

BİDGE Yayınları

Innovative Approaches in Automotive and Manufacturing Engineering

Editor: HASAN KOTEN

ISBN: -

1st Edition

Page Layout By: G zde Y CEL

Publication Date: -

BİDGE Yayınları

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form or by any means, except for brief quotations for promotional purposes with proper source attribution, without the written permission of the publisher and the editor.

Certificate No: 71374

All rights reserved   BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. şti.

G zeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9  ankaya / Ankara



PREFACE

This book presents a collection of studies focusing on advanced engineering applications in manufacturing, measurement, and energy systems, with a particular emphasis on automotive and material technologies. The first chapter, "Analysis of the Impact of Infill Rate and Sample Thickness on the Tensile Strength of 3D Printed PETG Specimens," explores how design parameters influence the mechanical performance of polymer-based components manufactured using additive technologies. It offers valuable insights for optimizing 3D printing processes in both prototyping and functional part production. The second chapter, "The Importance of Measurement Systems Analysis in the Automotive Industry and Its Impact on Cost," addresses a critical quality assurance topic. It underlines how precise and reliable measurement systems directly affect production efficiency, cost control, and product compliance in one of the most competitive industrial sectors. The third chapter, "Heat Energy Recovery for BEV Cabin Air Conditioning System," tackles the pressing issue of energy management in battery electric vehicles. By proposing solutions for recovering and reusing heat energy, this study contributes to improving cabin comfort while extending vehicle range an essential factor for the future of sustainable mobility. As editors, we have reviewed, updated, and curated these chapters to be accessible in digital form, ensuring that they meet current academic standards and can reach a wider audience. We hope this compilation supports ongoing research, encourages innovation, and serves as a valuable resource for students, engineers, and researchers.

Editor

Assoc. Prof. Dr. HASAN KÖTEN
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİZİNİN ÖNEMİ VE MALİYETE ETKİSİ	1
---	---

EMRE BİRİKTİR

Analysis of the Impact Of Infill Rate and Sample Thickness on The Tensile Strength Of 3d Printed Petg Specimens	12
--	----

MUSTAFA ATILGAN, BEGÜM KARANFİL, HAZAL NUR KURUDERE, ALP EREN ŞAHİN

HEAT ENERGY RECOVERY FOR BEV CABIN AIR CONDITIONING SYSTEM	20
---	----

KÜRŞAT ÇOBAN

CHAPTER 0

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİZİNİN ÖNEMİ VE MALİYETE ETKİSİ¹

EMRE BİRİKTİR²
NEVİN ÖZER³

1. Giriş

Küresel rekabetin yoğunlaştığı günümüzde, otomotiv sektörü yüksek kalite standardı, düşük maliyet ve zamanında teslimat gibi beklentilerle karşı karşıyadır. Bu beklentilere karşılık verebilmek, yalnızca üretim süreçlerinin değil, aynı zamanda bu süreçleri kontrol eden ölçüm sistemlerinin de güvenilir olmasına bağlıdır. Ürün kalitesini doğrudan etkileyen ölçüm sonuçlarının güvenilirliği, üretim kararlarının doğruluğu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, **ölçüm sistemleri analizi** (MSA – Measurement Systems Analysis), bir organizasyonun ölçüm altyapısının

¹ Bu çalışma Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Toplam Kalite Yönetimi ABD’ yürütülen “Otomotiv Sektöründe Ölçüm Sistemleri Analizinin Önemi” isimli yayınlanmamış yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Düzce Üniversitesi, Toplam Kalite Yönetimi, 0009-0007-2119-7032

³ Doç. Dr., Düzce Üniversitesi, İşletme Fakültesi, 0000-0002-1736-4199

performansını değerlendirmek ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla kullanılan sistematik bir yaklaşımdır (AIAG, 2010).

lm sisteminde oluşabilecek hatalar, hatalı üretime, kalite kayıplarına ve dolayısıyla maliyet artışına yol açmaktadır. Özellikle otomotiv sektörü gibi hata toleransının düşük olduğu alanlarda, ölçüm sisteminin varyasyonu üretim süreci kadar dikkatle analiz edilmelidir. MSA uygulamaları ile ölçüm sisteminin tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilbilirlik oranları belirlenerek, sistemin istatistiksel yeterliliği kontrol altına alınabilir. Bu da hem müşteri memnuniyetini artırmakta hem de yeniden işlem, hurda ve garanti masrafları gibi maliyet unsurlarını düşürmektedir (AIAG, 2010).

Otomotiv sektöründe uygulanan kalite yönetim sistemlerinin (rneğin IATF 16949) MSA'yı zorunlu kılması da, bu konunun sektördeki stratejik önemini artırmaktadır. Doğru ve güvenilir ölçüm sistemi olmayan frmaların, ürün kalitesi üzerinde sürdürülebilir kontrol sağlaması neredeyse imknsızdır. Bu alışma, ölçüm sistemleri analizinin önemini ortaya koymaktır.

2. lm Sistemleri Analizi (MSA) Tanımı ve Tarihçesi

lm Sistemleri Analizi (Measurement Systems Analysis - MSA), bir üretim veya hizmet sürecinde kullanılan ölçüm sistemlerinin doğruluğunu, tutarlılığını ve güvenilirliğini değerlendiren istatistiksel bir yöntemdir. MSA, lm sisteminden kaynaklanan değişkenlikleri ortaya çıkararak, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini artırmayı amaçlar (Türk, 2019). Kalite yönetiminde kritik bir unsur olan MSA, rn kalitesinin garanti altına alınmasında temel rol oynar çünkü hatalı veya belirsiz ölçümler, hatalı kararlar verilmesine ve dolayısıyla maliyetlerin artmasına neden olabilir.

MSA kavramı, 20. yüzyılın ikinci yarısında istatistiksel kalite kontrol tekniklerinin gelişmesiyle beraber önem kazanmıştır. Özellikle 1980'li yıllardan itibaren otomotiv sektörü başta olmak üzere yüksek standart gerektiren endüstrilerde MSA'nın sistematik

uygulanması yaygınlaşmıştır. AIAG (Automotive Industry Action Group) tarafından yayınlanan MSA Referans Kılavuzu, bu alanda uluslararası kabul gören standartları ve yöntemleri belirlemiştir (AIAG, 2010).

2.1. Temel Kavramlar

MSA, ölçüm sisteminin performansını analiz etmek için bir dizi temel kavramı içerir. Bu kavramların anlaşılması, ölçüm sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir:

- **Tekrarlanabilirlik (Repeatability):** Aynı operatörün, aynı ekipmanla, aynı parça üzerinde kısa zaman aralıklarıyla yaptığı tekrar ölçümler arasındaki varyasyondur. Bu, ölçüm cihazının kendi içindeki tutarlılığını ifade eder.
- **Yeniden Üretilirlik (Reproducibility):** Farklı operatörlerin, aynı ölçüm ekipmanı ve aynı parçalar üzerinde gerçekleştirdikleri ölçümler arasındaki farklılıklardır. Operatörler arasındaki varyasyonları ortaya koyar.
- **Doğruluk (Accuracy):** Ölçülen değerlerin gerçek veya kabul edilen standart değerle ne kadar yakın olduğunun göstergesidir.
- **Önyargı (Bias):** Ölçüm sisteminin sistematik olarak gerçek değerden sapma miktarıdır.
- **Lineerlik (Linearity):** Ölçüm cihazının farklı ölçüm aralıklarında doğruluğunu koruyup korumadığıdır.
- **Stabilite (Stability):** Ölçüm sisteminin zaman içinde tutarlılığını ve performansının sabit kalmasını ifade eder.

