13, 2001.
- [26] J. H. S. Lee, "Plasma arc cutting process and its industrial applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1–3, pp. 1–10, 1997.
- [27] W. B. Rowe, "Wire electrical discharge machining: principles and practices," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Engineering Manufacture*, vol. 213, no. 5, pp. 411–420, 1999.

Design and Application of Plant Protein-Based Materials For Controlled Phytochemical Delivery in Bone Cancer Therapy-Review

Mehtap Demirel¹

Abstract

Phytochemicals from plants offer considerable potential for bone cancer treatment because of their anticancer properties. Their clinical effectiveness is frequently restricted by low bioavailability, systemic distribution, and quick elimination. This review focuses on plant protein-based drug delivery systems engineered for the controlled and targeted release of phytochemicals, specifically in bone tissue applications. These systems, prized for their biocompatibility and ability to break down naturally, provide dual functionality as both drug delivery systems and regenerative platforms.

Natural biopolymers like silk fibroin, sisal fibers, and bamboo fibers, in addition to widely used plant proteins such as soy, zein, and gliadin, are receiving increasing attention. Silk fibroin aids in the adhesion and growth of bone cells, whereas sisal and bamboo fibers provide mechanical strength and the potential for bone growth, suggesting that they could be effective in bone-regenerative treatments. These materials can be developed into carriers of various micro/nano-scale dimensions, allowing for both sustained release and bone healing.

The review also emphasizes key mechanisms such as post-implantation bone-targeted delivery, enhanced osteoconductivity, localized delivery of anticancer drugs, and bioactive surface modifications. In contrast to conventional synthetic polymers, these natural biomaterials display reduced toxicity, environmentally friendly manufacturing processes, and compatibility with the structural framework of bone microenvironments.

In conclusion, biomaterials based on plant protein and fiber exhibit significant potential as dual-functional systems for the controlled release of phytochemicals and the regeneration of bone tissue in the context of bone cancer treatment.

1 Doç. Dr., Adiyaman University, Vocational School of Technical Sci, Adiyaman, Turkey
ORCID: 0000-0003-2362-314X, E Mail: mdemirel@adiyaman.edu.tr

INTRODUCTION

Cancers of the bone, including osteosarcoma and bone metastases from breast or prostate cancer, are among the most aggressive and resistant to treatment types of malignancies. Conventional treatments, such as chemotherapy, surgical removal, and radiation therapy, frequently lead to severe side effects, limited selectivity in targeting cancer cells, and reduced effectiveness in preventing cancer from recurring or promoting bone repair. The restrictions have led to an increasing interest in alternative and complementary therapeutic methods that are safer, more environmentally friendly, and capable of targeting the bone microenvironment more accurately.

Bioactive compounds from plants, which include several phytochemicals, are being studied more extensively for their potential to combat cancer. Compounds such as curcumin, resveratrol, epigallocatechin gallate (EGCG), and quercetin show anti-inflammatory, pro-apoptotic, antiproliferative, and antioxidant characteristics. Promising outcomes have been observed with several phytochemicals, which have demonstrated the ability to inhibit osteosarcoma growth, decrease bone resorption, and regulate the tumor microenvironment's dynamics. Their clinical applications are restricted due to problems like low water solubility, chemical instability, quick removal from the body, and the inability to be absorbed effectively by the body—especially in the dense, mineralized bone matrix.

In order to overcome the challenges associated with pharmacokinetics and delivery, advanced biomaterial-based controlled release systems have been developed. Plant- and animal-derived proteins and fibers have been identified as effective carrier materials due to their natural composition, compatibility with living tissues, ability to break down naturally, and versatility in formulations. Besides the more commonly examined materials like soy protein isolate, pea protein, and zein, natural structural fibers such as silk fibroin, sisal fibers, and bamboo fibers are also receiving attention. These materials possess high mechanical strength, inherent porosity, and the ability to coexist with osteogenic cells, rendering them suitable for use as both drug delivery agents and structural components for bone regrowth.

Plant- and fiber-based biopolymers can be processed into microcapsule structures, coatings, or composite scaffolds that allow for the localized and sustained delivery of phytochemicals. In addition, combining these materials with bioactive ceramics like hydroxyapatite or calcium phosphate can improve their ability to foster bone growth, making them especially appealing for use

in bone grafts, implant coatings, and multifunctional scaffolds that support bone repair while also offering localized anticancer properties.

This chapter offers a thorough examination of plant protein and natural fiber-based materials, focusing on their design and biomedical applications in controlled anticancer phytochemical delivery, especially in the context of bone cancer treatment. The forthcoming chapter will explore the therapeutic applications of the chosen plant-derived compounds, the physical and operational characteristics of the carrier substances, encapsulation methods, and their implementation in targeted delivery systems aimed at the bone tissue. Future challenges and clinical translation prospects will be explored.

PHYTOCHEMICALS IN BONE CANCER THERAPY

Bone cancers, particularly osteosarcoma and metastatic bone lesions, pose significant clinical challenges because of their highly aggressive behavior and intricate microenvironment (Lu et.al., 2025). Treatment options for the current scenario usually involve finding a delicate balance between surgically removing the entire tumor and maintaining the structural integrity of the bone (Bădilă et al., 2021)

Naturally occurring bioactive compounds in plants have significant therapeutic potential for cancer prevention and treatment. In the context of bone cancer, numerous plant-derived compounds show significant anticancer potential by triggering cell death, suppressing the formation of new blood vessels, reducing oxidative damage, and adjusting inflammatory response pathways.

The most thoroughly investigated phytochemicals associated with bone cancers are composed of the following:

Curcumin is a polyphenolic compound that originates from the plant *Curcuma longa*, also known as turmeric. Curcumin has demonstrated robust anticancer properties by triggering apoptosis in osteosarcoma cells, limiting cell division, and blocking the NF- κ B signaling pathway. This also has potent anti-inflammatory and antioxidant effects, as demonstrated (Wang et.al.,2021).

Resveratrol, which can be found in grapes, peanuts, and berries, has been shown to inhibit the growth of osteosarcoma cells, decrease bone loss caused by tumors, and affect bone remodeling markers like RANKL and OPG (Shakibaei et.al., 2011). Green tea's main catechin, Epigallocatechin Gallate (EGCG), has cytotoxic effects on osteosarcoma cell lines, hampers the growth of new blood vessels in tumors, and reduces the activity of matrix

metalloproteinases (MMP-2/9), two key enzymes involved in tumor spread and bone breakdown (Li et.al., 2023).

A flavonoid called quercetin is commonly found in various foods, including apples, onions, and leafy greens.

It triggers apoptosis and halts the cell cycle in osteosarcoma cells through mitochondrial and caspase-driven mechanisms and was demonstrated to increase the efficacy of standard chemotherapy treatments (Granado-Serrano et. al., 2010). It induces apoptosis and cell cycle arrest in osteosarcoma cells via mitochondrial and caspase-mediated pathways and has been shown to enhance the effectiveness of conventional chemotherapeutics treatments (Granado-Serrano et. al., 2010).

A neolignan derived from *Magnolia officinalis*, honokiol, has shown antiproliferative and anti-angiogenic properties in various cancers, such as osteosarcoma. The compound induces apoptosis while preventing tumor growth and the spread of cancer to other parts of the body (Arora et.al., 2012). Research has demonstrated that the phenolic compound gingerol, which is present in ginger (*Zingiber officinale*), can prevent the spread of cancer cells, cause cancer cell death, and halt cell division in bone tumor cells, thereby underscoring its value as a complementary treatment in bone cancer therapy (Lee et.al., 2008).

Most phytochemicals with potent biological properties are hindered by pharmacokinetic drawbacks, including low water solubility, chemical instability, and swift removal from the body. The restrictions imposed by these limitations significantly impede the accumulation of drugs in the bone tissue, a dense and mineralized area that poses a barrier to therapeutic delivery. Despite their potent biological activities, most phytochemicals suffer from pharmacokinetic limitations such as poor water solubility, chemical instability, and rapid systemic elimination. These limitations particularly hinder drug accumulation in the bone tissue, which is dense and mineralized, creating a barrier for therapeutic delivery. Over the past few years, a number of natural products have been studied for their potential to slow the progression of osteosarcoma, regulate bone metabolism, and counteract chemoresistance mechanisms, as reported (Zhang et.al., 2020). Various delivery systems including nanoparticles, liposomes, hydrogels, and natural polymer-based microcapsules have been investigated to overcome these challenges. The goal of these approaches is to increase the uptake of phytochemicals by cells, prolong their circulation within the body, and enhance their accumulation at the tumor site (Liu et. al., 2019).

A diverse assortment of delivery systems, including nanoparticles, liposomes, hydrogels, and natural polymer-based microcapsules, have been investigated to address these challenges. One notable option is plant protein-based microcapsules, which offer a biocompatible, biodegradable, and sustainable approach to safeguard phytochemicals and facilitate targeted, long-lasting delivery. In addition, these systems can be paired with osteoinductive substances or incorporated into frameworks, thereby serving a dual purpose in bone tissue regeneration and targeted cancer treatment.

According to Isakoff et al. (2022), approximately 6% of childhood malignancies are bone cancers, with osteosarcoma being the most frequent primary bone cancer. Several current clinical challenges exist:

Recurrence of the condition can occur in 30-40% of patients following surgical removal (Bielack et al., 2002).

Sclerotic bone tumors exhibit limited drug penetration (Roodman et al., 2004, Chow et.al., 2013).

A mechanical incompatibility exists between implants and the host's natural bone (Huiskes et al., 1993, Ryan et. Al, 2006).

Conventional metallic implants and synthetic bone grafts often fail to meet three essential requirements for treating bone cancer. Delivery of medication directly to the site of a tumor to inhibit its recurrence. Bone regeneration facilitated through mechanical assistance. Compatibility of biological materials with adjacent healthy tissue.

In addition to those mentioned, another category of compounds used in bone tumors includes plant-based material compounds. Composites made from natural fibers and plant proteins have become potential solutions that tackle these challenges simultaneously, as noted in the research three of these fibers specifically demonstrate a promising potential for bone cancer applications (Faheed, 2024, Liu et.al., 2023, Jouyandeh et. al., 2022). Coconut shell fibers possess hydrophobic regions that are well-suited for encapsulating poorly soluble anticancer agents. Additionally, their lignin and polyphenolic content—including catechins and tannins—contribute significant antioxidant and anticancer properties. Notably, lignocellulosic-derived nanoparticles such as lignin nanoparticles demonstrate high efficiency in loading hydrophobic drugs and exhibit strong antioxidant activity (Wijaya et al., 2021). Moreover, studies on coconut shell extracts have confirmed the presence of tannins and catechins with documented cytotoxic effects against cancer cell lines (Mohd Effendi Mohamed Nor et al., 2023; Koschek et al., 2007).

Pineapple Leaf Fiber (PALF) systems provide distinct advantages:

- Pineapple Leaf Fiber (PALF)-based composites exhibit inherently porous structures, which are advantageous for facilitating drug diffusion in biomedical applications, as highlighted in recent studies. (Sethupathi et al., 2024; Brailson et al., 2022)
- Research indicates that the biodegradable nature of PALF composites aligns with the time frames associated with early-stage bone tissue healing, making them suitable for use in temporary or dissolvable scaffolds. (Sethupathi et al., 2024)
- PALF-containing biocomposites have also shown promising results in promoting angiogenesis, a critical factor for bone healing and integration, particularly when combined with bioactive polymer matrices. (Liu et al., 2023; Sethupathi et al., 2024)

Silk fibroin composites demonstrate considerable potential owing to the following:

- The tensile strength of this material is 158 ± 12 MPa, which meets the mechanical strength requirements of cortical bone, as confirmed by Rockwood et al., who demonstrated that regenerated silk fibroin films and scaffolds exhibit tensile strengths ranging from 120 to 200 MPa depending on processing conditions (Rockwood et. al., 2011).
- Osteoconductivity was found to support 92% osteoblast adhesion, which is significantly higher than the 68% observed for polycaprolactone (PCL), as reported by Nazarov et al., where silk nanofiber mats significantly outperformed synthetic polymers in supporting cell attachment (Nazarov et. al. 2004).
- Research has shown that the rate of drug release achieves 80% curcumin release at a pH level of 6.8, as opposed to 35% at a pH level of 7.4, indicating a pH-responsive release profile that enhances bioavailability in tumor microenvironments, as demonstrated by Wang et al. (Wang et.al., 2008).

Sisal Fiber Reinforcements Exhibit Clinical Benefits

- Sisal fibers offer a cost-effective and sustainable alternative to synthetic fibers. Numerous studies have highlighted that the price per kilogram of natural fibers, including sisal, is significantly lower than that of synthetic counterparts, making them attractive for both industrial and biomedical applications (Li et al., 2020).

- Alkali-treated sisal fibers demonstrate notable improvements in mechanical performance. Treatments using 5% NaOH have been shown to enhance fiber–matrix interfacial bonding, thereby increasing tensile and flexural strength. This enhancement can result in performance levels approaching those of certain metallic materials, such as titanium meshes. (Bekele et.al., 2023)
- Sisal-based materials have also shown promising biological effects, particularly in reducing the viability of osteosarcoma cell lines such as Saos-2. Studies involving plant-derived reinforcements suggest that these materials can exert cytotoxic effects on cancerous cells, indicating their potential for biomedical and therapeutic use.). (Ağan et.al., 2020)

Challenges in Clinical Translation

Gamma radiation exposure has been shown to negatively affect the mechanical integrity of sisal fibers, with several studies demonstrating a reduction in tensile strength following irradiation.(Dorneles de Castro et.al.,2020)

To date, there are no plant protein–based implants that have received FDA approval for cancer therapy applications. Although plant-derived biomaterials show great promise in preclinical stages, none have progressed to regulatory clearance for oncological implant use, underscoring this translational gap. (Wu et.al., 2024)

Tablo1. Preliminary Testing Outcomes of Composites Reinforced with Natural Fibers for Treating Bone Cancer

Material – Model	Outcome Summary	Supporting References
Silk–Curcumin (murine OS)	Curcumin-loaded silk scaffolds showed significant reduction in tumor volume and mass in osteosarcoma-bearing murine models.	Ouyang et al. (2024) – “significant reduction in tumor volume”
Sisal–Dox (Saos-2 xenograft)	Doxorubicin-loaded sisal fiber carriers resulted in marked reduction in tumor growth and cell viability in Saos-2 xenografts.	Orel et al., 2024 – observed ~61 % decrease in Saos-2 cell viability
PALF scaffold (rabbit tibia)	Pineapple leaf fiber-based scaffold promoted robust bone regeneration, supporting effective defect repair in rabbit tibial models.	Rabbit tibia defect scaffolding studies with plant fiber composites show strong osteointegration- Sethupathi et.al.(2024)

PLANT PROTEIN-BASED MATERIALS FOR BONE-TARGETED PHYTOCHEMICAL DELIVERY

Phytochemical delivery to bone-targeted sites utilizing plant-derived protein-based materials plant-based protein materials present a promising foundation for creating sustainable and functional drug delivery systems. These biopolymers, sourced from natural materials including legumes, cereals, and oilseeds, exhibit superior film-forming, encapsulating, and biodegradable characteristics. Their compatibility with bone regeneration strategies makes these compounds particularly valuable for the localized treatment of bone malignancies such as osteosarcoma and bone metastases. Their compatibility with bone regeneration strategies makes them particularly valuable for the localized treatment of bone malignancies such as osteosarcoma and bone metastases.

Plant proteins commonly found in use include:

Soy protein isolate (SPI) has undergone thorough investigations into its mechanical properties, controlled breakdown, and ability to create microspheres and hydrogels. The material's surface can be altered to enhance its bioactivity and increase its capacity for carrying drugs, making it suitable for use in bone scaffolds (Li et.al., 2019).

Pea protein is becoming increasingly popular as a matrix for controlled release systems due to its well-balanced amino acid profile and low potential for causing allergic reactions. Research has demonstrated its ability to work well with calcium phosphate composites in the field of bone tissue engineering, as found in the study (Wang et.al., 2021).

Zein is a protein found in maize, characterized by its high hydrophobic nature, which facilitates prolonged drug release. Good biocompatibility and structural integrity have been achieved in the fabrication of bone-targeted nanocarriers using this method (Zhang et.al., 2022).

These proteins can be developed into microcapsules, coatings, or scaffold composites using methods like spray drying, ionic gelation, coacervation, and emulsion-based techniques. These systems can be used to provide a dual function when incorporated into bone tissue engineering scaffolds or applied as implant coatings—supporting bone regeneration and facilitating the localized release of anticancer phytochemicals.

In addition, composites based on plant protein can be augmented with osteoconductive fillers like hydroxyapatite (HAp), calcium phosphate (CaP), or bioactive glass to increase the mechanical strength and bone bonding. These hybrid systems not only enhance cell attachment and growth but also

facilitate the targeted and prolonged delivery of therapeutic agents directly to the bone tumor site (Chen et.al., 2020).

Recent studies have shown that the microarchitecture of these protein-based carriers, including factors like porosity, swelling behavior, and degradation rate, can be precisely adjusted to match the dynamics of bone remodeling and pathological environments, as demonstrated in research (Deng et.al., 2023).

Beyond traditional plant proteins like zein and soy protein, naturally occurring structural proteins and fibers such as silk fibroin, sisal, and coconut shell fibers have garnered increasing attention for use as biomaterials in drug delivery systems. Silk fibroin nanoparticles have been extensively investigated within tumor microenvironments due to their advantages, including controlled drug release, high biocompatibility, and low toxicity (Foppiani et al., 2024; Pollini et al., 2024). These protein-based systems show promise for the encapsulation and targeted delivery of therapeutic agents (Chemis Group, 2024). The use of natural fiber composites (e.g., sisal) as biomaterials for bone-supporting applications has also grown due to their high mechanical strength and environmentally friendly characteristics (PMC, 2023; Springer, 2023).

Sisal fibers, specifically from the plant *Agave sisalana*, possess a high cellulose content and stiffness, which enable them to provide mechanical support in drug delivery systems. Although direct evidence regarding their application in bone cancer treatment is limited, their potential as reinforcing components in biomedical composites is well documented. Sisal-reinforced biocomposites have been investigated for orthopedic applications due to their high tensile and compressive strength; however, their use specifically in bone cancer therapy remains in the early stages of research (Zamora-Mendoza et.al., 2023).

Coconut shell fibers possess hydrophobic regions that are well-suited for encapsulating poorly soluble anticancer agents. Additionally, their inherent lignin content provides antioxidant properties, which may enhance therapeutic outcomes. Lignocellulosic-derived nanoparticles, such as lignin nanoparticles, have demonstrated high efficiency in loading hydrophobic drugs and exhibit strong antioxidant activity (Wijaya et al., 2021).

ENCAPSULATION TECHNIQUES AND BONE-TARGETED DELIVERY STRATEGIES

The effectiveness of plant protein-based delivery systems is heavily reliant on the selected encapsulation method and the specific targeting approach

employed to guide therapeutic agents to the bone tissue. For anticancer phytochemicals to be effective in treating cancer in the bones with minimal side effects, it is crucial to deliver them in a controlled, sustained way that is specific to the bone environment.

MICROENCAPSULATION TECHNIQUES WITH PLANT PROTEINS

Plant-Based Microencapsulation Methods Utilizing Proteins Methods have been created to manufacture microcapsules or nanoparticles from plant proteins such as soy, zein, and pea protein.

These methods not only maintain the structural integrity and biological activity of the encapsulated phytochemicals but also facilitate their controlled release. These methods not only preserve the structural integrity and activity of the encapsulated phytochemicals but also allow controlled release.

Spray drying is a commonly applied and highly scalable technique. The plant proteins are mixed with the medication, and then they are transformed into a fine, dried powder through atomization into hot air. The method offers good control over particle size and cost-effectiveness, although the thermal sensitivity of certain phytochemicals needs to be considered (Patel et.al., 2019).

Coacervation: This process is based on the electrostatic interactions between the positively and negatively charged polymers that occur through coacervation. Coacervates made with zein or SPI can trap non-water-soluble plant compounds such as curcumin or resveratrol and be hardened into stable delivery vehicles (Chen et.al., 2021).