Bu kavramlar, birlikte, ölçüm sisteminin kalitesini bütünsel olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Montgomery, 2020).

2.2. MSA Türleri

MSA kapsamında farklı analiz yöntemleri kullanılarak ölçüm sistemindeki hata kaynakları detaylandırılır. En yaygın kullanılan MSA türleri şunlardır:

- **GRR (Gage Repeatability and Reproducibility):** Ölçüm sistemindeki toplam varyasyonun, operatör ve cihaz kaynaklı olan kısmını belirler. Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik varyasyonlarının birleşimidir. GRR analizi, ölçüm sisteminin yeterliliğini değerlendirmede standart yöntemidir.
- **Bias Analizi:** Ölçüm cihazının gerçek değerden ne kadar saptığını ölçer. Bias, sistematik hata olup, cihaz kalibrasyonu veya ölçüm prosedüründeki hatalardan kaynaklanabilir.
- **Lineerlik Analizi:** Ölçüm sisteminin farklı değer aralıklarında ne kadar doğru ölçüm yaptığı incelenir. Lineerlik problemi, cihazın ölçüm aralığının belirli kısımlarında hata yapmasına neden olabilir.
- **Stabilite Analizi:** Zaman içinde ölçüm sisteminin performansını izler. Ölçüm sonuçlarının belirli bir zaman diliminde ne kadar tutarlı olduğunun analizidir.

Bu analiz türleri, otomotiv gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde ölçüm sistemlerinin sürekli izlenmesi ve iyileştirilmesi için temel araçlar olarak kabul edilir (AIAG, 2010; Montgomery, 2020).

3. Otomotiv Sektöründe MSA

3.1. IATF 16949 Gerekliklikleri

Otomotiv sektörü, yüksek kalitede üretim standartları ve güvenilirlik beklentileri nedeniyle kalite yönetim sistemlerine büyük önem vermektedir. Bu bağlamda, IATF 16949 standardı, otomotiv üretim ve ilgili hizmet parçaları organizasyonları için kalite yönetim sistemlerinin gereklikliklerini belirleyen uluslararası bir standarttır. IATF 16949, ürün kalitesinin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla ölçüm sistemlerinin analiz edilmesini ve kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır. Standardın ilgili maddeleri, ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, ölçüm doğruluğunun sağlanması ve ölçüm sistemlerinin periyodik olarak değerlendirilmesini içermektedir (IATF, 2016).

Bu gereklilikler doğrultusunda, otomotiv üreticileri ve tedarikçileri, üretim süreçlerinde kullanılan tüm ölçüm sistemlerini düzenli olarak MSA ile değerlendirmektedirler. MSA, bu standart kapsamında, ölçüm sisteminden kaynaklanabilecek hataların önceden tespit edilmesi ve minimize edilmesi için kritik bir kontrol mekanizmasıdır. Standart, ayrıca ölçüm sistemleriyle ilgili olarak kayıt tutulmasını ve performans trendlerinin izlenmesini de zorunlu kılar.

Otomotiv sektöründe MSA uygulamaları, hem parça üretiminde hem de montaj süreçlerinde yaygın olarak görülür. Örneğin, motor parçalarının çap, uzunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi kritik ölçümlerinde, ölçüm cihazlarının doğruluğu doğrudan ürün kalitesini etkiler. Bir otomotiv firması, kritik boyutların ölçümü için kullanılan ölçüm cihazlarında düzenli olarak GRR analizleri yaparak, cihaz performansını ve operatör varyasyonunu izler.

Bir diğer örnek, otomotiv fren sistemlerinde kullanılan hidrolik basınçölçerlerin performansının sürekli olarak değerlendirilmesidir. Burada yapılan MSA sayesinde ölçüm cihazlarının sapmaları erken tespit edilerek, güvenliğin riske girmesi önlenir.

Otomotiv endüstrisinde, MSA sadece üretim değil, aynı zamanda tedarik zincirindeki tedarikçi kalite kontrol süreçlerinde de sıkı bir şekilde uygulanmaktadır. Tedarikçiler, kalite sistemlerinin bir parçası olarak MSA raporlarını periyodik olarak OEM'lere sunmak zorundadır.

3.2. Hata Türleri ve Riskler

Otomotiv sektöründe ölçüm sistemlerinden kaynaklanan hatalar, üretim kalitesi ve maliyet üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Bu hatalar genel olarak iki ana grupta incelenir:

- **Sistematik Hatalar:** Ölçüm cihazının kalibrasyon eksikliği, yanlış kalibrasyon veya çevresel koşullar nedeniyle

ölçümlerde tutarlı bir sapma meydana gelmesi durumudur. Bu tür hatalar genellikle bias ve lineerlik problemleri olarak karşımıza çıkar.

- **Rastgele Hatalar:** Ölçüm tekrarlanabilirliği ve operatörler arası farklılıklardan kaynaklanan değişkenliklerdir. Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik varyasyonları bu gruba dahildir.

Bu hataların fark edilmemesi durumunda, otomotiv üretiminde birkaç risk ortaya çıkar:

- Ürünlerin spesifikasyon dışı kalması,
- Hurda ve yeniden işleme maliyetlerinin artması,
- Müşteri şikayetlerinin yükselmesi,
- Marka itibarının zedelenmesi ve yasal risklerin oluşması.

Özellikle otomotiv sektörünün yüksek güvenlik standartları gerektiren yapısı, ölçüm hatalarının maliyet ve insan güvenliği açısından oluşturduğu riskleri büyütür. Bu nedenle MSA, olası hata kaynaklarının minimize edilmesi ve güvenilir ölçümlerin sağlanması için vazgeçilmez bir araçtır.

4. İşletmelerde MSA'nın Önemi

a) Kalite Güvence Stratejileri

İşletmeler, ürün ve hizmet kalitesini garanti altına almak için kapsamlı kalite güvence stratejileri geliştirir. Ölçüm Sistemleri Analizi (MSA), bu stratejilerin temel taşlarından biridir. MSA, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve tutarlılığını doğrulayarak, kalite güvence sürecinde belirsizliği ortadan kaldırır. Doğru ve güvenilir ölçüm olmadan kalite kontrol kararları yanlış olabilir, bu da üretim hatalarına ve maliyet artışlarına yol açar.

b) İç ve Dış Müşteri Memnuniyeti

Hem iç müşteri (departmanlar, süreçler arası) hem de dış müşteri (son kullanıcı, tedarikçi) memnuniyeti, işletmelerin başarısı için kritiktir. MSA, ürün kalitesini artırarak müşteri beklentilerinin karşılanmasını sağlar. Ölçüm sistemlerinin güvenilirliği, kalite sorunlarının erken tespiti ve önlenmesini mümkün kılarak müşteri memnuniyetini yükseltir.

c)Tedarik Zinciri Güvenilirliği

Otomotiv sektöründe karmaşık tedarik zinciri yapısı, tüm sürecin kalitesinin sağlanmasını zorunlu kılar. MSA, tedarikçi performansını izleyerek standart dışı ürünlerin erken tespitini sağlar. Böylece, tedarik zincirindeki hatalar minimuma indirilir, gecikmeler ve ek maliyetler engellenir.