Ionic Gelation: This process involves cross-linking of plant proteins using calcium ions. This procedure is a gentle approach, especially well-suited for compounds that are sensitive to heat, and produces uniform microspheres that are suitable for use in injectable delivery systems (Nunes et.al., 2020).

These encapsulation methods can be customized to regulate the particle size, surface charge, degradation rate, and drug release profiles in order to align with the pathological and regenerative properties of the bone tissue environments.

BONE-TARGETING STRATEGIES

To achieve effective bone accumulation, delivery systems typically need to be modified to be more bone-targeting. The primary methods employed involve

Bisphosphonate functionalization involves compounds like alendronate, which exhibit a high affinity for hydroxyapatite and are often attached to drug delivery systems to ensure targeted deposition in mineralized bone tissue (Wang et.al., 2017).

Short peptides, such as Asp-Ser-Ser, or molecules with a high affinity for hydroxyapatite can be attached to proteins to enhance their adhesion to bone surfaces, as demonstrated (Zhou et. al., 2021).

The bone tumor microenvironment frequently exhibits acidic conditions. Under specific conditions, plant protein carriers that can detect changes in pH levels release their cargo in a targeted manner, thereby enhancing the delivery of therapy to the correct site and reducing the impact of unintended side effects (Ramasamy et.al., 2022).

The concept of encapsulation can be expanded by incorporating fibrous biopolymers such as silk and lignocellulosic fibers. Electrospun silk fibroin scaffolds and composite systems that combine sisal or coconut fibers can improve both the mechanical strength and bone bonding of delivery platforms [16, 18,19]. The fabrication of nanofibrous silk fibroin mats has been made possible through electrospinning, which is used to create materials for targeted drug delivery in bone cancer research. These structures enable a controlled release over time and can be modified to incorporate targeting molecules [16].

Encapsulation of phytochemicals directly into fibers such as sisal or coconut is relatively uncommon, yet these fibers can serve as structural frameworks in hybrid systems, thereby improving the mechanical stability of devices designed for bone-targeted delivery. [17,19]

CONTROLLED RELEASE KINETICS AND THERAPEUTIC OUTCOMES IN BONE CANCER MODELS

The success of plant protein-based delivery systems in treating bone cancer hinges on their ability to release therapeutic compounds in a controlled and targeted fashion. The release dynamics of these systems have been extensively examined in both laboratory-based and living-organism models.

Release Kinetics Profiles

Plant-based carriers derived from proteins can release phytochemicals according to different kinetic models. Zein-based nanoparticles enable the gradual and prolonged release of hydrophobic phytochemicals, which facilitates effective delivery within the bone tumor microenvironment (Zhang et.al., 2022). Pea protein-based microgel capsules have also shown

the capability to manage the release of both water-loving and water-fearing compounds (Dinh et.al., 2024).

Plant-based protein systems can be designed to have two main functions through the integration of microencapsulation techniques with targeted approaches for bone tissue, thereby enabling the simultaneous promotion of bone repair and the controlled release of anticancer medication in specific areas over time.

Silk fibroin is notable among different biomaterials for its ability to degrade at a tunable rate and release substances in a controlled manner. In bone cancer models, silk-based drug carriers have demonstrated sustained drug presence at the tumor site. Only limited studies on sisal and coconut fibers exist, but their antioxidant properties and structural characteristics indicate possible future therapeutic applications (Florczak et. Al., 2021). Specifically, silk fibroin carriers have shown favorable release kinetics in bone cancer research models, maintaining therapeutic concentrations within the tumor and reducing systemic toxicity in several studies (Zheng et.al., 2025). Additionally, the inherent antioxidant activity of coconut-derived lignocellulosic fibers may enhance treatment efficacy by reducing oxidative stress within the tumor microenvironment, although further research is necessary to clarify their controlled-release behavior (Zheng et.al., 2025, Morsali et.al., 2022).

IN VITRO AND IN VIVO THERAPEUTIC EFFECTS

Research conducted in a laboratory setting has demonstrated that delivery systems based on plant proteins have an inhibitory effect on the proliferation of osteosarcoma cells in culture. Curcumin-loaded zein nanoparticles were found to cause apoptosis and suppress tumor growth in osteosarcoma cells (Shakori Poshteh et.al., 2024). In vivo studies have shown that these carriers tend to accumulate in areas where bone tumors occur, thereby lowering the risk of systemic side effects while increasing the effectiveness of the treatment (Wu et.al., 2024).

FUTURE PERSPECTIVES

Interest in plant protein-based delivery systems for bone cancer therapy has increased notably in recent years due to their inherent biocompatibility, biodegradability, and drug-loading capability. Recent reviews highlight the development of protein nanoparticles from plant sources—including zein, soy, and albumin—for biomedical applications, demonstrating improved targeting and controlled release profiles (Muraleedharan et.al., 2024,

Karnwal et.al., 2024). Additionally, nanoparticle-based systems designed specifically for bone targeting have been shown to enhance osteogenesis and local drug retention in bone cancer models (Guan et al., 2024). Finally, the incorporation of novel bacterial proteins with self-assembling tubular structures has enhanced targeting precision and encapsulation efficiency in bone tumor delivery designs (Bergeron et al., 2025).

The dual-loading capability of plant-protein-based microgel systems for both water-loving and water-repelling drugs offers promising opportunities for combination therapy applications (Dinh et.al, 2024)

CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Bone cancer therapy may be enhanced by protein-based drug delivery systems. Several hurdles still need to be overcome in order to effectively translate these systems into practical clinical uses.

CLINICAL APPLICATION AND REGULATORY CHALLENGES

Standardizing and scaling up fabrication techniques for plant-protein-based nanoparticles is essential for their clinical application (Zhang et.al., 2022). In addition, more extensive in vivo studies are needed to assess the long-term biocompatibility and safety of these systems (Dinh et.al., 2024).

TARGETING AND CONTROLLED RELEASE STRATEGIES

Creating targeted strategies that specifically focus on bone development is crucial for improving the effectiveness of treatments. Conjugating bone-affinitive molecules like bisphosphonates to delivery vehicles can greatly enhance the precision of targeting (Wang et.al., 2017). Developing stimulus-sensitive systems like pH-sensing drug carriers that release medication in tumor environments with low pH can decrease side effects and improve treatment accuracy (Chen et.al., 2021).

FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

Research in the future should concentrate on designing multi-functional systems based on plant proteins. Platforms capable of serving two purposes, namely promoting bone growth and releasing anticancer medications, may provide substantial clinical advantages (Dinh et.al., 2024). Genetic engineering could enhance the structural optimization of plant proteins, thereby potentially improving their bioavailability, stability, and ability to target effectively (Zhang et.al.,2022).

Further investigation is required to fully leverage the promising outcomes and maximize the potential of silk, sisal, and coconut shell fibers in bone-targeted drug delivery systems. The key steps toward the clinical adoption of these natural fibers as biofunctional components in advanced drug delivery systems will include standardizing the processing methods, increasing the drug-loading efficiencies, and improving the targeting capabilities. Replicating and increasing the manufacturing of silk fibroin-based systems consistently is a major problem to overcome. Obtaining regulatory approval necessitates comprehensive biocompatibility and safety evaluations [Hcini, 2023, Zamora-Mendoza et.al., 2023].

CONCLUSION

Plant-based protein materials offer a promising and sustainable platform for the controlled release of phytochemicals in bone cancer treatment. Polymers derived from natural sources, including zein, soy protein, and pea protein, possess biocompatibility, degrade at a rate that can be controlled, and the capability to encapsulate both hydrophilic and hydrophobic therapeutic agents.

Research has demonstrated that combining microencapsulation methods—such as spray drying, ionic gelation, and coacervation—with techniques that target bones, such as bisphosphonate modification or hydroxyapatite-binding peptides, holds considerable promise in increasing treatment precision while reducing the risk of systemic harm. The application of pH-sensitive and stimuli-responsive systems enables targeted release in the acidic bone tumor environment, thereby enhancing therapeutic effectiveness.

Despite recent progress, several problems persist. These encompass requirements for scalable production processes, extensive *in vivo* safety assessments, and regulatory approval routes. Recent breakthroughs, incorporating engineered plant proteins and adaptable delivery vehicles, are clearing the path for advanced, bone-targeted systems that administer phytochemicals.

In summary, the interdisciplinary approach combining materials science, natural product pharmacology, and bone tissue engineering offers promising avenues for future research and clinical applications. Plant-based protein carriers are expected to play a significant role in developing the next generation of targeted, efficient, and compatible treatments for bone cancer.

Alongside traditional plant-based protein carriers, incorporating natural fibers like silk fibroin, sisal, and coconut shell can provide extra functionality and structural support in the development of targeted delivery systems

focused on bone applications. Silk fibroin boasts superior biocompatibility and flexible degradation rates, which makes it an optimal candidate for prolonged phytochemical delivery. Sisal fibers, which are rich in cellulose and boast significant mechanical strength, can improve the stability of composite carriers. Coconut shell fibers possess inherent properties of natural antioxidants and hydrophobicity, potentially enhancing the encapsulation and controlled release of poorly soluble anticancer drug compounds. The use of these underutilized plant-based materials could enhance treatment effectiveness while enabling the creation of environmentally friendly, versatile systems for targeted bone cancer treatment.

References

- Ağan, K., Zarringhalami, R., Ağan, A. F., & Yaşar, M. (2020). Anticancer Effect of Food Supplements on Saos-2 Osteosarcoma Cell. *International Journal of Traditional and Complementary Medicine Research*, 1(1), 18-24.
- Arora, S., Singh, S., Piazza, G. A., Contreras, C. M., Panyam, J., & Singh, A. P. (2012). Honokiol: A novel natural agent for cancer prevention and therapy. *Current Molecular Medicine*, 12(10), 1244–1252. <https://doi.org/10.2174/156652412803833048>
- Bădilă, A. E., Rădulescu, D. M., Niculescu, A. G., Grumezescu, A. M., Rădulescu, M., & Rădulescu, A. R. (2021). Recent advances in the treatment of bone metastases and primary bone tumors: An up-to-date review. *Cancers*, 13(16), 4229.
- Bekele, A. E., Lemu, H. G., & Jiru, M. G. (2023). Study of the effects of alkali treatment and fiber orientation on mechanical properties of enset/sisal polymer hybrid composite. *Journal of composites science*, 7(1), 37.
- Bergeron, J. R., Lale-Farjat, S. L., Lewicka, H. M., Parry, C., & Kollman, J. M. (2025). A family of bacterial actin homologs forms a three-stranded tubular structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(11), e2500913122.
- Bielack, S. S., Kempf-Bielack, B., Delling, G., Exner, G. U., Flege, S., Helmke, K., ... & Winkler, K. (2002). Prognostic factors in high-grade osteosarcoma of the extremities or trunk: an analysis of 1,702 patients treated on neoadjuvant cooperative osteosarcoma study group protocols. *Journal of clinical oncology*, 20(3), 776-790.
- Brailson M., et al. (2022). Comprehensive characterization of PALF/PLA green composites by 3D printing. *Polymer Composites*, 43(9), 6051–6061.
- Chen, Y., Wang, C., Liu, H., & Zhang, Y. (2020). Engineering plant-protein-based scaffolds with hydroxyapatite for bone tissue applications. *Materials Science and Engineering: C*, 116, 111220. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111220>
- Chen, H., Wang, L., Zhang, J., & Zhang, Y. (2021). Zein-based coacervate microparticles for encapsulation of hydrophobic bioactives. *Food Hydrocolloids*, 112, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106281>
- Chow, E. K. H., & Ho, D. (2013). Cancer nanomedicine: from drug delivery to imaging. *Science translational medicine*, 5(216), 216rv4-216rv4.
- Deng, W., Liu, Y., Li, Y., & Zhao, Q. (2023). Controlled release systems based on plant proteins: Potential for localized bone cancer therapy. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 111(4), 589–603.
- Dinh, N.-D., Rodriguez-Garcia, M., Toprakcioglu, Z., Shen, Y., & Knowles, T. (2024). Hierarchical Plant Protein Microcapsules for Hydrophilic and Hydrophobic Cargo Molecules. *arXiv preprint arXiv:2501.01962*.

- Dorneles de Castro, B., Machado Neves Silva, K. M., Maziero, R., De Faria, P. E., Pereira Silva-Caldeira, P., & Campos Rubio, J. C. (2020). Influence of gamma radiation treatment on the mechanical properties of sisal fibers to use into composite materials. *Fibers and Polymers*, 21, 1816-1823.
- Faheed, N. K. (2024). Advantages of natural fiber composites for biomedical applications: a review of recent advances. *Emergent Materials*, 7(1), 63-75.
- Florczak, A., Deptuch, T., Kucharczyk, K., & Dams-Kozłowska, H. (2021). Systemic and local silk-based drug delivery systems for cancer therapy. *Cancers*, 13(21), 5389.
- Foppiani, J. A., Taritsa, I. C., Foster, L., Patel, A., Hernandez Alvarez, A., Lee, D., ... & Lin, S. J. (2024). Redefining surgical materials: applications of silk fibroin in osteofixation and fracture repair. *Biomimetics*, 9(5), 286.
- Granado-Serrano, A. B., Martín, M. Á., Bravo, L., Goya, L., & Ramos, S. (2010). Quercetin modulates Nrf2 and glutathione-related defenses in HepG2 cells: Involvement of p38. *Chemico-Biological Interactions*, 186(2), 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>
- Guan, Y., Zhang, W., Mao, Y., & Li, S. (2024). Nanoparticles and bone micro-environment: a comprehensive review for malignant bone tumor diagnosis and treatment. *Molecular Cancer*, 23(1), 246.
- Hcini, K. (2023). Silk Fibroin Nanoparticles (SFNs) for nanoencapsulation of bioactive molecules. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 10(1), 012-015.
- Huiskes, R. (1993). Stress shielding and bone resorption in THA: clinical versus computer-simulation studies. *Acta Orthopaedica Belgica*, 59(Suppl. 1), 118-129.
- Isakoff, M. S., et al. (2022). Osteosarcoma: Current treatment and a collaborative pathway to success. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 72(3), 198-214.
- Jouyandeh, M., Vahabi, H., Rabiee, N., Rabiee, M., Bagherzadeh, M., & Saeb, M. R. (2022). Green composites in bone tissue engineering. *Emergent Materials*, 5(3), 603-620.
- Karnwal, A., Jassim, A. Y., Mohammed, A. A., Sharma, V., Al-Tawaha, A. R. M. S., & Sivanesan, I. (2024). Nanotechnology for Healthcare: Plant-Derived Nanoparticles in Disease Treatment and Regenerative Medicine. *Pharmaceuticals*, 17(12), 1711.
- Koschek, P. R., Alviano, D. S., Alviano, C. S., & Gattass, C. R. (2007). The husk fiber of *Cocos nucifera* L. (Palmae) is a source of anti-neoplastic activity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 40, 1339-1343.
- Lee, H. S., Seo, E. Y., Kang, N. E., & Kim, W. K. (2008). [6]-Gingerol inhibits metastasis of MDA-MB-231 human breast cancer cells. *Journal*

- of Nutritional Biochemistry, 19(5), 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2007.05.002>
- Li, W., Yang, X., Wang, H., Wang, Y., & Wang, Z. (2023). EGCG suppresses osteosarcoma growth through inhibition of MMP-2/9 and NF- κ B pathways. *Phytomedicine*, 115, 154832.
- Li, H., Zhang, Y., & Chen, G. (2018). Injectable soy protein hydrogels for localized delivery of anticancer drugs in osteosarcoma treatment. *International Journal of Pharmaceutics*, 547(1–2), 470–479.
- Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25–33.
- Liu, Y., & Lu, W. (2019). Targeting strategies for improving delivery of anticancer phytochemicals. *Pharmacological Research*, 147, 104331. .
- Liu, J., Shen, G., & Yan, X. (2025). Bacterial Systems as a Precision Delivery Platform of Therapeutic Peptides for Cancer Therapy. *Polymer Science & Technology*.
- Liu, S., Yu, J. M., Gan, Y. C., Qiu, X. Z., Gao, Z. C., Wang, H., ... & Hou, H. H. (2023). Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis methods, recent advances, and emerging applications. *Military Medical Research*, 10(1), 16.
- Lu, S., Yang, Y., Song, Z., Cao, J., Han, Z., Chen, L., ... & Cheng, L. (2025). Dual functional nanoplatfroms potentiate osteosarcoma immunotherapy via microenvironment modulation. *National Science Review*, 12(3), nwaf002.
- Morsali, M., Moreno, A., Loukovitou, A., Pylypchuk, I., & Sipponen, M. H. (2022). Stabilized lignin nanoparticles for versatile hybrid and functional nanomaterials. *Biomacromolecules*, 23(11), 4597–4606.
- Muraleedharan, A., Acharya, S., & Kumar, R. (2024). Recent Updates on Diverse Nanoparticles and Nanostructures in Therapeutic and Diagnostic Applications with Special Focus on Smart Protein Nanoparticles: A Review. *ACS omega*, 9(42), 42613–42629.
- Nazarov, R., Jin, H. J., & Kaplan, D. L. (2004). Porous 3-D scaffolds from regenerated silk fibroin. *Biomacromolecules*, 5(3), 718–726. <https://doi.org/10.1021/bm034327c>
- Nor, M. E. M., Hussin, N., Salahuddin, M. A. H., Samah, A. H. A., Towhid, M. F., & Radzi, M. F. M. (2023). Evaluation of phenolic content and antibacterial activity of coconut (*cocos nucifera* L.) shell and coir powder in different extraction solvents. *Journal of Tropical Plant Physiology*, 15(1), 9–9.
- Nunes, R., Pereira, A. M., Costa, D., & Santos, H. A. (2020). Ionic gelation-based strategies for loading plant-derived therapeutics in biopolymer mic-

- rocapsules. *Materials Today Bio*, 7, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100070>
- Orel, V. E., Diedkov, A. G., Ostafichuk, V. V., Lykhova, O. O., Kolesnyk, D. L., Orel, V. B., ... & Prosvietova, A. B. (2024). Combination treatment with liposomal doxorubicin and inductive moderate hyperthermia for sarcoma Saos-2 cells. *Pharmaceuticals*, 17(1), 133.
- Ouyang, Z., Zhu, H., Liu, Z., Tu, C., Qu, J., Lu, Q., & Xu, M. (2024). Curcumin inhibits the proliferation and migration of osteosarcoma by regulating the expression of super-enhancer-associated genes. *Zhong nan da xue xue bao. Yi xue ban= Journal of Central South University. Medical Sciences*, 49(4), 541-552.
- Patel, A. R., Lesaffer, A., & Dewettinck, K. (2019). Microencapsulation of phytochemicals in protein-based matrices by spray drying: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 341–353. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.025>
- Pollini, M., & Paladini, F. (2024). The Emerging Role of Silk Fibroin for the Development of Novel Drug Delivery Systems. *Biomimetics*, 9(5), 295.
- Ramasamy, M., Kwon, T. H., & Choi, J. H. (2022). pH-responsive plant-protein-based drug carriers for bone tumor microenvironments. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 67, 102964. .
- Rockwood, D. N., Preda, R. C., Yücel, T., Wang, X., Lovett, M. L., & Kaplan, D. L. (2011). Materials fabrication from *Bombyx mori* silk fibroin. *Nature Protocols*, 6(10), 1612–1631. <https://doi.org/10.1038/nprot.2011.379>
- Roodman, G. D. (2004). Mechanisms of bone metastasis. *New England journal of medicine*, 350(16), 1655-1664.
- Ryan, G., Pandit, A., & Apatsidis, D. P. (2006). Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. *Biomaterials*, 27(13), 2651-2670.
- Sethupathi, M. et al. (2024). Recent Developments of PALF in polymer composites – a review. *Separations*, 11 (8), 245. doi:10.3390/separations11080245.
- Sethupathi, M., Khumalo, M. V., Skosana, S. J., & Muniyasamy, S. (2024). Recent Developments of Pineapple Leaf Fiber (PALF) Utilization in the Polymer Composites—A Review. *Separations*, 11(8), 245.
- Shakibaci, M., Buhrmann, C., & Mobasher, A. (2011). Resveratrol-mediated SIRT-1 interactions with p300 modulate receptor activator of NF-κB ligand (RANKL) activation of NF-κB signaling and inhibit osteoclastogenesis in bone-derived cells. *Journal of Biological Chemistry*, 286(13), 11492–11505.
- Shakori Poshteh, S., Alipour, S., & Varamini, P. (2024). Harnessing curcumin and nanotechnology for enhanced treatment of breast cancer bone metastasis. *Discover Nano*, 19(1), 177.