5. MSA Uygulama Süreci

a)Planlama ve Ekip Seçimi

MSA'nın başarısı, doğru planlama ve uygun ekip seçimi ile başlar. Analiz sürecinde, ölçüm cihazları, operatörler, parçalar ve test koşulları dikkate alınmalıdır. Deneyimli kalite mühendisleri ve ölçüm uzmanlarıyla ekip oluşturmak, analizin doğruluğunu artırır.

b)Veri Toplama ve Analiz Yöntemleri

Veri toplama aşaması, ölçümlerin tekrarlanabilir ve yeniden üretilebilir şekilde yapılmasını gerektirir. Toplanan veriler, istatistiksel yöntemlerle analiz edilir. GRR analizi başta olmak üzere bias, lineerlik ve stabilite analizleri uygulanır.

c) Yazılım ve Donanım Araçları

Günümüzde MSA analizleri, istatistiksel yazılımlar (Minitab, JMP vb.) ile desteklenmektedir. Bu yazılımlar, veri

analizini hızlandırır, grafiksel sonuçların oluşturulmasını kolaylaştırır. Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu ve veri toplama otomasyonu da donanım açısından kritik öneme sahiptir.

6. GRR Analizi ve Yorumu

GRR (Gage Repeatability and Reproducibility), ölçüm sistemindeki toplam değişkenliğin operatör ve cihaz kaynaklı kısmını belirler. Tekrarlayan ölçümlerle varyasyon analiz edilir. Analiz sonuçları ölçüm sisteminin kabul edilebilirliğini belirlemek için kullanılır.

Genellikle GRR varyasyonu toplam varyasyonun %10'u altında ise sistem kabul edilir. %10-30 arası ise iyileştirme gerekebilir, %30'un üzerinde ise sistem yetersizdir. Örnek senaryolarla bu kriterlerin nasıl uygulandığı gösterilir.

7. MSA'nın Maliyete Etkisi

a)Hatalı Ölçümün Doğrudan ve Dolaylı Maliyetleri

Yanlış ölçümler, hatalı ürün üretimine, gereksiz yeniden işleme ve hurdaya yol açar. Doğrudan maliyetler bu süreçlerden kaynaklanır. Dolaylı maliyetler ise müşteri kaybı, itibar zedelenmesi ve yasal cezaları kapsar.

b)Hurda, Yeniden İşleme ve Müşteri Şikâyeti Maliyetleri

Kalitesiz ürünlerin maliyeti sadece üretim sürecini değil, müşteri hizmetleri ve garanti giderlerini de artırır. MSA ile ölçüm hataları önleildiğinde, bu maliyetlerde önemli azalma sağlanır.

c)Maliyet Avantajı Sağlayan İyileştirme Örnekleri

Ölçüm sistemlerinin iyileştirilmesi sonucunda elde edilen maliyet tasarrufları vaka analizleriyle desteklenir.

8. Sonuç ve Öneriler

Otomotiv sektöründe kalite yönetimi, müşteri memnuniyeti ve üretim verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Ölçüm Sistemleri Analizi (MSA) uygulamaları, üretim süreçlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Yapılan analizler, ölçüm sistemlerindeki belirsizliklerin ve varyasyonların tespiti ile iyileştirme alanlarının belirlenmesini mümkün kılarak, ürün kalitesinin sürdürülebilirliğine önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle, MSA'nın otomotiv sektöründeki uygulamaları, hem iç kalite kontrol süreçlerinde hem de tedarik zinciri yönetiminde kritik bir rol oynar.

MSA sayesinde işletmeler, ölçüm cihazlarından ve operatörlerden kaynaklanan hataları minimize ederek, yanlış ölçüm kaynaklı ürün kusurlarının önüne geçer. Bu durum, üretim hatalarının azalması, hurda oranlarının düşmesi ve yeniden işleme maliyetlerinin azalması anlamına gelir. Dolayısıyla, ölçüm sistemlerinin güvenilirliği, üretim maliyetlerinin kontrol altında tutulması ve müşteri şikayetlerinin azaltılması açısından doğrudan maliyet avantajları sağlar.

Öte yandan, MSA uygulamalarının başarılı olabilmesi için, süreçlerin titizlikle planlanması, doğru ekiplerin oluşturulması, güncel ve etkin yazılım-donanım araçlarının kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, periyodik eğitimler ve sürekli iyileştirme kültürünün işletmelerde yerleşmesi, ölçüm sistemlerinin performansının sürdürülebilirliğini sağlar. Bu bağlamda, otomotiv firmalarının MSA süreçlerine stratejik yatırım yapmaları ve ilgili tüm paydaşları sürece dahil etmeleri önerilmektedir.

Gelecekte yapılacak araştırmaların, MSA'nın farklı sektörlerdeki uygulama yöntemlerini karşılaştırması ve dijitalleşme, yapay zeka gibi teknolojilerin ölçüm sistemleri analizindeki etkilerini incelemesi faydalı olacaktır. Ayrıca, MSA ile kalite

yönetimi arasındaki ilişkiyi derinlemesine inceleyen çalışmalar, sektöre özgü yeni metodolojilerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, otomotiv sektöründe rekabet gücünü artırmak ve sürdürülebilir kaliteyi sağlamak isteyen işletmeler için MSA, sadece bir zorunluluk değil, aynı zamanda stratejik bir avantajdır. Kaliteyi ölçmek ve yönetmek için yapılan yatırımlar, uzun vadede hem maliyetleri düşürmekte hem de müşteri güvenini artırmaktadır. Bu nedenle, MSA uygulamalarının titizlikle yürütülmesi ve sürekli iyileştirilmesi, otomotiv sektöründe başarılı kalite yönetiminin temel koşullarından biri olarak kabul edilmelidir.

Kaynakça

AIAG (Automotive Industry Action Group). (2010). *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual* (4th ed.). Southfield, MI: AIAG.

Duran, C. (2015). Ölçüm sistemlerinin geçerliliği ve güvenilirliği üzerine bir araştırma. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 45-52.

ISO. (2016). *IATF 16949:2016 – Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations*. Geneva: International Organization for Standardization.

İçöz, E., & Yılmaz, H. (2020). Otomotiv sektöründe kalite kontrol uygulamaları: MSA örnek analizi. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 31(4), 210-220.

Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to Statistical Quality Control* (8th ed.). Wiley.

Türk, G. (2019). *İstatistiksel bakış açısıyla otomotiv sektöründe IATF 16949: 2016 standardının kuruluşu, yönetimi ve kalitenin iyileştirilmesi* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).