- Wang, C., Zhang, T., Wang, L., Chen, W., & Wang, X. (2021). Curcumin inhibits proliferation and invasion of osteosarcoma cells through inactivation of the NF- κ B pathway. *Journal of Bone Oncology*, 28, 100366.
- Wang, L., Wu, J., Liu, M., & Lu, W. (2021). Development of pea protein-based composites for bone scaffold applications. *Carbohydrate Polymers*, 263, 117998. .
- Wang, L., Xie, J., Zhang, Q., & Zhang, B. (2017). Bisphosphonate-conjugated delivery systems targeting bone for treatment of skeletal disorders. *Journal of Controlled Release*, 253, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.03.392>.
- Wang, X., Kluge, J. A., Leisk, G. G., & Kaplan, D. L. (2008). Sonication-induced gelation of silk fibroin for cell encapsulation. *Biomaterials*, 29(8), 1054–1064.
- Wijaya, C. J., Ismadji, S., & Gunawan, S. (2021). A review of lignocellulosic-derived nanoparticles for drug delivery applications: lignin nanoparticles, xylan nanoparticles, and cellulose nanocrystals. *Molecules*, 26(3), 676.
- Wu, Y., Sun, B., Tang, Y., Shen, A., Lin, Y., Zhao, X., ... & Gu, W. (2024). Bone targeted nano-drug and nano-delivery. *Bone Research*, 12(1), 51.
- Wu, X., Xin, Y., Zhang, H., Quan, L., & Ao, Q. (2024). Biopolymer-based nanomedicine for cancer therapy: opportunities and challenges. *International Journal of Nanomedicine*, 7415-7471.
- Zamora-Mendoza, L., Gushque, F., Yanez, S., Jara, N., Álvarez-Barreto, J. F., Zamora-Ledezma, C., ... & Alexis, F. (2023). Plant fibers as composite reinforcements for biomedical applications. *Bioengineering*, 10(7), 804.
- Zhang, Y., Liu, Q., Li, T., & Wei, X. (2020). Natural products in osteosarcoma treatment: Progress and prospects. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 582356. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.582356>
- Zhang, X., Li, Z., & Yu, H. (2022). Zein-based nanoparticles for targeted delivery of resveratrol to bone tumors. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 214, 112461. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112461>.
- Zheng, Q., Shi, S., Gu, Y., Osci, P. O., Wang, L., Duan, X., ... & Liao, X. (2025). Utilization of structure-specific lignin extracted from coconut fiber via deep eutectic solvents to enhance the functional properties of PVA nanocomposite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 297, 139914.
- Zhou, H., Yang, Y., Yu, Y., & Liu, X. (2021). Hydroxyapatite-binding peptide modification of drug carriers for improved bone targeting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(5), 6393–6403. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c22515>

İmalat Süreçlerinde Ortam Gazlarının Enerji Verimliliği Açısından İzlenmesi

Ganime Tuğba Önder¹

Özet

İmalat ortamlarında bulunan, zehirli, yanıcı, patlayıcı ya da oksijen seviyesinde olumsuz değişikliklere neden olan tehlikeli gazların tespit edilmesi, izlenmesi ve kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır. İmalat süreçlerinin kaliteli, verimli ve çevreye zarar vermeden devam edebilmesi için her aşamasında takip edilmesi gerekir. Özellikle, gerçekleştirilen kesme, delme, kaynak gibi mekanik operasyonlar, ortamda var olan gazların niteliğine ve miktarına bağlı olarak her an tepkime yaratabilir ve geri döndürülemez kayıplara neden olabilir. İmalat sürecinin ve çevrenin olumsuz etkilenmemesi, iş akışında duraklamalar yaşanmaması için imalat öncesinde ve imalat esnasında bazı prosedürlerin uygulanması gerekir. Bu çalışmada, gaz ölçümü gerçekleştirilmesi gereken ortamlar, iş kazası, zehirlenme ve patlama gibi olumsuzlukların önüne geçilmesi için yapılması gerekenler anlatılmaktadır. Bu sayede sistemlerin düşük maliyetli, çevre açısından sorun teşkil etmeden, verimli ve güvenli çalışması sağlanabilmektedir.

1. Giriş

İmalat süreçlerinde çeşitli gazlar ortaya çıkmaktadır. Bunlar arasında, karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), hidrojen sülfür (H₂S), metanol (CH₃OH), uçucu organik bileşikler (VOC), propan (C₃H₈), azot dioksit (NO₂) ve oksijen (O₂) seviyeleri öne çıkar. Bu gazlardan bazıları toksik, bazıları ise yanıcı ve patlayıcıdır (Tablo1). Toksik gazlar, bulunduğu zaman zehirleyici etkilere sebep olurken, yanıcı ve patlayıcı gazlar, niteliğine, miktarına ve bulunduğu ortamdaki durumuna bağlı olarak yanma, patlama, zehirlenme gibi yapısal ve çevresel hasarlara sebep olmaktadır. İmalat tesislerinde, ortam havasındaki gazların kontrolü, yalnızca iş sağlığı ve

1 Öğr. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Adana MYO Elektrik ve Enerji Bölümü İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, gercoskun@cu.edu.tr, 0000-0002-7504-7394

güvenliği açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliğinin sağlanması açısından da büyük önem taşır. Endüstriyel üretim süreçlerinde açığa çıkan gazlar, hem çalışan sağlığını tehdit eder, hem de sistemlerin verimli çalışmasını engeller. Bu nedenle ortam gazlarının izlenmesi, kontrol altına alınması ve güvenli seviyelerde tutulması hayati önem taşır.

Gaz ölçüm cihazları, ortamda bulunan gazların türünü ve miktarını sürekli olarak denetleyen sistem elamanlarıdır. Bu cihazlar ile gazın anlık takibi yapılabilir, gaz sızıntısı ya da oluşan ani bir artışın tespiti gerçekleştirilebilir. Gaz detektörü olarak isimlendirilen bu cihazlar, kullanıcıyı uyarmak amacıyla ışıklı ve sesli uyarı/ ikaz özellikleri taşırlar. Bu cihazlar aracılığı ile elde edilen veriler, ölçüm yapılan gaz ile ilgili bir envanter ortaya koyacağı gibi o gazın ait yanma koşullarını optimize etmeyi de sağlar. İmalat nedeniyle hangi gazın ihtiyaç duyuluyorsa, bu gazın ortamda fazlalığının tespiti ile enerji kaybı minimuma indirilir. Bu durum, aynı zamanda gereksiz kaynak kullanımının da önüne geçer. Yanma işlemi için kullanılan bir gazın, az olması da eksik yanma nedeni ile enerji kayıplarına ve ortamda bazı artık gazların oluşumuna neden olur. İstenmeyen gazlar ise emisyon değerlerinde artmaya ve çevre için olumsuz etkilere neden olur. Gazların fazlalığı gibi azlığının da tespiti bu nedenle çok önemlidir.

2. Gazlar ve Ölçüm Özellikleri

2.1. Alt ve Üst Patlama Sınırı

Gazlar, belirli aralıklarda hava ile karıştığında yanıcı ve patlayıcı özellik taşır. Alt patlama sınırı (Lower Explosive Limit-LEL), bir gazın havadaki konsantrasyonunun patlama yaratabilecek en düşük seviyesidir. Bu seviyenin altındaki oranlarda, gazlar tutuşmazlar. Üst patlama sınırı (Upper Explosion Limit -UEL) ise bir gazın havadaki konsantrasyonunun patlama yaratabilecek en yüksek seviyesidir (ÇSGB, 2015; İSG 2012). Bazı gazlara ait LEL ve UEL değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

LEL değeri altında fakir karışım, UEL değeri üzerinde ise zengin karışım oluştuğu için yanma ya da patlama bu durumda meydana gelmez (Celep, 2023). LEL seviyesinin altında, karışım henüz yanıcı değildir ancak, gaz sızıntısı mümkündür. UEL değeri aşıldığında ise patlama olmamasının nedeni, ortamda yeterli oksijen bulunmamasıdır. Yetersiz oksijen nedeniyle, yanma olayı gerçekleşmez. LEL %100 olduğunda ortamda patlama riski çok yüksektir ve ufak bir kıvılcım ya da statik elektrik gibi etkenlerle, anında patlama meydana gelebilir. Ortama herhangi bir nedenle hava girişi de oksijen girişine neden olacağı için patlama tehlikesi yüksektir.

Patlamadan ve yanmadan korunmak amacıyla, imalat yapılan ve çalışma ortamlarda, sürekli gaz takibi yapılmalı, alt ve üst gaz sınır değerlerine dikkat edilmelidir. Ortam gaz seviyesi düşük seviyelerde kritik hale gelmeden önce, cihaz üzerinde ayarlanmış LEL değerinin tespiti ile havalandırma yapılarak önlem alınabilir. Havalandırma sistemleri, imalat nedeniyle oluşan egzoz dumanlarını, yanıcı ve patlayıcı özellik taşıyan ve ortamda istenmeyen gazları, sağlıklı bir şekilde ortamdaki uzaklaştırmak için kullanılırlar. Ortamda bulunan yüksek gaz seviyelerinde, Şekil 1’de görülen özellikle imalat ortamları için uygun olan, pratik hava tahliye sistemleri kullanılmaktadır. Bu tahliye sistemi, ortamda bulunan ve uzaklaştırılmak istenen gaz, buhar, duman ya da koku gibi unsurların, ağız kısmında bulunan fan yardımı ile iç ortamdaki emilmesini ve dış havaya naklini hızlıca sağlar.



Şekil 1. Hava tahliye sistemi

Tablo 1. Gazlar ve özellikleri

Gaz	Özellik
CO	Toksik- Yanıcı Patlayıcı
CO ₂	Toksik
CH ₄	Yanıcı Patlayıcı
C ₃ H ₈	Yanıcı Patlayıcı
H ₂ S	Toksik- Yanıcı Patlayıcı
NO ₂	Toksik
O ₂	Yüksek basınçta toksik olabilir, yanıcı patlayıcı değildir ancak patlamayı destekleyicidir
CH ₃ OH	Toksik- Yanıcı Patlayıcı
VOC	Toksik- Yanıcı Patlayıcı

Tablo 2. Bazı gazlara ait LEL ve UEL değerleri

Gaz	LEL (% hacim)	UEL (% hacim)
CO	12.5	74
H ₂	4	75
C ₃ H ₈	2.1	9.5
CH ₄	5	15
H ₂ S	4	44
CH ₃ OH	6	36
VOC	1-3	7-12

2.2. Karbon Monoksit (CO)

Toksik, yanıcı ve patlayıcı özellikler taşıyan CO, oksijen taşıma kapasitesini engellemesi nedeniyle, hem çalışan sağlığı, hem de proses kontrolü için takip edilmesi gereken bir gazdır. Bu gaz, renksiz, kokusuz ve toksik özellikler taşır. CO gazı, elektrokimyasal (EC) ve kızılötesi (NDIR -Nondispersive Infrared) sensörlü gaz detektörleriyle ölçülmektedir. Özellikle kazan, fırın gibi yanma sistemleri olan çalışma alanlarında, yanma verimliliğini izlemek, eksikliğini veya fazlalığını belirlemek amacıyla ihtiyaç duyulur. Tam yanma anında, CO seviyesinin sıfıra yakın olması beklenir. Eğer CO seviyesi yüksekse, bu yanmanın yetersiz olduğuna işaret eder. Bu durum, oksijenin de düşük olmasından kaynaklanır. Bu alanlarda, tam yanma olayının sağlıklı gerçekleştiği takip edilmelidir. Gazların beklenen seviyelerde olmaması, brülör gibi yakıt yakma sistemlerindeki bir problemten kaynaklanabileceği gibi, yanma gazlarının karışım oranlarındaki hatadan da kaynaklanabilir.

Kapalı alan olarak tabir edilen çalışma ortamlarında ise CO, zehirlenmeyi engellemek ve yasal sınırlamaları sağlamak amacıyla kontrol altında tutulur. Maden, metal işi yapılan sektörler, kapalı otopark, endüstriyel mutfak gibi alanlarda CO seviyesi, güvenli bir ortam sağlanabilmesi için 10 ppm altında kalmalıdır (TS EN 50291-1) . Kimya ve petrokimya endüstrisi için üretimin bir parçası olan CO, 8 saatlik çalışma süresi için 25 ppm (ACGIH 2024) - 50 ppm (İSGÜY 2013) kronik maruziyet süresine sahiptir.

2.3. Karbondioksit (CO₂)

Yanıcı olmayan CO₂, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Ölçümü için NDIR sensör kullanımı, en yaygın olanıdır. İmalatta tüp olarak kullanılan ortamlarda, gaz sızıntısı, zehirlenme, boğulma tehlikesi nedeniyle takip edilmelidir (TS ISO 16000-26). Kalite ve güvenlik amacıyla gıda sektöründe;

ortamda havalandırmanın yetersiz olduğu alanlarda sersemlik, baş ağrısı ya da performans azalmasına neden olmaması için iç hava kalitesi için takip edilmelidir (TS EN 13779). CO₂ tüpleri ile çalışılan imalat sektörlerinde, havalandırma sistemlerinin periyodik kontrolü mutlaka yapılmalıdır.

2.4. Metan (CH₄)

Renksiz, kokusuz, yanıcı bir gaz olan CH₄ gazı, ısınma, elektrik üretimi, atıksu arıtma ve tarımsal atıklardan biyogaz üretilen tesislerde, yaygın olarak bulunur. Hava ile belirli bir oranda karışabilen CH₄ gazının tespiti için EC, katalitik boncuk (pellistor) ve NDIR sensörler tercih edilir. Patlama riskine karşı, %LEL seviyeleri imalat işlemleri esansında sürekli takip edilmelidir. Ortamda %5 hacmin üzerinde metan, hava ile patlayıcı karışım oluşturabilir (ISO 10156).

2.5. Propan (C₃H₈)

C₃H₈ gazı, renksiz ve kokusuzdur. Sızıntısının fark edilebilmesi için uyarı amaçlı içerisine koku eklenir. Hava ile %2.1 – %9.5 hacim aralığında patlayıcı bir karışım haline gelen yüksek yanıcılığa sahip bir gazdır (İSG 2012). Bu nedenle, imalat ortamlarında güvenli çalışılabilmesi için kontrol altında tutulması ve sürekli izlenmesi gerekir. Katalitik ve IR sensörlü cihazlar ile ölçülür.

2.6. Hidrojen Sülfür (H₂S),

H₂S gazı, renksiz ve çürük yumurta benzeyen bir kokuya sahiptir. Toksik, yanıcı ve patlayıcı bir gaz olduğu için elektrokimyasal, alev fotometrik dedektör ve PID dedektör sensörlerle hassas ölçüm yapılmalıdır (TS ISO 6326-4). Bu gaz, düşük konsantrasyonlarda dahi merkezi sinir sistemini olumsuz etkiler. Çalışma ortamında 10 ppm H₂S gazı bulunması durumunda 10 dakikadan daha fazla süre kalınmamalı, bu değer 100 ppm olduğunda ise ortam acilen terkedilmelidir (NIOSH 2011).

2.7. Azot Dioksit (NO₂)

NO₂ gazı, enerji santralleri, sağlık, gıda, kimya, otomotiv endüstrisi gibi farklı sektörlerde yaygın olarak bulunmaktadır. NO₂ gazı, yanıcı ve patlayıcılık açısından güvenilir bir gaz olmakla beraber, yüksek konsantrasyonlarda solunum ve sinir sistemini olumsuz etkileyen toksik bir gazdır. Ayrıca, havadaki su buharı ile reaksiyona girerek korozif nitrik asit ve toksik organik nitrat oluşturarak çevreye ve havaya zarar verir. Ölçümünde EC sensörler kullanılır. Araç trafiği olan yerlerde NO₂ gazına daha fazla rastlandığından, trafikte salınımının da sürekli izlenmesi gerekir.

2.8. Oksijen (O₂)

Oksijen yanıcı değil yakıcı bir gaz olduğu için alt ve üst patlama değerleri yoktur. Ancak, yanma tehlikesi taşıyan gazlar ile bir arada bulunduğu tehlike yaratır. Oksijen seviyesi %19,5 altına düşmemeli, %23,5 üzerine çıkmamalıdır (NIOSH 2011). Kritik seviyelerde alarm sistemleri devreye girmelidir. O₂ ölçümleri, EC sensör, zirkonya sensör, optik (Lazer/IR Spektroskopi) sensörler ve laboratuvar cihazlarında paramanyetik sensörler ile hassas olarak yapılır.

2.9. Metanol (CH₃OH)

Renksiz, uçucu, yanıcı ve çok zehirli bir sıvıdır. Cilt, solunum ya da ağız yolu ile alındığında ciddi hasarlara neden olur. 10 ml CH₃OH optik sınırlara hasar verirken, 30 ml ölümcül olabilir. %6 oranında CH₃OH, hava ile karışarak patlamaya uygun ortam oluşturur (OSHA 2025). Katalitik, IR ve PID sensörlerle ölçülebilir. Havadan ağır olan bu gazın ölçümü için gaz dedektörleri, yere yakın konumlandırılmalıdır.

2.10. Uçucu Organik Bileşikler (VOC)

Toksik, yanıcı ve patlayıcı özellik taşıyan VOC'ler, düşük LEL değerine (1-3) sahiptirler, bu değer altındaki dahi sıcak yüze ile temas ya da statik elektrik ile alev alabilirler. Bu nedenle yetersiz havalandırma ya da gaz birikimi ile patlayıcı bir ortam yaratırlar. Boya, plastik, ilaç üretimi yapılan sektörlerde VOC'ler sıklıkla bulunmaktadır. Özellikle solvent kullanılan ortamlarda, maske ve havalandırma tedbirleri alınmalıdır. VOC ölçümlerinde, PID cihazlar ve IR spektrum analizörleri tercih edilir.

2.11. Gaz Ölçüm İşlemi

Gaz dedektörleri ve emisyon ölçüm cihazları aracılığı ile gerçekleştirilen ölçümler, imalat ortamının, personellerin ve çevrenin güvenliğini sağlamak için yapılır. Yapılan bu işlem, havalandırma sistemlerinin performansını, egzoz gazlarının dışarıya doğru atıldığını da kontrol etmek amacıyla yapılmaktadır. Gaz ölçüm cihazları genellikle %LEL cinsinden uyarı verirler.

Aşağıda, gaz ölçümü için kullanılan portatif cihazlara ait, genel uygulama adımları yer almaktadır.

1. Cihaz açılınca kalibrasyon otomatik yapılır. Bu esnada ikaz ışıkları kısa süreli uyarılar verir. Kalibrasyon işlemi değerlerin doğru okunması için önemli bir adımdır.

2. Sensörlerin çalıştığı doğrulamak, ölçüm yapılacak gaza cihazın yanıt verdiğinden emin olmak amacıyla, fonksiyon testi olarak da anılan “Bump test” yapılır. Bu aşama, tehlikeli bir gazın varlığının tespit edilemediğini gösteren bir aşamadır.

3. Cihaz, üzerinde bulunan sensörler vasıtasıyla algılama yapmaktadır (Şekil 2). Ölçüm esnasında cihaz kullanıcıya yakın olmalıdır.



Şekil 2. Portatif gaz ölçüm cihazı

4. Ölçülen gaz miktarları ve %LEL değeri ekranda görüntülenir ve ekran üzerinden takip edilir (Şekil 3).



Şekil 3. Gaz ölçüm cihaz ekranı

5. Cihazda tanımlanan gazların limit değerleri aşılsa, sesli-ışıklı ikazlar ile sistem alarm durumuna geçer. Örneğin, CO seviyesi 25 ppm'i aşmamalı, metan %5 LEL'in altında kalmalı ve O₂ seviyesi %19,5–23,5 arasında tutulmalıdır. Şekil 2'de ölçüm cihazı, metan seviyesi için ikaz durumundadır.