CHAPTER 0

Analysis of the Impact of Infill Rate and Sample Thickness on the Tensile Strength of 3D Printed PETG Specimens

Mustafa ATILGAN
Begüm KARANFIL
Hazal Nur KURUDERE
Alp Eren SAHIN

INTRODUCTION

Manufacturing with a 3D printer: 3D printing, also known as additive manufacturing [1], has profoundly altered the field of modern manufacturing. Unlike traditional techniques, which generally involve the subtraction of material from a solid block, 3D printing fabricates objects incrementally, layer by layer, based on digital designs. This innovative process offers exceptional flexibility, facilitating the creation of intricate geometries and customized components across a wide range of industries. From aerospace and automotive sectors to healthcare and consumer goods, 3D printing is fostering innovation, reducing production time, and enabling rapid prototyping [2]. Despite challenges such as material limitations and scalability, ongoing advancements continue to broaden the potential of manufacturing with 3D printers, thereby shaping the future of production. Initially, three-dimensional printing was primarily employed for recreational purposes and as a means for rapid prototyping and design. Nonetheless, the proliferation of 3D-printed samples has necessitated a heightened demand for high-quality specimens [3-7]. Ongoing advancements in three-dimensional printing technology have led to notable enhancements in production speed, quality, and reliability, thereby generating a demand for high-quality structural components [8-12]. Three-dimensional printing technology has fundamentally transformed the design, prototyping, and production processes within the automotive industry. This technology offers cost-effective, expedited, and more adaptable solutions compared to traditional manufacturing methods, thereby reducing both time and expenses, particularly in prototype production [13]. Furthermore, the influence of three-dimensional printers is expanding in domains such as personalized part production, lightweight structural element design, and spare part manufacturing [14]. For instance, major automotive companies have significantly reduced the product development cycle by employing this technology in the creation of functional prototypes and even in the low-volume production of certain end-use parts [15]. Additionally, from a sustainability perspective, the ability of 3D printing technology to minimize material waste and lower energy consumption underscores its potential to reduce environmental impacts [16].

PETG Filament: PET, Polyethylene Terephthalate Glycol-modified (PETG), a semi-crystalline polymer, ranks among the most extensively produced and utilized thermoplastics globally. The development of a

glycol-modified PET (PETG) copolymer was undertaken to overcome the crystallization limitations inherent in the PET polymer [17,18]. PETG filament is favored in 3D printing due to its versatility and durability. By integrating the properties of Polyethylene Terephthalate (PET) with glycol, PETG exhibits enhanced flexibility and impact resistance. This filament's transparency facilitates the production of clear or translucent prints with optical clarity. Furthermore, PETG is renowned for its chemical resistance, rendering it suitable for applications involving exposure to acids, alkalis, or solvents. Additionally, PETG filaments are relatively straightforward to print, exhibiting lower shrinkage and reduced warping compared to materials such as ABS. When manufactured from virgin resins, PETG is considered food-safe, making it appropriate for printing items such as food containers and utensils. In summary, PETG filament is a dependable option for a diverse array of 3D printing projects, offering a balance of strength, flexibility, and ease of use [19-22].

Purpose: The aim of our experiment was to investigate the influence of infill density and thickness on the tensile strength of polyethylene terephthalate glycol (PETG) material. To this end, we employed a 3D printer to fabricate samples using PETG filaments with varying infill densities and thicknesses, subsequently performing tensile tests on these samples. Through the analysis of the tensile test results, we evaluated the influence of the material's infill density and thickness on its tensile strength. This research was undertaken to advance our comprehension of the mechanical properties of PETG materials and to determine optimized 3D printing parameters for prospective applications.

Material And Method

Material

The PETG filament utilized was a silver filament from the ABG brand. The mechanical properties of the filaments are detailed in Table 1.

Table 1: specifications of the used filament

Thickness	1,75 mm +/- 0,01
Printing temperature	220-250 °C
Table temperature	60-100 °C

Method

Four distinct samples, characterized by two varying filling ratios and two different thicknesses, were fabricated to assess the influence of these parameters on tensile strength. The Creality Ender 3s1 Plus 3D printer was employed to produce these samples. For each sample type, three specimens were tested to calculate the standard deviation. The production parameters of the test samples are comprehensively outlined in Table 2, while Figure 1 illustrates the three-dimensional (3D) representation of the tensile test sample. Table 3 presents the codes of the samples along with their respective varieties.

Table 2: Production parameters of test samples

Printing temperature	235 °C
Table temperature	85 °C
Printing speed	100mm/sec
Filling rate	50%
	100%
sample thickness	4 mm
	6 mm

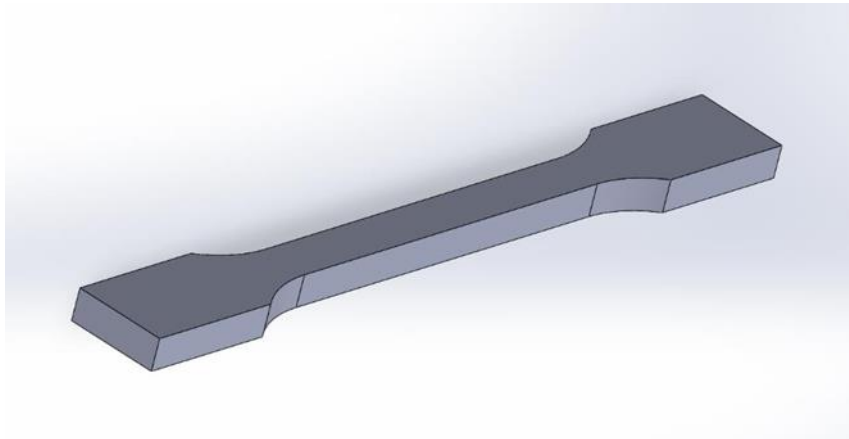


Figure 1: 3D Version of the tensile test sample

Table 3: Name of produced test samples

Sample Name	Filling Ratio	Sample Thickness
Sample_1	50%	4 mm
Sample_2	100%	4 mm
Sample_3	50%	6 mm
Sample_4	100%	6 mm

Results And Discussion

The densities of the samples produced are presented in Table 4. The measurement results indicate a significant decrease in density as the filling ratio decreases for samples produced with both thicknesses.

Table 4: Density of test samples

Sample Name	Density
Sample_1	1,137 g/cm ²
Sample_2	0,967 g/cm ²
Sample_3	1,163 g/cm ²
Sample_4	0,911 g/cm ²

The stress–strain curves of the test samples are presented in Figure 2. As illustrated in Figure 2, while the filler ratio and sample thickness significantly influenced the strength, they did not substantially affect the elongation at break. However, it was observed that thick samples did not yield entirely reliable results due to being scraped off from the jaw.