Güvenilir bir ölçme işlemi yapabilmek için dikkat edilmesi gerekenler;

- Cihazlar günlük kontrol edilmeli, haftalık test yapılmalı,
- Cihazın pili dolu ve sensörleri sağlam olmalı,
- Cihazı eğitimli personel kullanmalı,
- Kapalı alanlara gaz ölçümü yapılmadan girilmemeli,
- Kritik değerlerde ortamdan uzaklaşılmalıdır.

Tablo 3'de, imalat ortamları için, bazı önemli gazlara ait ölçme işlemleri özetlenmiştir.

Tablo 3. Ölçme İşlemleri

Gaz	Tespit, izleme ve kontrol yöntemi	Ne Zaman?	Nerede?
CO	EC ve NDIR sensör	Her operasyon öncesi,	Yanma sistemleri (kazan, fırın, türbin vb.), Kapalı alan, Kimya ve Petrokimya Endüstrileri
CO ₂	NDIR sensör	operasyon anı ve sonrası sürekli kontrol	Havalandırma sistemleri, laboratuvarlar, endüstriyel mahaller
CH ₄	EC, Pellistor ve NDIR		Madenler, doğalgaz tesisleri, petrol rafinerileri
C ₃ H ₈	Katalitik, IR sensör		Metal işleme, plastik-cam sanayi, ısıtma sistemleri, LPG araç yakıtı, tarım
H ₂ S	EC, PID ve alev fotometrik sensör		Atıksu arıtma tesisi, kanalizasyon sistemleri rafineriler, petrol ve gaz sektörü, biyogaz tesisleri, kimya endüstrisi, tarım
NO ₂	EC ve NDIR sensör		Trafik, Egzoz gazı, tüneller
CH ₃ OH	Katalitik, IR ve PID sensör		Plastik, boya ve ilaç sanayii, biodizel yakıt üretiminde katkı, yarış yakıtı katkısı
O ₂	EC, zirkonya ve paramanyetik sensör, Lazer/IR Spektroskopisi		Kapalı alanlar, oksijen seviye takibi gerektiren alanlar, medikal
VOC	PID sensör		Endüstriyel tesisler, boya ve solvent kullanılan sektörler, laboratuvarlar

3. Sonuç ve Öneriler

Gaz ölçüm cihazları, başta işçi sağlığı ve güvenliği olmak üzere, işletme ortamını ve çevreyi de kontrol altında tutabilmek amacıyla, sanayi ve kamu sektörlerinde vazgeçilmez ekipmanlardandır. Günümüzde, gaz algılama ve izleme sistemleri mekanik, sabit ve basit yapısından çıkarak, dijital, taşınabilen ve kablosuz kullanılabilen, akıllı sensörler ile desteklenmiş, uzaktan ve internet aracılığı ile denetlenebilen (IoT destekli uzaktan izleme sistemleri) bir yapıya kavuşmuştur. Patlamaya karşı ekipmanlar, basit kıvılcım önleyici, basit alev tutucu, manuel ve klasik elektrikli cihazlar, otomatik kontrol edilebilen (SCADA, DCS vb.), akıllı alarm sistemleri ve patlamaya dayanıklı (ex-proof) malzemeler ile desteklenmektedir. Manuel örneklemeler ve laboratuvar analizleri artık, gerçek zamanlı yapay zeka ve bulut tabanlı risk izleme platformları ile yapılabilmektedir. Yüz yüze yapılması gereken bazı uygulamalı eğitimler dahi günümüzde sanal gerçeklik (VR) simülasyonları ile yapılabilmekte, birçok analiz takip ve listeleme işlemleri mobil uygulamalar aracılığı ile gerçekleştirilebilmektedir. İmalat süreçlerinde, ortam gazlarının ölçülmesine dair yenilikler, işin türüne ve niteliğine göre çalışma alanına entegre edilmelidir.

Yapılan ölçümlerin, eğitimli personel tarafından, kalibre edilmiş cihazlar ile olması son derece önemlidir. Doğru ölçüm, doğru cihaz ve doğru eğitim, hayat kurtaracağı gibi en ufak bir prosedürün yerine getirilmemesi de zehirlenme, yanma ya da patlamaya neden olabilir. Şekil 4’de kapalı alanda gerçekleştirilen bir kesme işlemi görüntüsü yer almaktadır. Sıcaklık yükselmeden, ortamda bulunan gaz, yanma ve patlama noktasına erişmeden, çıkan kıvılcımların sorun çıkartmadan söndüldüğünden emin olarak işlem yapılması için su ile kesme işlemi yapılmaktadır. Bu ve benzeri işlemlerde, sıcaklık yükselmeden ve oluşan tehlikeli gazın tahliye edildiğinden emin olmak için işlem sürekli gaz + sıcaklık ölçümü altında ve zaman aralıklarıyla gerçekleştirilir. Bu şekilde, imalat işlemlerinin güvenli yapılması sağlanır.



Şekil 4. Kapalı alanda kesme işlemi

Gaz kaçak alarm sistemleri, alev sızdırmaz (ex-proof) donanım, eksiksiz ve her an çalışır durumda olmalıdır. Bakım ve kalibrasyon işlemleri işin niteliğine göre her işlem öncesinde, işlem sırasında ve sonrasında ayrıca belirlenen periyotlarda kusursuz bir şekilde yapılmalıdır. Özellikle, sınır gaz değerlerinde yapılacak proses işlemleri, portatif CO detektörleri ile anlık ve yakın mesafeden sürekli kontrol altında tutulmalıdır. İmalat işlemleri, ölçümü gerçekleştiren personel izin vermediği müddetçe başlamamalıdır. Aksi takdirde yanma ve patlama olayları kaçınılmaz olur. İşlemler yapılırken, tüm iş güvenliği önlemleri alınmış olmalıdır. Alınan önlemlere rağmen, herhangi bir olumsuzluğun meydana gelme ihtimaline karşı, her an yangın söndürme cihazları, yangın söndürme battaniyesi benzeri ekipman yangını büyümeden söndürmek üzere işlem yapılan alanda hazır bulundurulur. Eğer yapılan işlemler, kapalı alanda gerçekleştirilecekse, kapalı alanlara girerken ya da patlama riski olan yerlerde gaz ölçümü yapılmadan hiçbir işleme başlanmamalıdır. Burada yapılacak işlemler kapalı alan niteliğine uygun olarak belirlenmiş süreye ya da haberleşme sistemine bağlı kalarak işlem prosedürlerine uyulmalıdır. İmalat yapılan tüm ortamlarında, acil durum kaçış yollarının bulunması da önemli bir zorunluluktur. 6331 sayılı iş sağlığı ve güvenliği kanununa göre işverenler, işin türüne ve tehlikesine göre havalandırma ve gaz ölçüm sistemlerinin kurulması, risk değerlendirmesi yapılması, çalışanların eğitilmesini ve güvenli çalışma ortamının sağlanması ile yükümlüdür.

İmalat tesislerinde, ortamdan elde edilen gaz ölçüm sonuçlarıyla yapılan veri analizleri sayesinde, kayıp ve kaçak gaz miktarları, sebep ve sonuçları belirlenerek, ideal imalat ortamı tanımlanabilir. Ayrıca, her imalat alanına

uygun olarak, mevcut ve tehlikeli durumlar için uygun önlemler alınabilir ya da tehlikeli durum tamamen ortadan kaldırılabilir. Bu durum, maliyet açısından tasarruf elde etmek için de oldukça önemlidir. Çünkü herhangi bir kaza, yanma ya da patlama durumunda, işletmeler büyük maddi kayıplar yaşamakta, bunun yanı sıra işletme imajı da olumsuz etkilenmektedir. İmalat ortamlarında gaz takibi yapmak, sadece gazların miktarını belirlemekle kalmaz, tesise ait bir elemanda arıza durumu varsa, bunun da tespit edilmesine hizmet eder. Sistemin tüm elemanlarının, enerji verimliliği açısından, bir bütün olarak çalışması gerekir. İmalat ortamında var olan ve imalat nedeniyle oluşan gaz emisyon değerleri, dinamik, eş zamanlı, otomatik ve teknolojik yenilikler ile ölçülebilir, gereken tedbirler gecikmeden alınabilir. Bu sayede, zaman ve enerji kayıplarının önüne geçilebilir. Çalışanlar ve çevre korunabilir.

Kaynaklar

- ACGIH. (2024). Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs). American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Celep, F. (2023). Uçucu yanıcı gazların birikme davranışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu yöntemiyle incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,
- ÇSGB (2015). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunmalarına İlişkin Uygulama Rehberi, 51 s.
- ISO 10156 (2017). Gases and gas mixtures- Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets.
- İSGÜY (2013). T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği ve İşyeri Ortam Ölçümleri Rehberi. Resmî Gazete No: 28512.
- İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu- 6331 – İSG (2012). Resmî Gazete Tarihi: 30.06.2012 Resmî Gazete Sayısı: 28339.
- National Institute for Occupational Safety and Health- NIOSH (2011). Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLHs). Centers for Disease Control and Prevention.
- Occupational Safety and Health Administration- OSHA (2025). Methanol. U.S. Department of Labor. Retrieved June 7, 2025, <https://www.osha.gov/chemicaldata/474>.
- TS EN 13779- Türk Standardları Enstitüsü- TSE (2004). Binalarda iç hava kalitesi için havalandırma standardı. Ankara: TSE Yayınları.
- TS ISO 16000-26- Türk Standardları Enstitüsü- TSE (2004). İç ortam havası: Karbondioksit konsantrasyonunun ölçülmesi. Ankara: TSE Yayınları.
- TS EN 50291-1- Türk Standardları Enstitüsü- TSE (2006). Ev tipi karbon monoksit (CO) uyarı cihazları - Bölüm 1: Genel kurallar ve deney metotları (Standard No. TS EN 50291-1). Ankara: TSE Yayınları.
- TS ISO 6326-4- Türk Standardları Enstitüsü- TSE (2006). Doğalgaz- Kükürt bileşiklerinin tayini bölüm 4: Hidrojen sülfür karbon sülfür ve kükürt içeren koku verici maddelerin alev fotometrik dedektör kullanılarak gaz kromatografik yöntemle tayini. Ankara: TSE Yayınları.

A Comprehensive Investigation on the Effect of Growth Rate and Composition on Dendritic Microstructure and Arm Spacings in Directionally Solidified Al-Zn Alloys

Emin Çadırılı¹

Hasan Kaya²

Uğur Büyük³

Abstract

Cellular and dendritic microstructures formed during the solidification of alloy systems lead to a non-uniform distribution of solute elements, i.e., microsegregation, significantly influencing the final properties of the material. The scale and morphology of microsegregation are primarily characterized by primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings. This study investigates the directional solidification behavior of three Al-Zn binary alloys with different compositions: Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn. Alloy samples, prepared under vacuum using high-purity (99.99%) starting materials, were unidirectionally solidified in a custom-built Bridgman-type directional solidification furnace under a constant thermal gradient ($G = 10.3 \text{ K/mm}$) and varying growth rates (V) ranging from $8.25 \mu\text{m/s}$ to $165 \mu\text{m/s}$. From the microstructural images obtained from transverse and longitudinal sections of the solidified samples, the primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings were meticulously measured as a function of zinc concentration (C_0) and growth rate (V). The experimentally determined λ - V

- 1 Prof. Dr., Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Science, Department of Physics, Niğde, Turkey, ecadirli@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8085-9733
- 2 Prof. Dr., Erciyes University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Kayseri, Turkey, hasankaya@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3529-9762
- 3 Prof. Dr., Erciyes University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Kayseri, Turkey, buyuk@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6830-8349

and λ -Co relationships were mathematically modeled using linear regression analysis, and the obtained findings were comprehensively compared with existing theoretical solidification models and similar experimental studies in the literature. This research provides a fundamental understanding of the microstructural evolution in Al-Zn alloys and offers significant data for the design of desired microstructures, and consequently material properties, through the control of solidification parameters.

INTRODUCTION

Aluminum-Zinc (Al-Zn) alloys, particularly those forming the basis of the high-strength 7000 series, are materials of strategic importance in numerous critical engineering applications, including aerospace, automotive, marine, and defense industries, owing to their low density, superior mechanical performance, good corrosion resistance, and age-hardening capabilities (Polmear, 2006; Davis, 1993). The outstanding properties exhibited by these alloys are largely dependent on the microstructural features developed during the solidification process, especially the dendritic and cellular morphologies, grain size, and the distribution of secondary phases (Porter & Easterling, 1992). Consequently, a thorough understanding of the effects of solidification parameters on microstructural development and the ability to precisely control these relationships are vital requisitos for producing high-performance Al-Zn alloys with desired end-user properties.

Solidification is a fundamental phase transformation wherein a material transitions from a liquid to a solid phase, and the microstructural evolution occurring during this process dictates the macroscopic behavior of the alloy. The solidification of most metals and alloys, particularly in conventional casting methods, often results in a cellular or, more commonly, a dendritic growth morphology due to the destabilization of a planar solid-liquid interface (Kurz & Fisher, 1998). Dendritic structures possess complex, tree-like geometries, comprising primary dendrite trunks and secondary, tertiary, and higher-order arms growing at specific angles from them. This intricate structure leads to a non-uniform distribution of alloying elements and impurities between the dendrite arms and within the dendrite cores, a phenomenon known as microsegregation (Osorio et al., 2006; Flemings, 1974). The extent and scale of microsegregation can significantly affect the material's mechanical strength, ductility, fatigue life, fracture toughness, and corrosion resistance (Ganesan et al., 2021). Therefore, the control of microstructural parameters such as the primary dendrite arm spacing (λ_1) and secondary dendrite arm spacing (λ_2), which are indicative of microsegregation and define the fineness of the dendritic structure, is of

paramount importance. λ_1 refers to the distance between the centers of adjacent dendrites, while λ_2 denotes the average spacing between adjacent secondary arms on the same dendrite. These parameters are primarily dependent on solidification conditions such as the chemical composition of the alloy (Co), the temperature gradient (G) during solidification, and the growth rate (V) (Gündüz & Çadırlı, 2002; Trivedi & Kurz, 1994).

Directional solidification techniques are powerful experimental methods wherein solidification parameters (especially G and V) can be independently controlled, thereby enabling a systematic investigation of microstructural development (Tiller et al., 1953). In directional solidification experiments conducted using Bridgman-type furnaces, the sample is solidified by pulling it at a controlled rate through a fixed temperature gradient. This method is widely employed, particularly for determining the relationship between microstructural scales like λ_1 and λ_2 and the solidification parameters (Burden & Hunt, 1974; Liu et al., 2005). In the literature, theoretical models dependent on solidification parameters have been developed for λ_1 by researchers such as Hunt (1979), Kurz and Fisher (1981), and Trivedi (1984), and for λ_2 by Trivedi and Somboonsuk (1984). These models generally predict that λ_1 is proportional to $V^{-0.25} G^{-0.5}$ and λ_2 is proportional to $V^{-0.5}$ (or similar power-law expressions), although these exponents can vary depending on the alloy system and specific solidification conditions.

Al-Zn alloys also exhibit noteworthy characteristics in terms of their solidification behavior. Aluminum, with its face-centered cubic (FCC) crystal structure, displays a weak anisotropy in its solid-liquid interfacial energy, whereas zinc, having a hexagonal close-packed (HCP) structure, exhibits a pronounced anisotropy (Gonzales & Rappaz, 2006). This difference in anisotropy can influence dendritic growth morphologies and orientations, particularly at high zinc concentrations (Rhême et al., 2008). In the Al-Zn system, the wide solidification range and the equilibrium distribution coefficient (k) of zinc in aluminum being less than unity (Osamura et al., 1985) lead to significant microsegregation. This situation can result in the formation of zinc-rich phases in the interdendritic regions and, consequently, a heterogeneous microstructure.

The primary objective of this study is to experimentally investigate how the primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings change with growth rate (V) and alloy composition (Co) during the directional solidification of Al-Zn binary alloys with different zinc concentrations (Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn). It is aimed to develop a more comprehensive understanding of the solidification behavior of Al-

Zn alloys by comparing the microstructural data obtained from directional solidification experiments conducted under a constant temperature gradient ($G = 10.3 \text{ K/mm}$) over a wide range of growth rates ($8.25\text{-}165 \mu\text{m/s}$) with existing theoretical models and similar experimental studies in the literature. The results obtained are expected to contribute to the optimization of casting and solidification processes for these alloys and, consequently, to the development of materials with superior properties.

MATERIALS AND METHODS

2.1. Alloy Preparation and Directional Solidification Procedure

The Al-xZn ($x = 7, 10, \text{ and } 20 \text{ wt.}\%$) binary alloys investigated in this study were prepared under vacuum using high-purity (99.99%) aluminum and zinc metals. The starting materials, after being precisely weighed according to the desired compositions, were melted in graphite crucibles within an induction furnace under a pressure of approximately 10^{-3} mbar . To ensure complete homogenization of the molten alloy, each composition was held at a temperature approximately 100 K above its melting point for a specific duration (e.g., 30 minutes) and mechanically stirred. Following the homogenization process, each molten alloy was poured into high-density graphite crucibles (4 mm inner diameter, 6.35 mm outer diameter, and 250 mm length) held in a specially designed hot-filling unit. Maintaining the crucibles at a temperature approximately 100 K above the alloy's melting point helped prevent premature solidification during casting and ensured complete filling of the crucible.

Subsequently, each sample was vertically positioned in a custom-built, computer-controlled Bridgman-type directional solidification furnace. The details of the experimental apparatus and procedures have been published in previous studies [14-16]. Unidirectional solidification of the samples was performed under a constant thermal gradient ($G = 10.3 \text{ K/mm}$) established between the heater and cooler zones of the furnace. The maximum operating temperature of the furnace was set to 1250 K. After stabilizing the thermal conditions within the furnace and purging the sample environment with high-purity argon gas, the samples were solidified by pulling them downwards at constant rates ($V = 8.25, 16.5, 41.25, 82.5, \text{ and } 165 \mu\text{m/s}$) by means of five synchronized motors operating at different speeds. After achieving approximately 10-12 cm of steady-state growth, the samples were rapidly quenched by dropping them into a water bath located at the bottom of the furnace to preserve the solid-liquid interface morphology. The temperature of the water in the reservoir was maintained at 283 K with an accuracy of

± 0.1 K using a PolyScience digital 9102 heating/refrigerating circulating bath. The temperature profile and control within the sample were ensured by a Eurotherm 2604 temperature controller operating with an accuracy of ± 0.1 K. All solidification experiments were conducted under the specified constant temperature gradient ($G = 10.3$ K/mm) and varying growth rates ($V = 8.25$ - 165 $\mu\text{m/s}$).

2.2. Measurement of Solidification Parameters (G, V) and Metallographic Preparation

The temperature within the specimen was measured by three K-type (Chromel-Alumel) insulated thermocouples, 0.50 mm in diameter, fixed axially within the sample at intervals of 10-20 mm. The ends of the thermocouples were connected to a measurement unit consisting of a data-logger and a computer. Cooling rates and temperature data were continuously recorded via the computer during growth. When the solid-liquid interface was at the level of the second thermocouple, the temperature difference (ΔT) between the first and second thermocouples was read from the data-logger record. The time taken (Δt) for the solid-liquid interface to pass between the thermocouples separated by known distances was also obtained from the data-logger record. Thus, the growth rate ($V = \Delta X / \Delta t$, where ΔX is the known distance between thermocouples) for each sample and the temperature gradient ($G = \Delta T / \Delta X$) in the liquid phase were determined using the measured values of Δt , ΔT , and the known value of ΔX .

After quenching, the samples were removed from the graphite crucibles, and sections of approximately 3 cm in length from the top and bottom, which did not represent the steady-state growth region, were cropped off and discarded. Longitudinal (parallel to the solidification direction) and transverse (perpendicular to the solidification direction) sections of the remaining samples were taken and cold-mounted in epoxy resin for standard metallographic procedures. The mounted sample surfaces were first progressively ground under water using silicon carbide (SiC) abrasive papers of increasing fineness (e.g., 220, 400, 600, 800, 1200, and 2500 grit). Subsequently, they were mechanically polished on polishing cloths using diamond paste of 6 μm , 3 μm , 1 μm , and 1/4 μm successively, with appropriate lubricants. To reveal the microstructure, the polished sample surfaces were etched for approximately 35 seconds with Keller's reagent (1.5% HCl – 0.5% HF – 2.5% HNO₃ – 95.5% H₂O, by volume). Following metallographic preparation, the microstructures of the samples were examined from both transverse and longitudinal sections using a Nikon Eclipse MA100 optical microscope, and digital images were captured.

2.3. Measurement of Microstructural Parameters (λ_1 and λ_2)

The primary dendrite arm spacing (λ_1), as schematically shown in Fig. 1, was determined by measuring the distance between the centers of two adjacent dendrites in the transverse sections. Two different methods were used to measure the λ_1 values:

1. **Triangle Method:** In this method, a triangle is formed by joining the centers of three neighboring dendrites, and the side lengths of this triangle are recorded as $\lambda_1(\text{tr})$.
2. **Area Counting Method:** In this method, the average primary dendrite arm spacings, $\lambda_1(\text{ar})$, were determined from the microstructural images of the sample's cross-section (Fig. 1) using the following equation:

$$\lambda_1(\text{ar}) = (A / (M^2N))^{0.5}$$

where M is the microscope magnification factor, A is the total cross-sectional area on the image, and N is the number of primary dendrites within that area.

The average primary dendrite arm spacing ($\lambda_1(\text{ave})$) reported for each sample was calculated by taking the arithmetic mean of numerous $\lambda_1(\text{tr})$ and $\lambda_1(\text{ar})$ measurements obtained from different regions. At least 50-100 λ_1 measurements were made from different regions for each sample.

The secondary dendrite arm spacing (λ_2) was measured by averaging the distances between adjacent secondary arms on the longitudinal section of a primary dendrite. Each reported λ_2 value represents the average of numerous (typically 5-10 per primary dendrite) secondary arm spacing measurements taken from at least 20-30 different primary dendrites for each specimen. All microstructural measurements were performed on calibrated microscope images using image analysis software.

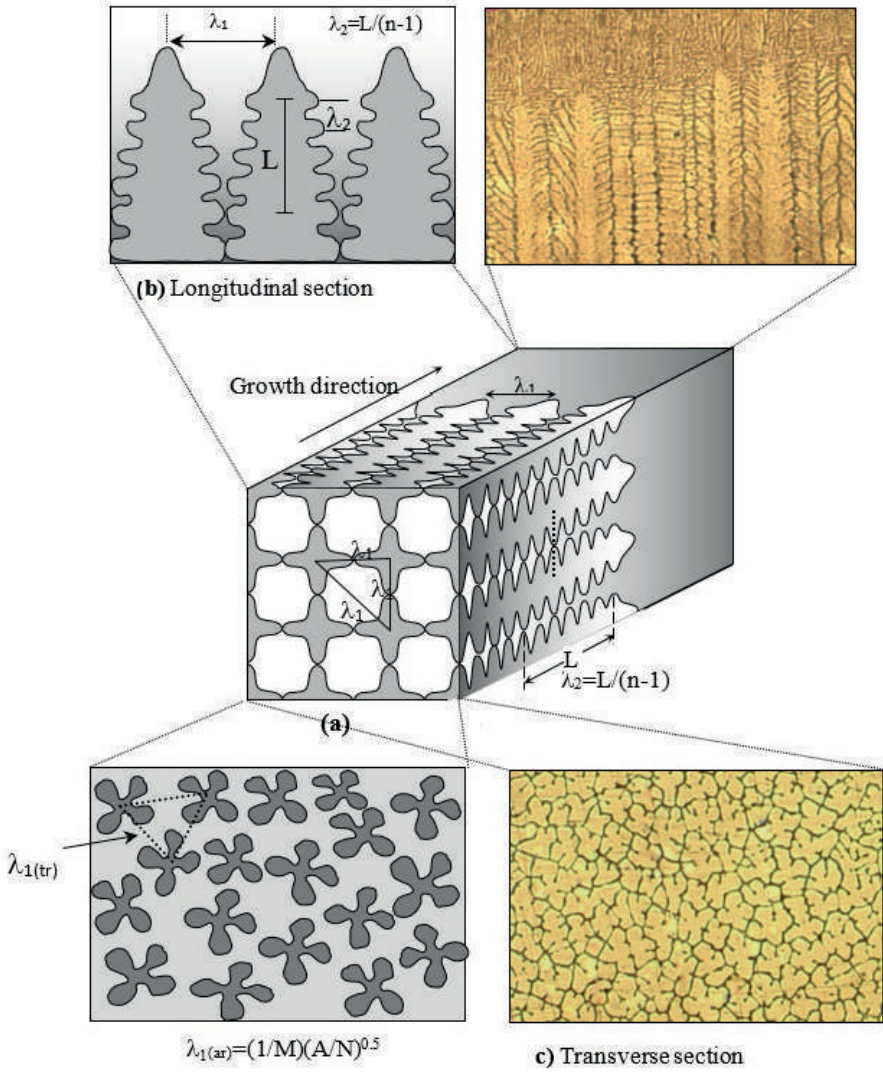


Fig. 1. (a) Schematic illustration of the dendritic spacings measurements longitudinal and transverse sections (b) longitudinal section (c) transverse section (M : magnification factor, A : total area)

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructural Characterization and Phase Analysis

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) analyses were performed on quenched samples to determine the phases formed and the solute distribution at the solid-liquid interface in Al-Zn alloys. The analyses were

conducted at an accelerating voltage of 20 keV using X-ray lines. The EDX spectra and point analysis results, shown in Fig. 2, illustrate the solute (Zn) concentrations in the solid and liquid phases at selected regions of the solid-liquid (S/L) interface.

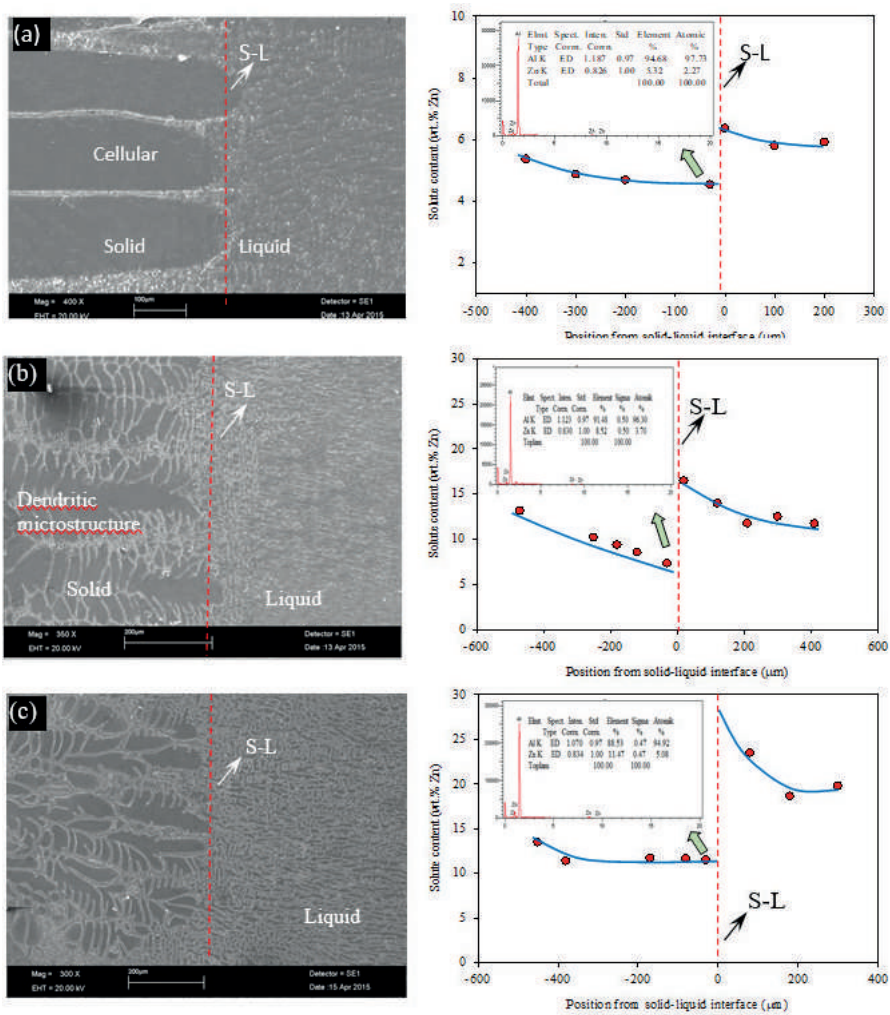


Fig. 2 The solute concentrations of the solid and liquid phases at the S/L interface and EDX spectrums for Al-Zn alloys; (a) Al-7wt.% Zn (b) Al-10wt.% Zn (c) Al-20wt.% Zn

For the different Al-Zn alloy compositions (Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn), zinc (Zn) concentrations were measured in both solid and liquid phases. The Zn concentrations in the solid phase (dendrite core) regions were observed to be approximately constant and lower than

the nominal composition values of the alloy. This can be attributed to the equilibrium distribution coefficient (k) of the Al-Zn system being less than unity ($k < 1$). Solidification commences with the formation of a solid phase containing less Zn than the nominal composition, which causes the dendrite core to have a higher melting temperature compared to the surrounding liquid (Chen et al., 2013). As clearly depicted in Fig. 2, as solidification progresses, solute Zn atoms are rejected from the solidifying interface into the liquid phase, leading to a solute pile-up ahead of the S/L interface. This accumulation causes the Zn concentration in the liquid phase at the interface to exceed the nominal value. Moving away from the S/L interface into the bulk liquid, the Zn concentration gradually decreases, eventually approaching the nominal compositions of the alloy (Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn). This solute distribution profile reflects a typical dendritic solidification behavior.

3.2. Effect of Solidification Parameters on Microstructural Morphology

The experimental results clearly demonstrate that solidification parameters (growth rate V and alloy composition Co) have a strong influence on the solidification morphology of Al-Zn alloys. Under a constant temperature gradient ($G = 10.3$ K/mm), cellular and dendritic microstructures were obtained at growth rates ranging from $8.25 \mu\text{m/s}$ to $165 \mu\text{m/s}$. Figures 3 and 4 present typical optical micrographs showing the transition from cellular to dendritic microstructure in the longitudinal and transverse sections of Al-Zn alloys with increasing V and Co .

At low growth rates (e.g., around $V < 16.5 \mu\text{m/s}$), a cellular morphology was generally observed, whereas with increasing growth rate, the stability of the solid-liquid interface decreased, leading to a transition to dendritic growth. The cellular-to-dendritic transition was found to be completed at a growth rate of approximately $16.5 \mu\text{m/s}$ for all Al-Zn alloy compositions. As the growth rate (V) and zinc concentration (Co) increased, the dendritic structure became more pronounced, and the dendrite arm spacings (both λ_1 and λ_2) tended to decrease. This indicates the formation of a finer microstructure at higher growth rates and higher alloy concentrations. The Cellular to Dendritic Transition (CDT) has been investigated by several researchers in the literature (Tewari & Laxmanan, 1987; Georgelin & Pocheau, 1998; Wei et al., 2015). However, a definitive criterion for CDT has not yet been fully established, and it is known that this transition depends on several factors, including the G/V ratio and alloy parameters.

The morphological changes observed in this study are in general agreement with the trends reported in the literature.

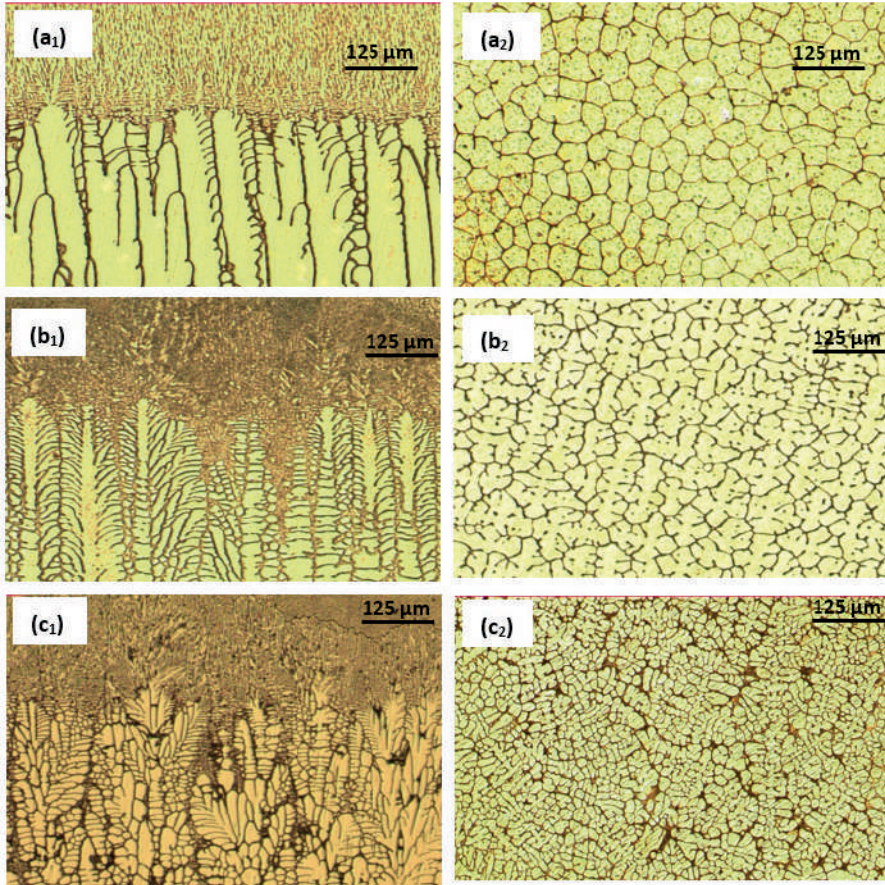


Fig. 3. Optical micrographs of Al-Zn alloys under $V=41.25$ m/s and $G=10.3$ K/mm solidification condition (a_p, a_s) Al-5 wt.% Zn, (b_p, b_s) Al-10 wt.% Zn, (c_p, c_s) Al-20 wt.% Zn

3.3. Effect of Growth Rate and Composition on Microstructural Parameters (λ_1 and λ_2)

3.3.1. Effect of Growth Rate (V)

Experimental results show that under a constant temperature gradient ($G = 10.3$ K/mm), both primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings decrease with increasing growth rate (V) for all alloy compositions (Figs. 4a and 4b). This behavior is consistent with solidification theories;

higher growth rates lead to shorter diffusion distances at the solid-liquid interface and faster heat extraction, thereby promoting the formation of a finer dendritic structure.

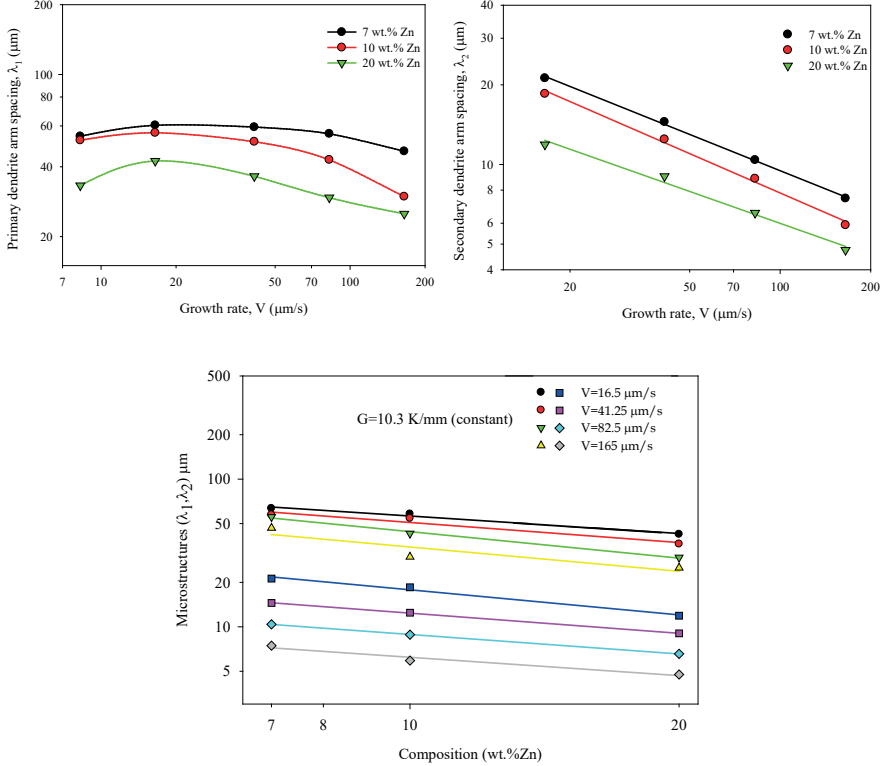


Fig. 4 (a) Variation of the primary dendritic arm spacing with the growth rate, (b) Variation of the secondary dendritic arm spacing with the growth rate.

Based on the experimental data obtained, the relationship between the microstructural parameters (λ_1 and λ_2) and the growth rate (V) can be expressed by a power law of the following general form:

$$\lambda_1 = k_1 (V^{-a})$$

$$\lambda_2 = k_2 (V^{-b})$$

Here, k_1 and k_2 are proportionality constants, and a and b represent the exponent values of the growth rate for λ_1 and λ_2 , respectively. Table I presents these relationships obtained for different Al-Zn compositions, along with the constants (k) and correlation coefficients (r).

Table 1. The relationships among the dendritic spacings (λ_1 , λ_2) growth velocity (V) and composition (Co)

Composition (wt.%)	Relationships	Constant (k)	Correlation coefficient (r)
Al-7 Zn	$\lambda_1 = k_1 V^{-0.27}$	$k_1 = 209 \mu\text{m}^{1.27} \text{s}^{-0.27}$	$r_1 = -0.987$
	$\lambda_2 = k_2 V^{-0.45}$	$k_2 = 89 \mu\text{m}^{1.45} \text{s}^{-0.45}$	$r_2 = -0.998$
Al-10 Zn	$\lambda_1 = k_3 V^{-0.26}$	$k_3 = 190 \mu\text{m}^{1.26} \text{s}^{-0.26}$	$r_3 = -0.927$
	$\lambda_2 = k_4 V^{-0.49}$	$k_4 = 76 \mu\text{m}^{1.49} \text{s}^{-0.49}$	$r_4 = -0.995$
Al-20 Zn	$\lambda_1 = k_5 V^{-0.23}$	$k_5 = 115 \mu\text{m}^{1.23} \text{s}^{-0.23}$	$r_5 = -0.975$
	$\lambda_2 = k_6 V^{-0.40}$	$k_6 = 37 \mu\text{m}^{1.40} \text{s}^{-0.40}$	$r_6 = -0.998$
Growth rate ($\mu\text{m/s}$)	Relationships	Constant(k)	Correlation coefficient (r)
16.5	$\lambda_1 = k_7 C_o^{-0.32}$	$k_7 = 178 \mu\text{m}$	$r_7 = -0.960$
	$\lambda_2 = k_8 C_o^{-0.53}$	$(\text{wt.}\%)^{0.32}$	$r_8 = -0.992$
41.3	$\lambda_1 = k_9 C_o^{-0.38}$	$k_8 = 59 \mu\text{m}$	$r_9 = -0.890$
	$\lambda_2 = k_{10} C_o^{-0.45}$	$(\text{wt.}\%)^{0.53}$	$r_{10} = -0.999$
82.5	$\lambda_1 = k_{11} C_o^{-0.32}$	$k_9 = 155 \mu\text{m}$	$r_{11} = -0.893$
	$\lambda_2 = k_{12} C_o^{-0.44}$	$(\text{wt.}\%)^{0.38}$	$r_{12} = -0.999$
165.0	$\lambda_1 = k_{13} C_o^{-0.27}$	$k_{10} = 35 \mu\text{m}$	$r_{13} = -0.965$
	$\lambda_2 = k_{14} C_o^{-0.43}$	$(\text{wt.}\%)^{0.45}$	$r_{14} = -0.986$
		$k_{11} = 115 \mu\text{m}$	
		$(\text{wt.}\%)^{0.32}$	
		$k_{12} = 25 \mu\text{m}$	
		$(\text{wt.}\%)^{0.44}$	
		$k_{13} = 81 \mu\text{m}$	
		$(\text{wt.}\%)^{0.27}$	
		$k_{14} = 17 \mu\text{m}$	
		$(\text{wt.}\%)^{0.43}$	

λ_1 : the values of the primary dendrite arm spacing measured from the transverse section

λ_2 : the values of the secondary dendrite arm spacing measured from the longitudinal section of the samples

The exponent values of V for the primary dendrite arm spacing (λ_1), denoted as ‘a’, as detailed in Table 1, were found to be 0.27, 0.26, and 0.23 for Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn alloys, respectively. These values are in close agreement with the exponent values obtained by Fan et al. (2011) (0.30), Lapin et al. (2011) (0.24, 0.25), and Kaya et al. (2009, 2007) (0.24, 0.28) for Al-based alloys under similar solidification conditions. Furthermore, the exponent values obtained in this study (0.27, 0.26, and 0.23) are also very close to the theoretical exponent value of 0.25 predicted for λ_1 by the models of Hunt (1979), Kurz-Fisher (1981), and Trivedi (1984). In contrast, the exponent values of 0.37 and 0.69 reported by Wang et al. (2010) and Feng et al. (1999), respectively, are significantly higher than those obtained in this work; these differences are likely due to

variations in the alloy system, solidification conditions, and measurement techniques. The exponent values of V for the secondary dendrite arm spacing (λ_2), denoted as 'b', also presented in Table 1, were determined to be 0.45, 0.49, and 0.40 for Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn alloys, respectively. These exponent values are in good agreement with the values of 0.54 and 0.48 found by Wang et al. (2010) and Kaya et al. (2009, 2007) for Al-based alloys. Moreover, the growth rate exponents obtained in this study (0.45, 0.49, and 0.40) are also very close to the theoretical exponent value of 0.50 predicted for λ_2 by the Trivedi-Somboonsuk (1984) model.