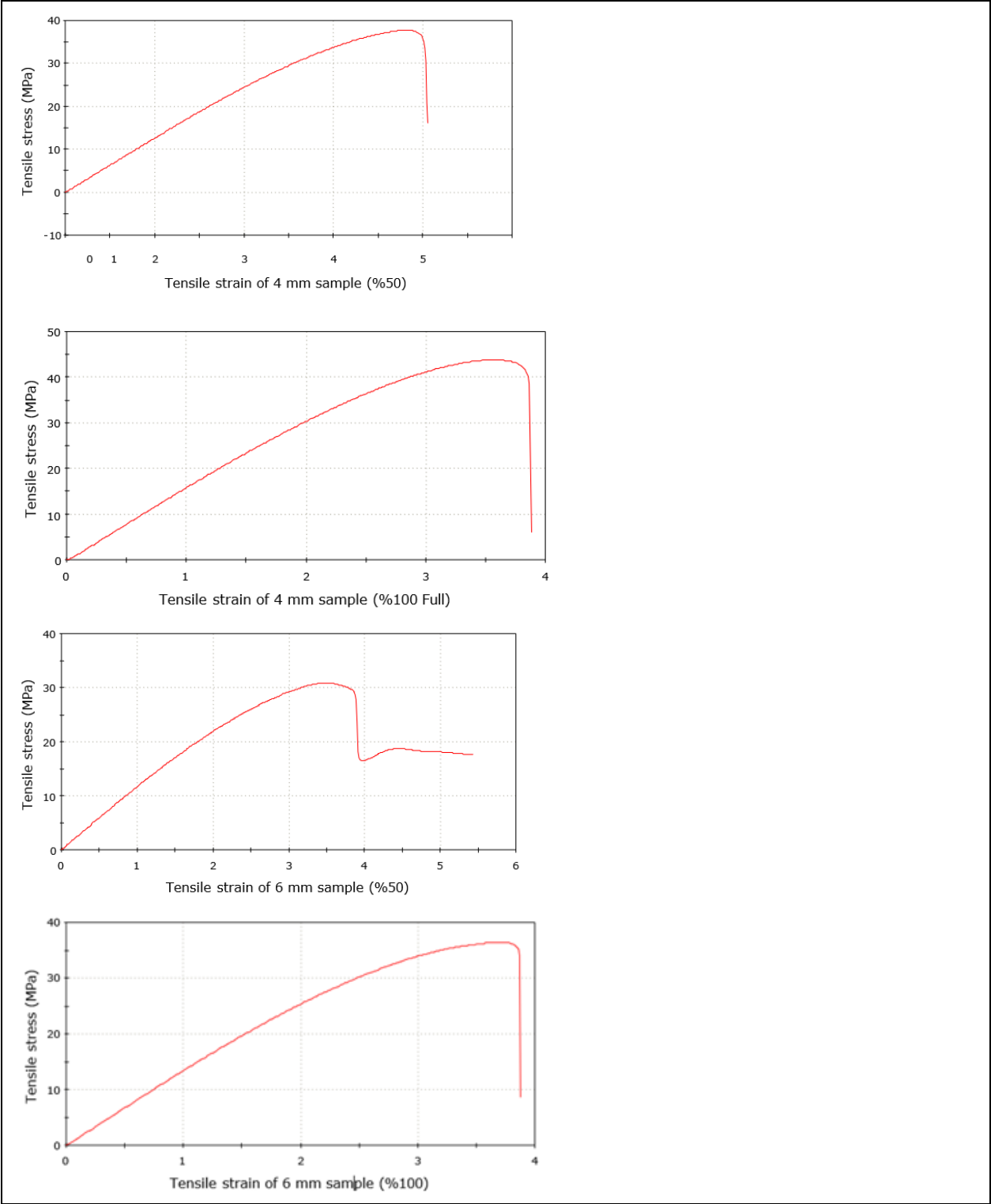


Figure 2: Stress-strain curves during tensile tests

Upon examination of Figure 3, which presents the average tensile strength values, it is evident that sample thickness exerts a more pronounced influence on tensile strength than the filling

ratio. Specifically, samples with a thickness of 4 mm exhibited higher tensile strength compared to those with a thickness of 6 mm. Furthermore, analysis of the impact of the filling ratio on tensile strength revealed a decrease in tensile strength as the filling ratio decreased for both sample thicknesses. Although it is generally anticipated that the filling ratio would not significantly affect strength, the observed phenomenon can be attributed to the detachment of thicker samples from the jaws during testing. Consequently, the tensile strength of samples with a thickness of 4 mm was markedly superior to that of samples with a thickness of 6 mm.

Notably, the examination of specific strength values, as depicted in Figure 4, revealed significant findings. For samples fabricated with both thicknesses, the specific tensile strength was greater in those produced at a 50% filling rate compared to those produced at a 100% filling rate.

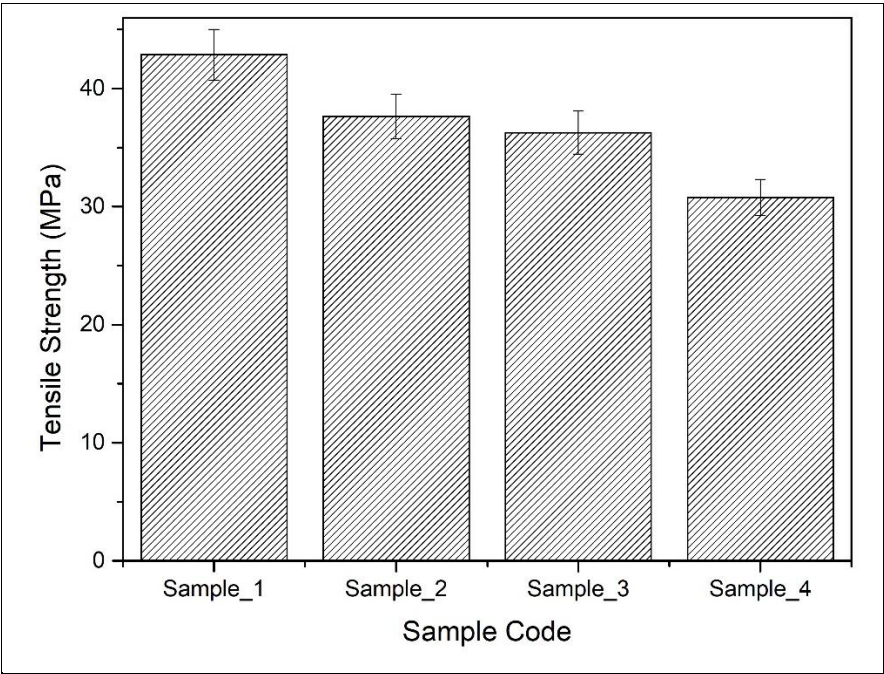


Figure 3: Tensile strength value of produced samples

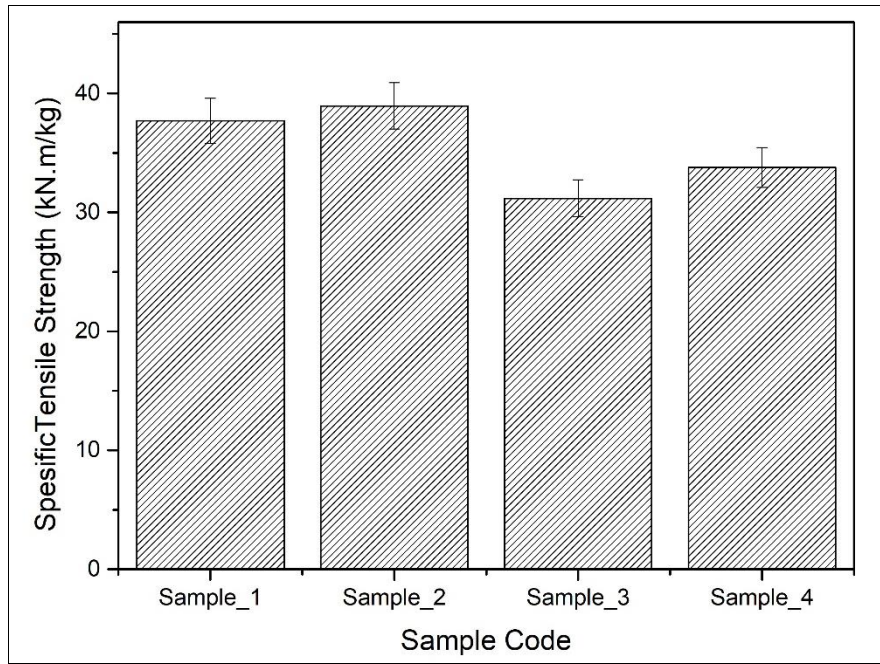


Figure 4: Spesific tensile strength value of produced samples

Conclusion

In this study, the influence of sample thickness and filling ratio on the tensile strength of samples fabricated using PETG material was examined. It was found that sample thickness significantly affected tensile strength, with samples measuring 4 mm in thickness exhibiting greater tensile strength compared to those with a thickness of 6 mm. Upon evaluating the impact of the filling ratio, it was observed that a reduction in the filling ratio corresponded with a decrease in strength values for samples of both thicknesses. A key finding of this research is the substantial effect of the filling ratio on specific tensile strength. It was determined that samples with a 50% filling ratio demonstrated higher specific strength than those with a 100% filling ratio. This finding indicates that, although the overall strength value appears to decrease with a reduced filling ratio, the load-bearing capacity per unit element increases. Consequently, employing a 50% fill ratio instead of a 100% fill ratio is an effective strategy to reduce production time and costs.