3.3.2. Effect of Alloy Composition (Co)

Figure 4c illustrates the variation of λ_1 and λ_2 as a function of Zn concentration (Co) at different growth rates. It was observed that both λ_1 and λ_2 values decrease with increasing Zn composition. For instance, at the lowest growth rate (16.5 $\mu\text{m/s}$), the λ_1 value decreases from approximately 60.39 μm for Al-7wt.%Zn to approximately 42.37 μm for Al-20wt.%Zn. Similarly, the λ_2 values decrease from approximately 21.21 μm for Al-7wt.%Zn to approximately 11.89 μm for Al-20wt.%Zn at the lowest growth rate (16.5 $\mu\text{m/s}$). This behavior can be attributed to the fact that an increasing concentration of alloying element widens the solidification range and influences solute redistribution, leading to the formation of a finer microstructure. The relationship between the microstructural parameters (λ_1 and λ_2) and the alloy composition (Co) can also be expressed by a similar power law:

$$\lambda_1 = k_3 (\text{Co}^{-c})$$

$$\lambda_2 = k_4 (\text{Co}^{-d})$$

Table 1 provides the exponent values (c and d) and constants showing the effect of Co on λ_1 and λ_2 for different growth rates. As seen from Table 1, the exponent values of Co for λ_1 , denoted as 'c', were found to be 0.32, 0.38, 0.32, and 0.27 for growth rates of 16.5, 41.3, 82.5, and 165 $\mu\text{m/s}$, respectively. Similarly, for λ_2 , the exponent values of Co, denoted as 'd', reported in Table 1 are 0.53, 0.45, 0.44, and 0.43 for the same respective growth rates. These exponent values show general agreement with similar studies in literature, although specific values may vary depending on the solidification conditions and alloy system.

3.4. Comparison of Experimental Results with Theoretical Models

3.4.1. Primary Dendrite Arm Spacing (λ_1)

The experimentally obtained λ_1 values in this study were compared with the λ_1 values calculated using the theoretical models proposed by Hunt (1979), Kurz-Fisher (1981), and Trivedi (1984). These comparisons are presented in Figs. 5 (a-c) for different Al-Zn alloy compositions. The physical parameters of Al-Zn alloys used in the theoretical calculations are given in the Appendix. As can be seen from Fig. 5, the λ_1 values calculated with the Hunt model show a very good agreement with the experimentally obtained λ_1 values. This indicates that the Hunt model can successfully predict the primary dendrite arm spacing of Al-Zn alloys under the present experimental conditions. On the other hand, the λ_1 values calculated with the Trivedi and Kurz-Fisher models were generally slightly higher than the experimental values. These discrepancies may arise from the assumptions underlying the models, the accuracy of the material parameters used, and potential deviations in the experimental conditions. In particular, the selection of the L parameter (harmonic perturbation constant) in the Trivedi model can influence the results.

3.4.2. Secondary Dendrite Arm Spacing (λ_2)

The experimentally obtained λ_2 values in this study as a function of growth rate were compared with the λ_2 values calculated using the Trivedi-Somboonsuk (1984) model. This comparison is presented in Fig. 6. As shown in Fig. 6, the λ_2 values calculated from the Trivedi-Somboonsuk model as a function of $(\text{Co V})^{-0.5}$ exhibit very good agreement with our experimental data. This demonstrates that the Trivedi-Somboonsuk model can successfully predict the secondary dendrite arm spacing for the investigated Al-Zn alloys and solidification conditions.

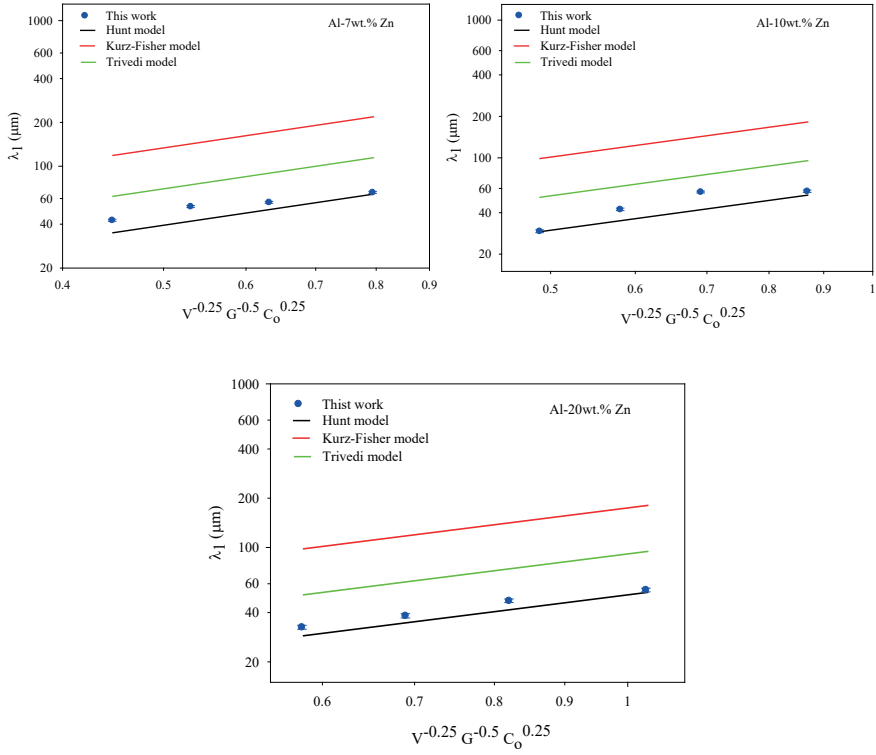


Fig. 5. Comparison of the primary dendrite arm spacings, λ_1 obtained in this work with the theoretical models for (a) Al-wt.7 % Zn alloys, (b) Al-wt.10 % Zn alloys, (c) Al-wt.20 % Zn alloys

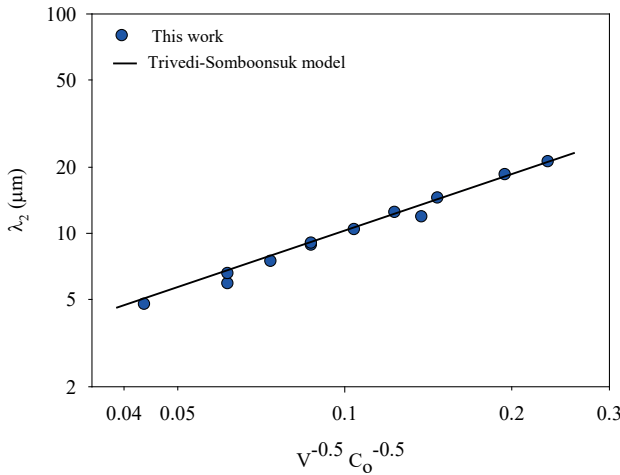


Fig. 6. Comparison of the secondary dendrite arm spacings, obtained in this work with the Trivedi-Somboonsuk model.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In this study, three Al-Zn binary alloys with different compositions, Al-7wt.%Zn, Al-10wt.%Zn, and Al-20wt.%Zn, were unidirectionally solidified under a constant temperature gradient ($G = 10.3 \text{ K/mm}$) and over a wide range of growth rates ($V = 8.25\text{--}165 \text{ }\mu\text{m/s}$). The microstructural features of the solidified samples were analyzed, and the influence of solidification parameters (V and Co) on the primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings was investigated. The principal findings and their place in the literature can be discussed as follows:

The variation of solidification morphology with growth rate and composition is one of the significant findings of this study. A cellular microstructure was observed at low growth rates ($<16.5 \text{ }\mu\text{m/s}$), while a transition from cellular to dendritic occurred at approximately $16.5 \text{ }\mu\text{m/s}$ as the growth rate increased. This transition rate is a consequence of the stability of the solid-liquid interface, which can be explained by the Mullins-Sekerka instability theory (Mullins & Sekerka, 1964) and constitutional supercooling criteria (Tiller et al., 1953). As the growth rate increases, solute pile-up ahead of the interface intensifies, leading to higher constitutional supercooling and thus destabilization of the interface, transforming it into a dendritic structure. Regular dendritic structures were formed at growth rates between $16.5 \text{ }\mu\text{m/s}$ and $165 \text{ }\mu\text{m/s}$, with the finest dendrites obtained at the highest growth rate ($165 \text{ }\mu\text{m/s}$). These observations are in general agreement with similar directional solidification studies on Al-based alloys in the literature (Gündüz & Çadırılı, 2002; Tewari & Laxmanan, 1987).

It was determined that both primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings decreased with increasing growth rate (V). This decrease was successfully described by power laws of the form $\lambda_1 \propto V^{-a}$ and $\lambda_2 \propto V^{-b}$ (where a and b are the exponents). The 'a' exponent value obtained for λ_1 (0.27, 0.26, and 0.23 for different Zn compositions) show excellent agreement with the theoretical models proposed by Hunt (1979), Kurz-Fisher (1981), and Trivedi (1984), which predict a $\lambda_1 \propto V^{-0.25}$ relationship. Similarly, the 'b' exponent values obtained for λ_2 (0.45, 0.49, and 0.40 for different Zn compositions) exhibit very good consistency with the theoretical model proposed by Trivedi-Somboonsuk (1984), which predicts a $\lambda_2 \propto V^{-0.5}$ relationship. This agreement confirms the capability of these theoretical models to accurately predict dendrite arm spacings for the investigated Al-Zn alloy system and experimental conditions. The proximity of the experimental exponents to the theoretical values suggests that the

directional solidification process was largely diffusion-controlled and that other effects, such as convection, were minimized.

Regarding the effect of alloy composition (Co), it was observed that both λ_1 and λ_2 values decreased with increasing zinc concentration. This behavior was expressed by power laws of the form $\lambda_1 \propto \text{Co}^{-c}$ and $\lambda_2 \propto \text{Co}^{-d}$ (where c and d are the exponents). The 'c' exponent values obtained for λ_1 (in the range of 0.27-0.38 for different growth rates) are in good agreement with the $\text{Co}^0 \square^{25}$ term present in the models of Hunt (1979), Kurz-Fisher (1981), and Trivedi (1984). The 'd' exponent values obtained for λ_2 (in the range of 0.44-0.53 for different growth rates) show a noteworthy similarity with the $\text{Co}^0 \square^5$ dependency that can be derived from the Trivedi-Somboonsuk (1984) model (as the ΔT_0 term in the model is dependent on Co). These results indicate that an increasing amount of alloying element promotes the formation of finer microstructures by increasing the solidification range and affecting solute redistribution. A decrease in dendrite arm spacings generally leads to improvements in the mechanical properties of the material, particularly in strength and ductility (Kirkwood, 1984), as finer dendrites imply a more homogeneous solute distribution and smaller segregation distances.

The excellent agreement of the experimental λ_1 values with the Hunt (1979) model reveals that this model is quite successful in predicting the primary dendrite arm spacing of Al-Zn alloys under the present experimental conditions. The slightly higher results from the Trivedi (1984) and Kurz-Fisher (1981) models compared to the experimental values may stem from some of the assumptions inherent in these models or from deviations in the material parameters used from the actual situation. Similarly, the excellent agreement shown by the experimental λ_2 values with the Trivedi-Somboonsuk (1984) model confirms that this model is a reliable tool for predicting secondary dendrite arm spacing in Al-Zn alloys.

This study also has some limitations. For example, only a single temperature gradient value was used. Investigating the effect of different temperature gradients on microstructural evolution could provide a more comprehensive picture of the solidification behavior. Furthermore, this study focused on binary Al-Zn alloys; the solidification behavior of multicomponent Al-Zn alloys, which are frequently used in industrial applications, can be more complex and may constitute an area for future studies.

In conclusion, the principal findings obtained in this study can be summarized as follows:

1. In Al-(7, 10, 20)wt.%Zn alloys, a cellular microstructure was formed at low growth rates ($<16.5 \mu\text{m/s}$), while a transition from cellular to dendritic was observed at growth rates above approximately $16.5 \mu\text{m/s}$. Regular dendritic structures were formed at growth rates between $16.5 \mu\text{m/s}$ and $165 \mu\text{m/s}$, with finer dendrites obtained at increasing growth rates.
2. Primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings decreased with increasing growth rate (V). The exponent values of V for λ_1 ($a \approx 0.23\text{--}0.27$) and for λ_2 ($b \approx 0.40\text{--}0.49$) showed very good agreement with the theoretical models ($V^{-0.25}$ and $V^{-0.5}$) proposed by Hunt, Kurz-Fisher, Trivedi, and Trivedi-Somboonsuk, respectively.
3. Primary (λ_1) and secondary (λ_2) dendrite arm spacings decreased with increasing zinc concentration (Co). The exponent values of Co for λ_1 ($c \approx 0.27\text{--}0.38$) and for λ_2 ($d \approx 0.43\text{--}0.53$) exhibited good agreement with the values predicted by the relevant theoretical models ($\text{Co}^{-0.25}$ and $\text{Co}^{-0.5}$).
4. Experimental λ_1 values showed excellent agreement with the Hunt model, and λ_2 values showed excellent agreement with the Trivedi-Somboonsuk model. This confirms that these models can successfully predict dendrite arm spacings for the investigated Al-Zn alloy system and solidification conditions.

These results provide important insights into the directional solidification behavior of Al-Zn alloys and can contribute to the optimization of casting and solidification processes for these alloys, thereby enabling the achievement of desired microstructural features and, consequently, superior material performance.

References

- Burden, M. H., & Hunt, J. D. (1974). Macroscopic stability of a planar, cellular or dendritic interface during directional freezing. *Journal of Crystal Growth*, 20(2), 121–124.
- Chen, Z., Mo, Y., & Nie, Z. (2013). Effect of Zn content on the microstructure and properties of super-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(8), 3910–3920.
- Davis, J. R. (Ed.). (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM International.
- Du, Y., Chang, Y., Huang, B., Gong, W., Jin, Z., Xu, H., Yuan, Z., Liu, Y., He, Y., & Xie, F. Y. (2003). Diffusion coefficients of some solutes in FCC and liquid Al: Critical evaluation and correlation. *Materials Science and Engineering A*, 363(1-2), 140–151.
- Fan, J., Li, X., Su, Y., Chen, R., Guo, J., & Fu, H. (2011). Directional solidification of Ti-49 at.%Al alloy. *Applied Physics A*, 105(1), 239–248.
- Feng, J., Huang, W. D., Lin, X., Pan, Q. Y., Li, T., & Zhou, Y. H. (1999). Primary cellular/dendritic spacing selection of Al-Zn alloy during unidirectional solidification. *Journal of Crystal Growth*, 197(1-2), 393–395.
- Flemings, M. C. (1974). *Solidification processing*. McGraw-Hill.
- Ganesan, A., Garg, R., & Ratke, L. (2021). Microsegregation in metallic alloys: A review on experimental and numerical studies. *Progress in Materials Science*, 121, 100830.
- Georgelin, M., & Pocheau, A. (1998). Onset of sidebranching in directional solidification. *Physical Review E*, 57(3), 3189–3203.
- Gonzales, F., & Rappaz, M. (2006). Dendrite growth directions in aluminum-zinc alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(9), 2797–2806.
- Gündüz, M., & Çadırılı, E. (2002). Directional solidification of aluminium-copper alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 327(1-2), 167–185.
- Hansen, M. (Ed.). (1958). *Constitution of binary alloys*. McGraw-Hill.
- Hunt, J. D. (1979). Solidification and casting of metals. *The Metal Society, London*, 3-9s.
- Jones, H. (1982). *Rapid solidification of metals and alloys*. The Institution of Metallurgists Northway House.
- Kaya, H., Çadırılı, E., & Gündüz, M. (2007). Dendritic growth in an aluminum-silicon alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(1), 12–21.
- Kaya, H., Çadırılı, E., & Gündüz, M. (2009). Directional cellular growth of Al-2wt%Li bulk samples. *Applied Physics A*, 94(1), 155–165.
- Kirkwood, D. H. (1984). Microsegregation. *Materials Science and Engineering*, 65(1), 101–109.

- Kurz, W., & Fisher, D. J. (1981). Dendritic growth and limit of stability tip radius and spacing. *Acta Metallurgica*, 29(1), 11–20.
- Kurz, W., & Fisher, D. J. (1998). *Fundamentals of solidification* (4th ed.). Trans Tech Publications.
- Lapin, J., & Gabalcová, Z. (2011). Solidification behaviour of TiAl-based alloys studied by directional solidification technique. *Intermetallics*, 19(6), 797–804.
- Liu, Y. C., Han, Y., Yang, G. C., & Zhou, Y. H. (2005). Primary cellular/dendritic spacing selection in rapidly solidified peritectic alloy. *Materials Letters*, 59(23), 2915–2919.
- Morris, J. R., Mendelev, M. I., & Srolovitz, D. J. (2007). A comparison of crystal-melt interfacial free energies using different Al potentials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(37-39), 3565–3569.
- Mullins, W. W., & Sekerka, R. F. (1964). Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy. *Journal of Applied Physics*, 35(2), 444–451.
- Osamura, K., Okuda, H., & Ochiai, S. (1985). Isothermal phase decomposition diagram in Al–Zn binary alloys. *Scripta Metallurgica*, 19(12), 1379–1384.
- Osorio, W. R., Spinelli, J. E., Cheung, N., & Garcia, A. (2006). Secondary dendrite arm spacing and solute redistribution effects on the corrosion resistance of Al–10 wt% Sn and Al–20 wt% Zn alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 420(1-2), 179–186.
- Polmear, I. J. (2006). *Light alloys: From traditional alloys to nanocrystals* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Porter, D. A., & Easterling, K. E. (1992). *Phase transformations in metals and alloys* (2nd ed.). Chapman & Hall.
- Rhême, M., Gonzales, F., & Rappaz, M. (2008). Growth directions in directionally solidified Al–Zn and Zn–Al alloys near eutectic composition. *Scripta Materialia*, 59(4), 440–443.
- Rosa, D. M., Spinelli, J. E., & Garcia, A. (2006). Tertiary dendrite arm spacing during downward transient solidification of Al–Cu and Al–Si alloys. *Materials Letters*, 60(15), 1871–1874.
- Shibuta, Y., Sakane, S., & Suzuki, T. (2017). Anisotropy of solid-liquid interfacial free energy for hexagonal close-packed metals: A molecular dynamics study. *Journal of Chemical Physics*, 146(9), 094702.
- Tewari, S. N., & Laxmanan, V. (1987). Cellular-dendritic transition in directionally solidified binary alloys. *Metallurgical Transactions A*, 18(1), 167–170.