References

- N. Shahrubudina , T.C. Leea, R. Ramlana , An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (SMPM 2019) Procedia Manufacturing 35 (2019) 1286–1296
- ChetanM. Thakar , Shailesh S. Parkhe , Ankit Jain, Khongdet Phasinam, G. Murugesan , Randy Joy Magno Ventayen 3d Printing: Basic principles and applications
- Sahin A.E., Effect of Infill Line Direction on Tensile and Flexural Properties of Poly(Lactic Acid) Samples during 3D Printing, Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33, 1202-1209.
- K. Bulanda, M. Oleksy, R. Oliwa, G. Budzik, L. Przeszłowski, and A. Mazurkow, Biodegradable Polymer Composites Used in Rapid Prototyping Technology By Melt Extrusion Polymers (MEP), Polimery, 2020, 65(6), p 430–436. <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.6.2>
- H.I. Medellin-Castillo, and J. Zaragoza-Siqueiros, Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review, Chin. J. Mech. Eng., 2019, 32, p 53. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0368-0>
- E.H. Baran and H.Y. Erbil, Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review, Colloids Interfaces, 2019, 3, p 43. <https://doi.org/10.3390/colloids3020043>
- A.P. Valerga, M. Batista, J. Salguero, and F. Girot, Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts, Materials, 2018 <https://doi.org/10.3390/ma11081322>
- D.T. Pham and R.S. Gault, A Comparison of Rapid Prototyping Technologies, Int. J. Mach. Tools Manuf, 1998, 38(10–11), p 1257– 1287. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- V. Kumar, R. Singh, I.P.S. Ayuja, and J.P. Davim, On NanographeneReinforced Polyvinylidene Fluoride Composite Matrix for 4D Application, J. Mater. Eng. Perform., 2021, 30, p 4860–4871
- H.K. Dave, J.P. Davim (Ed.s), Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Springer, (2021), ISBN: 978-3- 030-68023-7
- M. Manjaiah, K. Raghavendra, N. Balashanmugagam, J.P. Davim (Ed.s), Additive Manufacturing, A Tool for Industrial Revolution 4.0, Elsevier, (2021), ISBN:9780128220566
- Juan Pou, Antonio Rivieiro, J.P. Davim (Ed.s), Additive Manufacturing, Elsevier, (2021), ISBN: 9780128184110
- W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C. C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, Computer-Aided Design, 2015, 69, 65-89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- S. Ford, M. Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of Cleaner Production, 2016, 131, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- M. Gebler, A.J.M.S.Uiterkamp, C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, Energy Policy, 2021, 74, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbolzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composite Part B: Engineering, 2018, 143,172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- M. Kováčová, J. Kozakovičová, M. Procházka, I. Janigová, M. Vysopal, I. Černíčková, J. Krajčovič, Z. Špitalský, Novel Hybrid PETG Composites for 3D Printing, Applied Sciences, 2020, 10, 3062-3077. <https://doi.org/10.3390/app10093062>
- Paszkiewicz S, Szymczyk A, Pawlikowska D, Irska I, Taraghi I, Pilawka R., Gu J., Li X., Tu Y., Piesowicz E., Synthesis and characterization of poly(ethyleneterephthalate- Co-1,4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-

block-poly(tetramethylene oxide) copolymers. RSC Adv. 2017, 7, 41745–41754.

Ksawery Szykiedans*, Wojciech Credo, Dymitr Osiński, Selected mechanical properties of PETG 3-D prints, XXI International Polish-Slovak Conference “Machine Modeling and Simulations 2016”, Procedia Engineering, 2017, 177, 455 – 461

Holcomb G., Caldon E. G., Cheng X., Advincula R. C., On the optimized 3D printing and post processing of PETG materials, MRS Communications, 2022, 12, 381-387.

R. Walter, R. Selzer, M. Gurka, K. Friedrich, Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components (Elsevier, Amsterdam, 2020), pp. 253–302.

Chen, T., Zhang, J., You, H. Photodegradation behavior and mechanism of poly(ethylene glycol-co-1,4 cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) random copolymers, Correlation with copolymer composition. RSC Adv. 2016, 6, 102778–102790.

CHAPTER 1

HEAT ENERGY RECOVERY FOR BEV CABIN AIR CONDITIONING SYSTEM

KÜRŞAT ÇOBAN¹

Introduction

In recent years, the global automotive makers have focuses for developing efficient, affordable battery powered vehicles that will replace internal combustion powered vehicles. This process started with hybrid vehicles. Then came plug-in hybrids and, more recently, battery-powered vehicles. This innovative technology needs lowering the cost of batteries, ability of fast charging, easy access to charging locations, and more longer ranges. It is also important to ensure that drive range does not change due to additional loads like conditioning of the cabin and vehicle components, similar to user experience with hybrids and traditional internal combustion engine powered vehicles. For internal combustion engine vehicles auxiliary heat loads use exceedingly small of fuel because of inefficiency of internal combustion engines. These engines convert fuel energy to mechanical energy up to forty percent. Other sixty percent is goes to atmosphere as a waste heat.

¹ Yüksek Makine Mühendisi, Tofaş Otomobil Fab. A.Ş., Ar-Ge, Orcid: 0000-0001-7527-4688

For battery powered vehicles all efficiency numbers are higher, and waste heats are significantly low. For that reason, BEVs require different approaches for heating and cooling for cabin conditioning.

Heating of cabin of an ICE vehicle is basically free. Waste heat from the combustion can be easily and cheaply use to heat the cabin via water to air heat exchanger at cabin HVAC box. But most of BEVs use positive temperature coefficient heaters (PTCs) for cabin heating. PTCs takes energy directly from battery which means significant range reduction. A study shows heating load can decrease driving range of BEVs up to 39.1 percentage (Steinsträter ve Lienkamp, 2021). Another study shows range reduction is 45 percentage for Fiat 500e if outside temperature drops below minus 10° Celsius (Chowdhury, 2018 & Parker, 2014).

Cooling requirements for hybrid and ICE vehicles rely on vapor compression refrigeration systems. This system provides a cooling capacity of up to five kW and coefficient of performance (COP) of system is greater than three for modern AC compressors. Battery electric vehicles solve cooling problems with using electric motor driven AC compressors or heat pumps. This system uses small electrical motor for pressurization work. BEVs cooling systems do not work for only cabin conditioning. Also, traction motors and batteries need to be cooled at higher ambient temperatures. For that reason, cooling capacity of system needs to be bigger for BEVs.

All these heating and cooling loads put extra stresses on the battery and drops significantly range of driving in extreme temperatures.