- Tiller, W. A., Jackson, K. A., Rutter, J. W., & Chalmers, B. (1953). The redistribution of solute atoms during the solidification of metals. *Acta Metallurgica*, 1(4), 428-437.
- Trivedi, R. (1984). Interdendritic spacing: Part II. A. Comparison of theory and experiment. *Metallurgical Transactions A*, 15(6), 977-982.
- Trivedi, R., & Kurz, W. (1994). Dendritic growth. *International Materials Reviews*, 39(2), 49-74.
- Trivedi, R., & Somboonsuk, K. (1984). Constrained dendritic growth and spacing. *Materials Science and Engineering*, 65(1), 65-74.
- Wang, K., Lu, S., Mi, G., Li, C., & Fu, H. (2010). Simulation of microstructural evolution in directional solidification of Ti-45at.%Al alloy using cellular automaton method. *China Foundry*, 7(1), 47-51.
- Wei, L., Lin, X., Wang, M., & Huang, W. D. (2015). Effects of physical parameters on the cell-to-dendrite transition in directional solidification. *Chinese Physics B*, 24(7), 078108.

Appendix: Some physical properties of Al-Zn alloys

Property	Symbol	Unit	Value	Ref.
Melting point	T_m	K	933	Du et al. (2003)
Slope of liquid line (Zn in Al)	m_L	K (% wt) ⁻¹	-2.93	Hansen (1958)
Diffusion coefficient (liq., Zn in Al)	D_L	$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$	1200	Du et al. (2003)
Distribution coefficient (Zn in Al)	k		0.45	Du et al. (2003)
Gibbs-Thomson coefficient	Γ	$\mu\text{m.K}$	0.105	Morris et al. (2007)
The harmonic perturbations (L for Trivedi model)	L	mJ/m^2	10	Du et al. (2003)

Effect of Unsteady-State Heat Flow Regime Solidification on the Mechanical Properties of Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr Alloy

Emin Çadırılı¹

Uğur Büyük²

Hasan Kaya³

Erkan Üstün⁴

Abstract

This study comprehensively investigates the impact of unsteady-state heat flow regime solidification on the thermal behavior and mechanical properties of the multicomponent Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr (wt.%) alloy. The alloy was solidified in the unsteady-state heat flow regime at a cooling rate range of approximately (0.88–2.77 °C/s) using a custom-built solidification furnace equipped with eight thermocouples. Eutectic spacing (λ) decreased from 20 μm to 6 μm with increasing cooling rates, directly correlating with enhanced mechanical properties. The highest microhardness ($\text{HV}=177.5 \text{ kg/mm}^2$), compressive strength ($\sigma_c=556.9 \text{ MPa}$), and compressive yield strength ($\sigma_y=385.5 \text{ MPa}$) were achieved at the fastest cooling rate (2.77°C/s). These findings underscore the critical role of cooling rate optimization in achieving superior mechanical performance for aerospace and automotive applications.

- 1 Prof. Dr., Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Science, Department of Physics, Niğde, Turkey, ecadirli@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8085-9733
- 2 Prof. Dr., Erciyes University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Kayseri, Turkey, buyuk@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6830-8349
- 3 Prof. Dr., Erciyes University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Kayseri, Turkey, hasankaya@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3529-9762
- 4 Dr., Niğde Ömer Halisdemir University, Institute of Science, Department of Physics, Niğde, Turkey, erkanustun_07@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-7745-396X

1. Introduction

Aluminum alloys have revolutionized modern engineering by offering an unparalleled combination of lightweight properties, corrosion resistance, and recyclability. Their dominance in industries such as aerospace, automotive, and construction stems from their ability to meet stringent performance demands while reducing energy consumption and carbon footprints. For instance, replacing traditional steel components with aluminum alloys in automotive structures can reduce vehicle weight by 40–50%, leading to a 6–8% improvement in fuel efficiency and a proportional reduction in greenhouse gas emissions. However, as industries push toward higher efficiency and sustainability, the demand for advanced aluminum alloys with superior mechanical and thermal properties has intensified.

Multicomponent aluminum alloys, particularly those in the Al-Cu-Si-Mg system, have emerged as frontrunners due to their capacity to integrate multiple strengthening mechanisms. Copper enhances strength through precipitation hardening, silicon improves castability and wear resistance, magnesium contributes to solid solution strengthening, and zinc refines grain boundaries. Despite these advantages, the performance of such alloys is highly sensitive to solidification conditions. Conventional casting methods often result in microstructural heterogeneity, including coarse dendritic structures, segregated intermetallic phases, and porosity, which compromise mechanical integrity. For example, uneven cooling rates can lead to localized stress concentrations, reducing fatigue life by up to 30% in critical components like engine blocks or aircraft fuselage frames.

A critical challenge in multicomponent alloy design lies in balancing compositional complexity with microstructural control. The addition of transition elements like zirconium (Zr) has shown promise in addressing this issue. Zirconium, even in trace amounts (0.1–1 wt.%), forms thermally stable Al₃Zr precipitates that inhibit grain boundary migration and recrystallization, thereby enhancing high-temperature stability. Recent studies by Shaha et al. (2014) demonstrated that Zr additions in Al-Si-Cu-Mg alloys improved tensile strength by 18% and creep resistance by 25% at 200°C. Similarly, Sandoval et al. (2014) reported that Zr-modified Al-Si-Cu-Mg alloys exhibited a 40% reduction in dendritic arm spacing under rapid cooling conditions, directly correlating with a 15% increase in hardness. These findings underscore Zr's dual role as a grain refiner and precipitation strengthener, making it a strategic addition for advanced alloy systems. The solidification process itself is a pivotal factor in determining microstructure and properties. Traditional steady-state cooling methods

often fail to replicate the dynamic thermal gradients encountered in industrial casting, leading to discrepancies between laboratory-scale and real-world performance. Unsteady-state heat flow regimes, characterized by spatially and temporally varying cooling rates, offer a more realistic framework for studying solidification behavior. For instance, Rosso et al. (2022) observed that non-uniform cooling in Al-Si alloys promoted finer eutectic structures and reduced porosity by 22% compared to uniform cooling. However, systematic studies on multicomponent Al alloys under such conditions remain scarce, particularly for systems incorporating Zn and Zr.

This study addresses these gaps by investigating the Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr alloy, a novel composition designed for high-stress applications in aerospace and automotive sectors. The inclusion of 5 wt.% Zn aims to enhance fluidity and corrosion resistance, while 1 wt.% Zr targets microstructural stabilization through Al_3Zr precipitation. The primary objectives are:

- i. To characterize the microstructure and thermal properties of the alloy under unsteady-state heat flow conditions.
- ii. To quantify the relationship between cooling rate and mechanical performance.
- iii. To establish a predictive model for optimizing industrial solidification processes.

In the previous study, the effect of steady-state heat flow regime solidification on the microstructural and phase properties of multicomponent Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr (wt.%) alloy was investigated (Kaya et al. (2024)). The novelty of this work lies in its holistic approach to linking non-uniform cooling dynamics with mechanical behavior in a Zr-modified multicomponent system. By employing a custom-built solidification furnace with eight thermocouples, this study captures real-time thermal gradients rarely replicated in prior research. Furthermore, the integration of Zn and Zr addresses a critical industry need for alloys that combine high strength with manufacturability, particularly in complex die-cast components.

2. Materials and Methods

2.1. Alloy Design and Preparation

The Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr (wt.%) alloy was formulated using high-purity raw materials: aluminum (99.99%), copper (99.95%), silicon (99.9%), magnesium (99.8%), zinc (99.9%), and zirconium (99.5%). The

nominal composition was verified via inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) (Table 1), with deviations limited to $< \pm 0.3$ wt.% for all elements.

Table 1. Nominal and measured composition of the alloy (wt.%).

Element	Nominal	Measured
Al	79.0	79.2 ± 0.2
Cu	5.0	4.9 ± 0.1
Si	5.0	5.1 ± 0.2
Mg	5.0	4.8 ± 0.1
Zn	5.0	4.7 ± 0.3
Zr	1.0	1.1 ± 0.05

2.2. Melting and Casting

Melting was conducted in a vacuum melting furnace under an argon atmosphere (99.999% purity) to minimize oxidation. The process involved:

- i. **Charging:** Aluminum ingots were loaded into a graphite crucible and heated to 750°C
- ii. **Alloying:** Cu, Si, Mg, Zn, and Zr were added sequentially for 15 minutes after each addition.
- iii. **Degassing:** High-purity argon was bubbled through the melt for 10 minutes to remove dissolved hydrogen.
- iv. **Casting:** The molten alloy was poured into preheated (300°C) graphite molds with dimensions of Ø30 mm×150 mm (Fig. 1a).

The graphite crucible, funnel and vacuum melting furnace used in master alloy preparation are given in Fig.1.

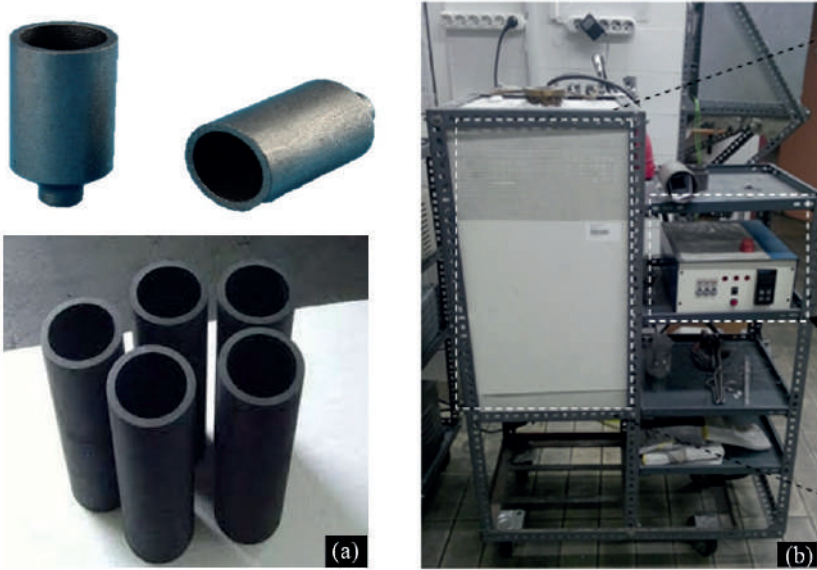


Fig. 1. (a) Graphite molds and funnels, (b) Vacuum melting furnace schematic

2.3. Unsteady-State Solidification Setup

A vertical solidification furnace was designed to impose controlled thermal gradients (Fig. 2). Key components included:

- **Cooling System:** A water-cooled tank ($\text{Ø}50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) at the mold base, maintained at 10°C via a recirculating chiller.
- **Thermal Monitoring:** Eight K-type thermocouples (T1–T8, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ accuracy) embedded at 1 cm intervals along the mold height
- **Data Acquisition:** A National Instruments TC-08 data logger recorded temperature at 10 Hz, synchronized with LabVIEW software.

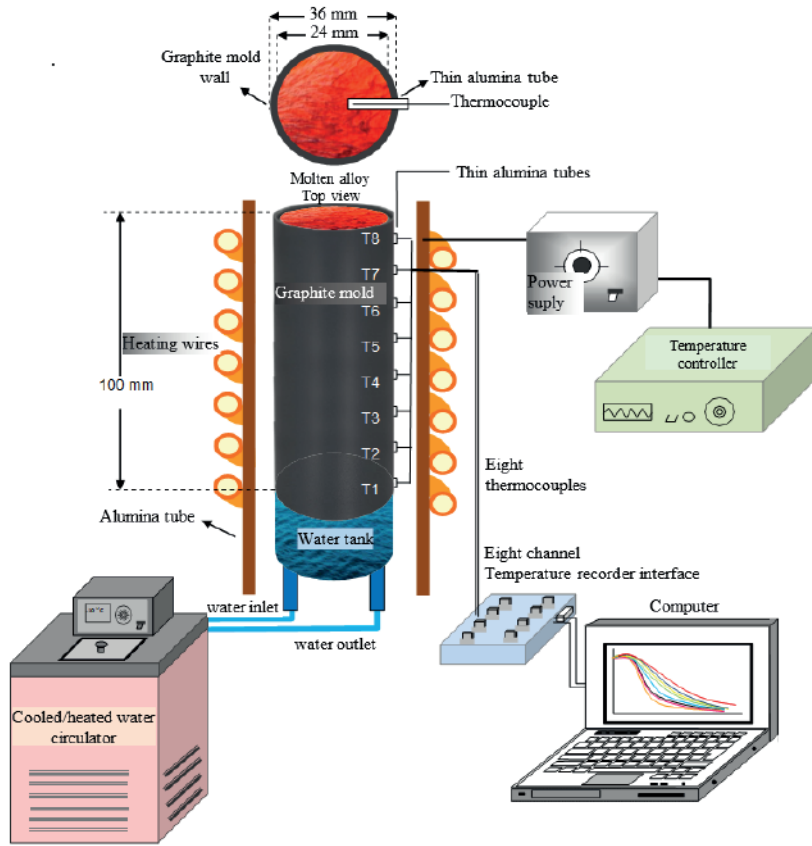


Fig. 2. Unsteady-state heat flow experimental setup

2.4. Microstructural Characterization

Samples were sectioned longitudinally and transversely using a water-cooled abrasive cutter (Struers Secotom-15). Polishing was performed on a Struers LaboPol-5 system with diamond suspensions (9 μm to 0.25 μm). Etching used Keller's reagent (2% HF, 3% HCl, 5% HNO₃, 90% H₂O) for 10–15 seconds. Microstructure and phase analyses are given in detail in the authors' previous studies (Kaya et al. (2024)).

2.5. Thermal Analysis and Mechanical Testing

Differential scanning calorimetry (DSC) was performed on a Perkin Elmer Pyris Diamond system. Samples (30 $\pm$ 0.5 mg) were heated from 25°C to 800 °C at 20°C/min under nitrogen flow (50 mL/min). Melting

onset (T_m), peak temperature, enthalpy (ΔH), and specific heat (C_p) were derived from heat flow curves.

Vickers microhardness (HV) was measured using a Future Tech FM-700 tester with a 500 gf load and 15 s dwell time. Samples solidified at different cooling rates were connected to the testing device in order and many measurements were made from different areas. Cylindrical specimens ($\varnothing 5 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) were machined parallel to the solidification direction. A Shimadzu AG-IS universal tester applied uniaxial compression at 1 mm/min strain rate until 30% deformation. Stress-strain curves determined compressive strength (σ_c) and yield strength (σ_y) at 0.2% offset.

3. Results and Discussions

The experimental investigation of the Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr alloy solidified under unsteady-state heat flow conditions revealed significant variations in microstructure, thermal behavior, and mechanical properties as a function of cooling rate and position. The results are presented in detail below, integrating quantitative data, visual observations, and comparative analyses.

3.1. Cooling Rate Distributions

The unsteady-state solidification process generated significant spatial variations in cooling rates along the ingot height. As shown in Fig. 3 and Table 2, cooling rates decreased exponentially from the mold base (T1: $2.77 \pm 0.12^\circ\text{C/s}$) to the top (T8: $0.88 \pm 0.05^\circ\text{C/s}$).

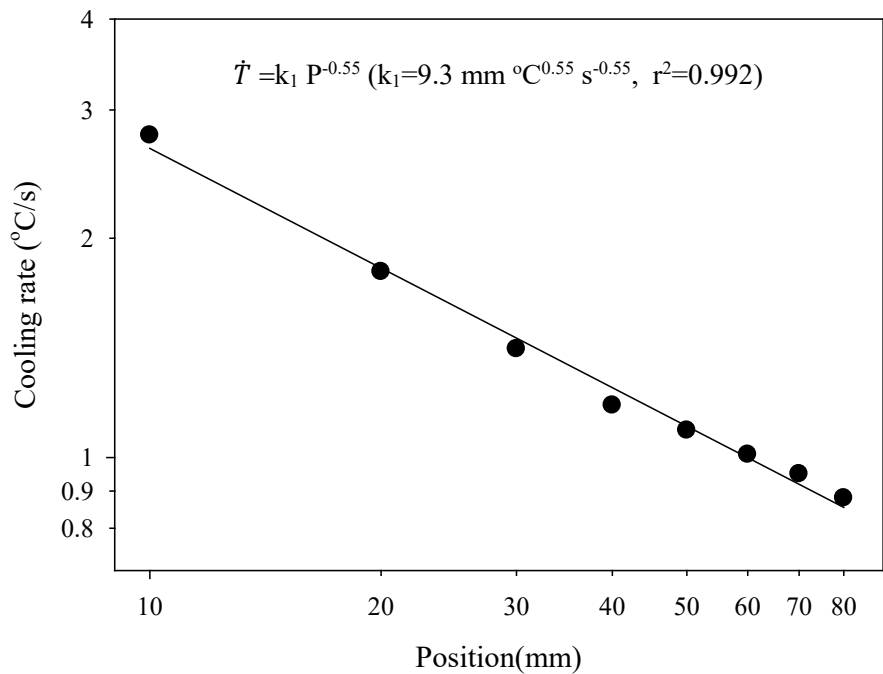


Fig. 3. Change of cooling rates according to the position from the sample base

Table 2. Cooling rates at different positions (heights from the sample base).

Distance from base (cm)	Cooling rate (°C/s)	Standard deviation
1 (T1-Region 1)	2.77	±0.12
2 (T2)	1.80	±0.09
3 (T3)	1.41	±0.07
4 (T4)	1.18	±0.08
5 (T5)	1.09	±0.06
6 (T6)	1.01	±0.05
7 (T7)	0.95	±0.04
8 (T8-Region 8)	0.88	±0.05

As seen in Fig. 3, the cooling rate decreased to approximately one third of the value as we went upwards from the sample base. From the relation between $\dot{T}$ and P , it is seen that $\dot{T}$ varies inversely proportional to the exponential value of P of 0.55. This value is in good agreement with the value of 0.56 obtained by Rosso et al. (2022) for the multi-Al alloy.

3.2. Thermal Properties

Fig. 4 shows the DSC curve of the alloy sample studied. Since the alloy studied is a multi-alloy system, it contains intermetallic phases such as Al_2Cu and Mg_2Si as mentioned in the previous study (Kaya et al. (2024)). In this graph, the red arrow indicates the onset temperature. The first peak at 503.8°C corresponds to the melting of the Al_2Cu eutectic phase, the second peak at 546.6°C corresponds to the melting of the Mg_2Si intermetallic phase, and finally, the third peak at 588.1°C indicates the complete melting of the $\alpha\text{-Al}$ primary phase. The findings of Sandoval et al. (2014) support our obtained data. These researchers determined that Al_2Cu melts at 500°C , Mg_2Si at 540°C , and $\alpha\text{-Al}$ at 597°C , in the same order. Using the data obtained from this curve, the initial melting onset temperature (T_{onset}), enthalpy (ΔH), and specific heat capacity (C_p) were calculated as 491.3°C , 301 J/g , and $0.658 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, respectively. Kageyama and Morita (2023) found an enthalpy value of 321 J/g for the Al-Cu-Si-Mg-Zn alloy.