The Basics of HVAC System

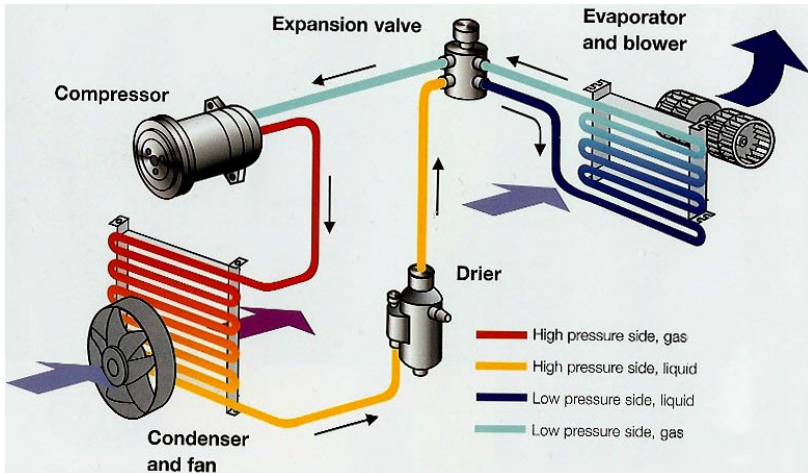
Automotive HVAC Systems (Heating, Ventilation and Air Conditioning) is one of subsystem. This system designed for maintaining passengers comfort by manage interior cabin temperature, air quality and humidity. System integrates control of

air flow and thermal management with help of electrical, mechanical and electronical components. Key components of HVAC systems are compressor, condenser, expansion valve, evaporator, heater core, blower fan, fluid pipes and hoses, electronical control module and some sensors and actuators. For cooling purposes refrigerant circulates by compressor through to cooling circuit. Low energy refrigerant takes heat from evaporator where is inside of vehicle and carries this heat to condenser where is outside of passenger cabin. The blower fan pushes this cooled air into cabin via air ducts and vents.

For heating of cabin, HVAC system uses waste heat of internal combustion engine. Hot engine coolant flows through heater core that inside of vehicle cabin than blower fan blows hot air from heater core into the cabin.

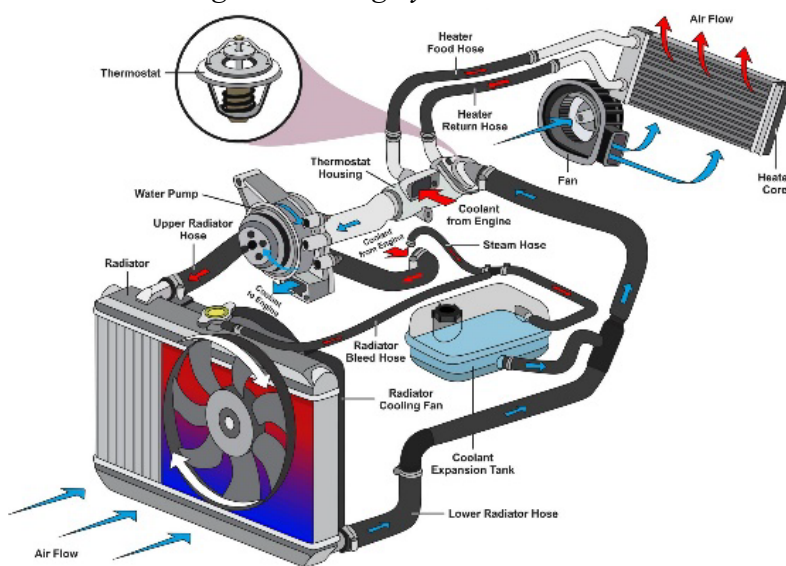
Modern HVAC systems have additional functions like air filters for cleaning, automatic recirculation, air quality and humidity sensor, and multi zone temperature control. Well-designed HVAC system can provide not only thermal comfort also defrosting/defogging function for driving safety.

Image 1: Cooling System Schematics



Kaynak: Lincon Custom Auto (2018), *How Does The A/C System Work In Our Vehicle*, <https://www.lincolncustomauto.com/blog/how-does-the-a-c-system-work-in-our-vehicle->

Image 2: Heating System Schematics



Kaynak: Knebles Auto Service Center (2023), *Vehicle Heating Schematics*, <https://a3x8z3v5.delivery.rocketchdn.me/wp-content/uploads/2019/12/automotive-cooling-system.webp>

Introduction to BEV HVAC System

HVAC system of Battery Electric Vehicles (BEVs) serves same main purpose as Internal or Hybrid Engine Vehicles (ICE and HEV) which is maintaining cabin thermal comfort. Hence, BEV HVAC system meets unique challenges because of missing waste heat energy that produced by internal combustion engine. Key components of BEVs' HVAC systems electric compressors or heat pumps, PTC (Positive Temperature Coefficient) Heater, condenser, evaporator, and thermal control subsystems. Apart of ICE or HEV vehicles BEVs generally rely on high voltage electrical compressors for circulate refrigerant liquid. For heat, early BEVs' uses PTC heaters which converts battery stored electrical energy to heat energy. Modern BEVs' chooses high efficiency heat pumps to decrease electrical load on vehicle traction battery which means longer driving ranges. Heat pumps are like same as conventional air conditioner but can provide heating and cooling. They can extract heat from cold air from outside and deliver to the passenger cabin. Using of heat pump can reduce energy consumption up to %50 compared to PTC heater (Parker, 2024). New generation heat pumps even can be used for conditioning of traction engine and main battery. Well optimized smart conditioning strategies can even cover multi zone climate, passenger sensing, pre-conditioning via smartphone application and may predict requirements for daily driving scenarios. Due to limited capacity of main batteries HVAC performance impacts directly driving range. This impact is even bigger at extreme ambient temperatures. For this reason, car manufacturers deeply integrate HVAC systems to main battery management system (BMS) and vehicle main thermal systems (VTMS) for optimize cabin conditioning and balance main battery usage.

As battery electric vehicles evolve, cabin conditioning systems will become more capable, efficient and intelligent with

help of usage different refrigerants, waste heat managements and artificial intelligence supported software for real time energy monitoring.

Heat Recovery Systems

A heat recovery system (HRS) is designed for capturing and re-using waste heat and improve energy efficiency. This system is widely used for building HVACs, industrial processes and increasingly in automotives.

The key principle is focused transfer of heat from hot medium to cold medium which can be air, liquid or combination of both. The recovered heat energy can be reuse for heating and cooling.

Main part of heat recovery systems is A heat exchangers. These parts can describe air to air, air to liquid and liquid to liquid heat exchangers. Condensers and heater cores are air to liquid heat exchangers, and they are widely using in all kinds of road vehicles. Heat recovery system types are like air-to-air heat exchangers that can transfer heat from air flow to another air flow, heat recovery wheels that can transfer heat energy and humidity between two different air flow and lastly liquid-to-liquid heat exchangers that can widely used in automotive close-loop systems like ICE engine cooling circuit for transfer heat between two different liquid flows.

In BEVs, waste heat that generated by main battery pack, traction motor and vehicle electronics is managed by glycol-based coolant circuits and re-use for passenger cabin heating.

Key performance of heat recovery systems is thermal effectiveness, heat transfer rates and response times. Optimized design, corrosion and impurity management, integration of vehicle thermal management are critical for modern automotive applications.

By utilizing recovery of heat, all these systems can reach up to %70 energy save, lower the CO₂ emissions and improve performance and sustainability of automotive business.