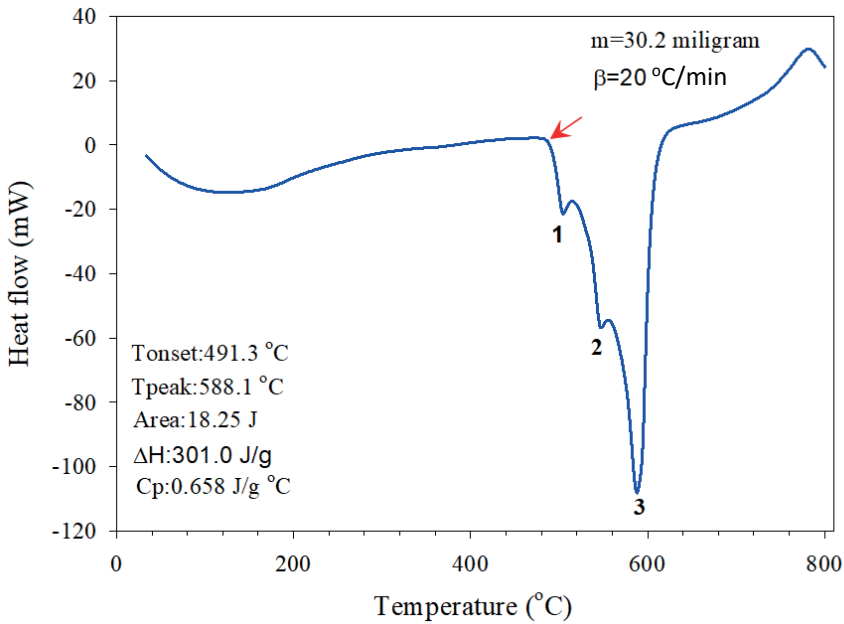
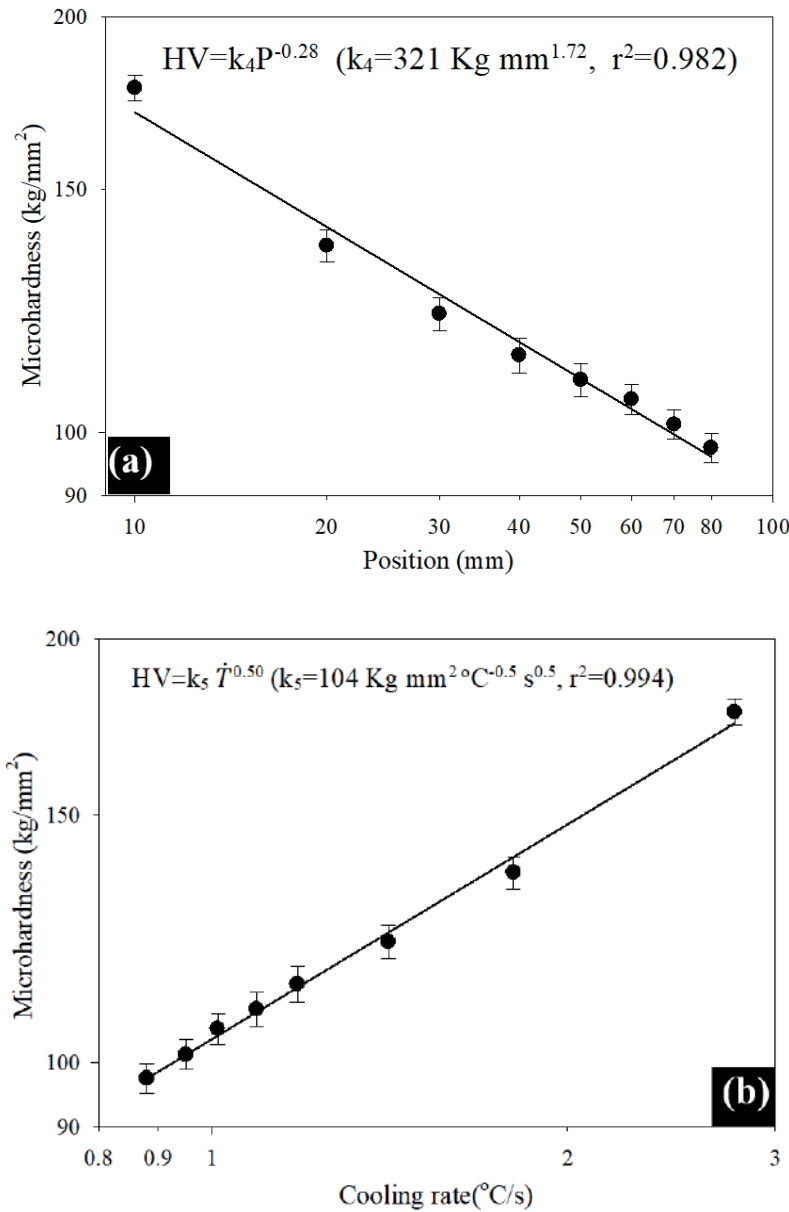


Fig. 4. DSC curve of the studied sample and the obtained thermal parameters.

3.3. Mechanical Properties

3.3.1. Microhardness

The variations in microhardness values with respect to the distance from the base, cooling rate, and eutectic spacing are presented in Fig. 5. As seen in Fig. 5(a), HV exhibited an inverse proportional change with the distance from the base (P) following an exponent of 0.28.



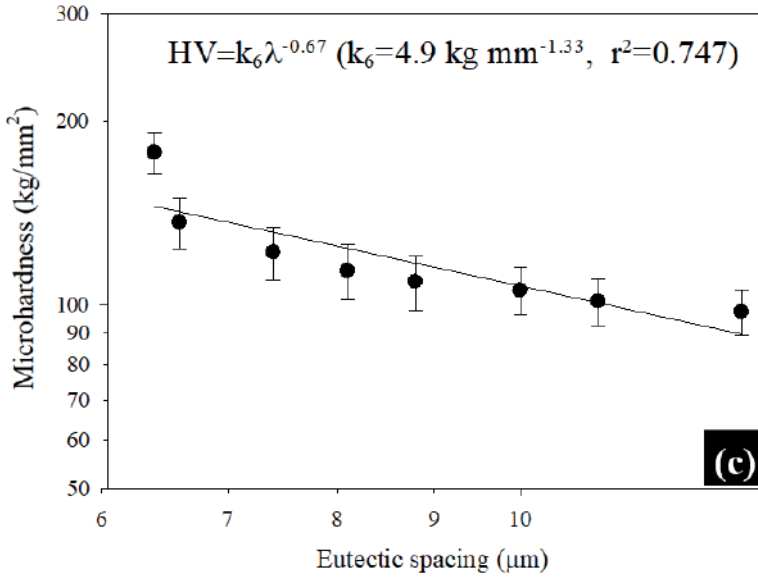


Fig. 5. (a) HV-P change, (b) HV- $\dot{T}$ change, (c) HV- λ change

As seen in Fig. 5(b), as the cooling rate increases from 0.88 °C/s to 2.77 °C/s, the HV value increases from 97 kg/mm² to 177 kg/mm². The experimental correlation obtained from the graph indicates that HV is directly proportional to $\dot{T}$ with an exponent of 0.5. In Fig. 5(c), it is observed that as the eutectic spacing increases, the HV value decreases. The experimental correlation provided in the graph shows that HV is inversely proportional to λ with an exponent of 0.67. Araujo et al. (2016) reported that HV in Al-Cu-Si alloys exhibits an inverse proportionality to λ with an exponent of 0.55. Back et al. (2017) subjected an Al-10Mg-10Si-5Cu-5Zn multi-alloy system to a heat treatment at 440 °C for 10 hours and obtained an approximate microhardness value of 140 kg/mm². Chaskis et al. (2022) conducted a heat treatment at 200 °C for 24 hours on an Al-13.3Mg-23.8Zn-9.6Cu-6Si multi-component Al alloy, achieving a microhardness value of approximately 171 kg/mm². Sanchez et al. (2021) reported a microhardness value of 159 kg/mm² for the as-cast state of the Al-5Mg-5Sn-5Zn-5Ti alloy at room temperature.

3.3.2. Compressive Strength

Fig. 6 shows the compression stress-strain curves of samples solidified at different cooling rates at room temperature. As observed from these curves, both the compressive strength and compressive yield strength increase as the

cooling rate increases. The lowest compression, approximately 17%, was observed in the sample solidified at a cooling rate of 0.95 °C/s (Region 7), while the highest compression, approximately 26%, was observed in the sample solidified at a cooling rate of 1.80 °C/s (Region 2). Fig. 7 presents the variations in compressive strength values concerning the distance from the sample base (P), cooling rate ($\dot{T}$), and eutectic spacing (λ).

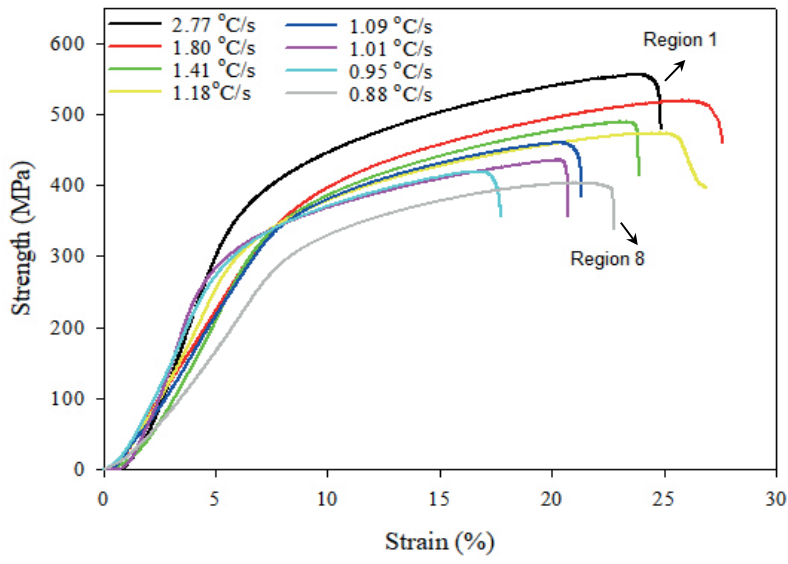


Fig. 6. Compressive stress-strain curves

As observed from the experimental correlations obtained in Fig. 7(a), the compressive strength (σ_c) and compressive yield strength (σ_y) exhibit an inverse relationship with P, following exponent values of 0.16 and 0.18, respectively.

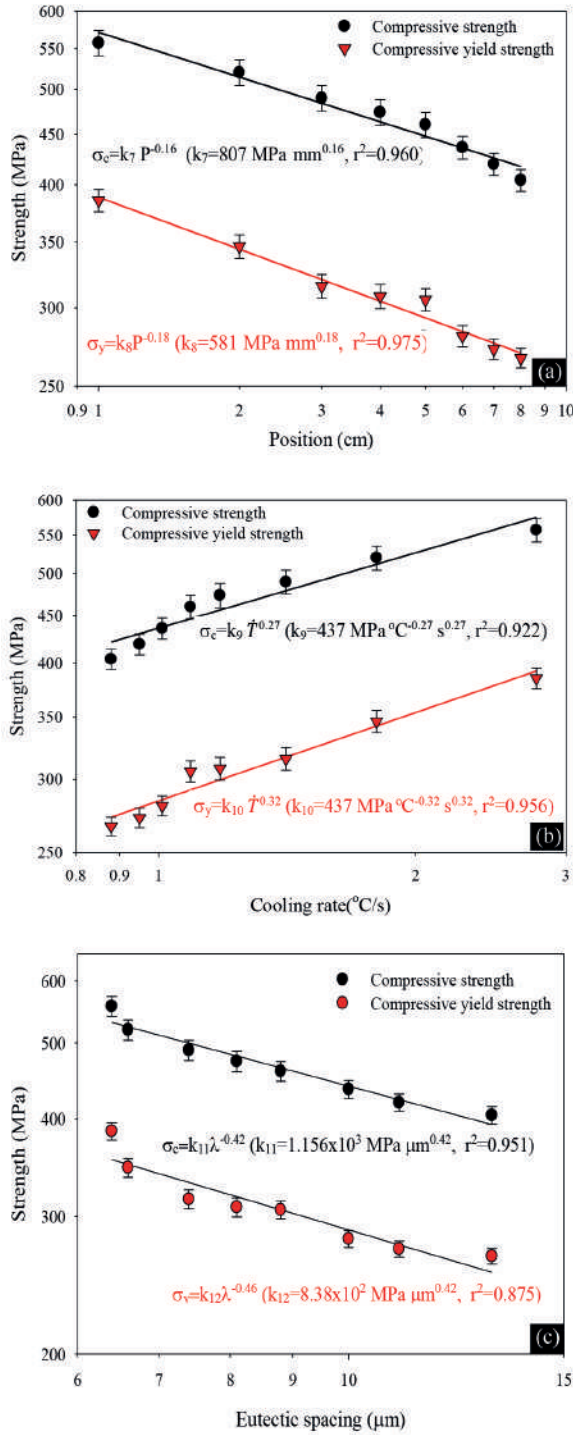


Fig. 7. (a) (σ_c, σ_y) - P change, (b) (σ_c, σ_y) - $\dot{T}$ change, (c) (σ_c, σ_y) - λ change

Fig. 7(b) illustrates the correlation between cooling rate and compressive properties, specifically compressive strength (σ_c) and compressive yield strength (σ_y). As the cooling rate ($\dot{T}$) increased from 0.88 °C/s to 2.77 °C/s, both compressive strength and compressive yield strength exhibited a corresponding increase, rising from 404 MPa and 266 MPa to 556 MPa and 385 MPa, respectively. The relationships between cooling rate and these mechanical properties were found to be directly proportional, with σ_c and σ_y scaling with cooling rate to the power of 0.27 and 0.32, respectively. Conversely, Fig. 7(c) demonstrates the inverse relationship between eutectic spacing and compressive properties. An increase in eutectic spacing resulted in a decrease in both compressive strength and compressive yield strength. Experimentally derived correlations indicated an inverse proportionality between σ_c and σ_y with eutectic spacing (λ), characterized by exponents of 0.42 and 0.46, respectively.

To contextualize these findings, the compressive strength and compressive yield strength values obtained in this study are compared with literature data for similar multicomponent aluminum alloys. Baek et al. (2017) reported compressive strength and compressive yield strength values of 414 MPa and 369 MPa, respectively, for a cast Al-10Mg-10Si-5Cu-5Zn alloy. Chaskis et al. (2022) measured a compressive strength of 588 MPa for a cast Al-13.3Mg-23.8Zn-9.6Cu-6Si multicomponent aluminum alloy. Sanchez et al. (2021) determined the compressive strength, compressive yield strength, and compressive strain (%) of a cast medium-entropy Al-5Mg-5Sn-5Zn-5Ti alloy at room temperature to be 563 MPa, 420 MPa, and 12%, respectively. In another study, Sanchez et al. (2019) investigated a medium-entropy Al-5Cu-5Mg-10Si-5Zn-5Zr alloy produced via induction furnace, reporting cast-state compressive strength, compressive yield strength, and compressive strain values of 633 MPa, 565 MPa, and 4%, respectively. Shao et al. (2018) synthesized a medium-entropy Al-14Mg-2.7Zn-2.7Cu-0.6Si alloy using an induction furnace under a high-purity argon atmosphere and reported compressive strength, compressive yield strength, and compressive strain of 498 MPa, 203 MPa, and 13.8%, respectively, for the cast alloy.

4. Conclusion

This study systematically investigated the effects of unsteady-state heat flow regime solidification on the microstructure, thermal properties, and mechanical performance of the multicomponent Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr alloy. The key findings are summarized as follows:

1. During free solidification under an unstable heat flow regime, the bottom part of the sample solidified at a cooling rate of 2.77 °C/s, while the top part solidified at a cooling rate of 0.88 °C/s. There is approximately a threefold difference in cooling rates between the top region (Region 8) and the bottom region (Region 1)
2. For the studied alloy, the initial melting temperature was determined as 491.3 °C, the final melting temperature as 588.1 °C, the enthalpy as 301 J/g, and the specific heat capacity as 0.658 J/g °C.
3. Due to the higher cooling rate at the bottom part of the sample, the highest mechanical properties were obtained as HV=177.5 kg/mm², σ_c =556.9 MPa, and σ_y =385.5 MPa. In contrast, at the top part of the sample, where the cooling rate was relatively lower, the values were HV=97.4 kg/mm², σ_c =404.1 MPa, and σ_y =266.7 MPa. Additionally, the minimum compression strain (~17%) was observed in Region 7, while the maximum compression strain (~26%) was found in Region 2. The final physical properties of the material are influenced by several factors, including the microstructure (size, shape, and composition of different phase components), the presence of precipitate phases (composition, distribution, and grain size), and the interactions between these phases. Silicon alone contributes minimally to the strength of aluminum casting alloys. However, in this study, its combination with Mg and Cu facilitated the formation of precipitate phases such as Al₂Cu and Mg₂Si during solidification, significantly enhancing both hardness and compressive properties. Moreover, the presence of a small amount of Zr in the alloy inhibited dislocation movement by forming coherent grains, preventing recrystallization.

Acknowledgements

This work was financially supported by **Erciyes University Scientific Research Projects Coordination Unit** under grant number **FBA-2023-12765**. The authors extend their gratitude to the *Erciyes University Technology Research And Application Center* for providing access to SEM and XRD facilities.

References

- Araujo, R. L. M., Kikuchi, R. H. L., Barros, A. S., Gomes, L. G., Moutinho, D. J. C., Gonçalves, F. A., Moreira, A. L. S., & Rocha, O. F. L. (2016). Influence of upward and horizontal growth direction on microstructure and microhardness of an unsteady-state directionally solidified Al-Cu-Si alloy. *Revista Matéria*, 21(1), 261–269.
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0024>
- Back, E. J., Ahn, T. Y., Jung, J. G., Lee, J. M., Cho, Y. R., & Euh, K. (2017). Effects of ultrasonic melt treatment and solution treatment on the microstructure and mechanical properties of low-density multicomponent Al70Mg10Si10Cu5Zn5 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 450–459.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.305>
- Chaskis, S., Stachouli, E., Gavalas, E., Bouzouni, M., & Papaefthymiou, S. (2022). Microstructure, phase formation and heat-treating of novel cast Al-Mg-Zn-Cu-Si lightweight complex concentrated aluminum based alloy. *Materials*, 15(9), 3169.
<https://doi.org/10.3390/ma15093169>
- Kaya, H., Çadırılı, E., Büyük, U., & Üstün, E. (2024). Microstructural evolution and phase formation of Al-5Cu-5Si-5Mg-5Zn-1Zr alloy freely solidified in the unsteady state heat flow regime. In M. M. Türkoğlu (Ed.), *Interdisciplinary studies on contemporary research practices in engineering- VII* (pp. 45–60). Özgür Publications.
<https://doi.org/10.58830/ozgur.pub575.c2359>
- Kageyama, Y., & Morita, K. (2023). Compositional and thermophysical study of Al-Si- and Zn-Al-Mg-based eutectic alloys for latent heat storage. *High Temperature Materials and Processes*, 42(1), 20220269.
<https://doi.org/10.1515/http-2022-0269>
- Rosso, E., Santos, C. A., & Garcia, A. (2022). Microstructure, Hardness, Tensile Strength, and Sliding Wear of Hypoeutectic Al-Si Cast Alloys with Small Cr Additions and Fe-Impurity Content. *Advanced Engineering Materials*, 24(8), 2001552.
<https://doi.org/10.1002/adem.202001552>
- Sanchez, J. M., Pascual, A., Vicario, I., Albizuri, J., Guraya, T., & Galarraga, H. (2021). Microstructure and phase formation of novel Al80Mg5Sn5Zn5X5 light-weight complex concentrated aluminum alloys. *Metals*, 11(12), 1944.
<https://doi.org/10.3390/met11121944>

Sanchez, J. M., Vicario, I., Albizuri, J., Guraya, T., & Acuña, E. M. (2019). Design, microstructure and mechanical properties of cast medium entropy aluminium alloys. *Scientific reports*, 9(1), 6792.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43329-w>

Hernandez-Sandoval, J., Samuel, A. M., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2014). Ni-And Zr-Based Intermetallics in Al-Si-Cu-Mg Cast Alloys. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 3, 408-420.

<https://doi.org/10.1007/s13632-014-0164-2>

Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., & Chen, D. L. (2014). Tensile and compressive deformation behavior of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy with additions of Zr, V and Ti. *Materials & Design*, 59, 352–358.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.060>

Shao, L., Zhang, T., Li, L., Zhao, Y., Huang, J., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2018). A low-cost lightweight entropic alloy with high strength. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(12), 6648–6656.

<https://doi.org/10.1007/s11665-018-3720-0>

Makine Mühendisliğinde Yenilikçi İmalat Teknolojileri ve Malzeme Bilimi

Editör:

Kaan Emre Engin