Calculations of Gains of Heat Recovery Systems for BEV Vehicles

The motivation of this paper is that how much heat recovery systems can provide additional range for pure battery electric vehicles at extreme ambient temperatures. An average C-segment M1-class passenger car was selected for the analytical calculations. This vehicle has approximately 3 m³ passenger volume. This volume has 3.5m² surface area that has solar radiation from sun (Chen, 2024). For passengers 600 m³/h air flow is needed at %100 fresh air mode. All other assumptions can be find table at below.

Table 1: Assumptions for calculations

Air Specific Heat (C _p)	1.005 kJ/kg·K	
Air Density (ρ)	1.2 kg/m ³	
Sun Load (Solar Radiation)	0 W/m ²	−20°C and 0°C (night/winter condition)
	200 W/m ²	15°C (spring)
	500 W/m ²	30°C (summer)
	800 W/m ²	45°C (summer)
Crossflow Heat Exchanger Efficiency (ε)	%60	
PTC Heater Efficiency	%100	Resistive Heating Element
Heat Pump COP	3.0	For heating or cooling

The energy is needed for lowering or raising the fresh air to cabin temperature

$$\dot{m} = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 0,1667 = 0,2 \text{ kg/s}$$

$$Q_{vent} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Table 2: Heating and Cooling Loads for different ambient temperatures

Outside Temp (°C) Inside Temperature = 20° Celsius	ΔT (°C)	Q (kW)
-20°	+40°	8.04 (heating)
0°	20°	4.02 (heating)
15°	+5°	1.01 (heating)
30°	-10°	2.01 (cooling)
45°	-25°	5.03 (cooling)

Sun heats our World via solar irradiance which is form of electromagnetic radiation. Vehicle glasses are made of special composition of different ingredients for decrease intrusion of solar heat. Absorption of Efficiency(η) for vehicle glasses are approximately 0.6

$$Q_{sun} = A . G . \eta$$

Table 3: Heat Loads from Sun

Outside Temp (°C)	Solar Irradiance G	Q_{sun} (kW)
-20°	Insignificant	Insignificant
0°	Insignificant	Insignificant
15°	200	0.42
30°	500	1.05
45°	800	1.68

Kaynak: ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook—Fundamentals (Chapter 14). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Governing Equations for all calculations:

Total Energy Requirement Equation:

$$Q_{Total\ Heat\ Load} = Q_{Vent} + Q_{sun}$$

Air to Air Heat Exchanger Gain Equation:

$$Q_{Recovered\ by\ heat\ exchanger} = \varepsilon . Q_{Vent}$$

Heat Recovery Percentage Equation:

$$\% = \frac{Q_{Recovered\ by\ heat\ exchanger}}{Q_{Total}} \cdot 100$$

PTC Heater Load (if absent of Heat Pump) Equation:

$$Q_{PTC} = Q_{Total} - Q_{Recovered}$$

Heat Pump Load Equation:

$$\text{Power Input(kw)} = \frac{Q_{PTC}}{COP}$$

Results of calculations for different ambient temperatures and using of PTC heater or Heat Pump can seen Table 4 at below.

Table 4: Results of calculations

Desired Cabin Temperature is 20° Celsius					
Outside Temperature(°C)	- 20°	0°	15°	30°	45°
Desired Cabin Temp Difference(°C)	+40°	+20°	+10°	-10°	-25°
Cabin Heat/Cooling Load(kW)	8.04	4.02	1.01	2.01	5.03
Radiated Head Load by Sun(kW)	-	-	0.42	1.05	1.68
Total Energy Requirement (kW)	8.04	4.02	1.43	3.06	6.71
Air To Air Heat Exchanger Gain(kW)	4.82	2.41	0.61	1.21	3.02
Heat Recovering Percentage	%60	%60	%43	%40	%45
PTC Heater Energy Load (kW)	3.22	1.61	0.82	-	-
Heat Pump Energy Load (kW)	1.07	0.54	0.27	0.62	1.23

Average C segment M1 class passenger vehicles consume 15kwh electrical energy for each 100 km travel(Chowdhury, 2018). With help of heat energy recovering systems BEV vehicles can travel more kilometers.

Table 5: Range Gain for Different Ambient Temperatures

Outside Temp (°C)	Energy Saved (kWh/hr)	Range Gain for each 100 km travel
-20°	4.82	20.9
-0°	2.41	12.7
15°	0.61	3.7
30°	1.21	6.7
45°	3.02	13.9

Results

A crossflow type air to air heat exchanger (HX) was evaluated for integration to BEV vehicles HVAC systems, aim of reducing heating and cooling loads for various ambient temperature conditions. Passenger cabin temperature was chosen 20° Celsius for optimum passenger comfort and ambient temperatures from minus 20° to 45° Celsius. Fresh air ventilation was assumed at %100 which is 600 m³/h or 0.2kg/s, with average crossflow air to air heat exchanger effectiveness of %60.

For heating scenario, the heat exchanger did recover up to 4.82 kw per hour at minus 20° Celsius, covering approx. %60 of total 8.04 kw passenger cabin heating load. At water freezing point 0° Celsius, 2.41 kw per hour was recovered, offsetting the energy required for PTC heaters or heat pumps. At hotter outside temperatures, the heat exchanger did pre-cool fresh air from 45° to 30° Celsius, saving of 3.02kwh in AC compressor load.

When converted to energy savings, the values clearly show additional range extensions. For 15kwh/100km of vehicle electrical energy consumption, HVAC energy saving up to 21 km additional range per 100 km in extreme cold temperatures, and up to 14 additional km for hotter climates. Even at normal climates like 30°

Celsius, 1.21 kwh cooling load can be recovered which is equal to 7 km for each 100 km travel.

This paper confirms that integration of a compact, crossflow air to air heat exchanger into BEVs' HVAC systems is a highly effective solution for range anxiety of battery electric vehicles. Future works can include latent heat transfer and managing of humidification to further enhancement of system performance.

Conclusion

This study extends our knowledge for how extreme ambient temperatures effect cabin conditioning and range of driving of BEVs. Calculations show that adapting air to air heat exchangers can help to reach longer driving ranges for new battery electric vehicles.

Up to %60 heat can be gain for heating, up to %45 for cooling of cabin cooling loads for passenger cars. These gains may be led to increase range %21 for cold ambient temperatures and %14 for hotter climates. Also using smart algorithms may be use for increase performance of air-to-air heat exchanger.

Acknowledgements

I thank to Tofaş A.Ş. for courage and permission for publish this study. I am grateful to all my colleagues at past and present for their supports and encouragement. The views expressed are those of the author and do not represent the policies of TOFAS and partner companies.

References

Steinsträter, Matthias & Heinrich, Tobias & Lienkamp, Markus. (2021). Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range. World Electric Vehicle Journal. 12. 115. 10.3390/wevj12030115.

Chowdhury, Sourav & Leitzel, Lindsey & Zima, Mark & Santacesaria, Mark & Titov, Gene & Lustbader, Jason & Rugh, John & Winkler, Jon & Khawaja, Aamir & Govindarajalu, Murali. (2018). Total Thermal Management of Battery Electric Vehicles (BEVs). 10.4271/2018-37-0026.

Parker, Nathan & Kuby, Michael & Liu, Jingteng & Stechel, Ellen. (2024). Extreme Heat Effects on Electric Vehicle Energy Utilization and Driving Range. 10.13140/RG.2.2.15006.34881.

Lincon Custom Auto (2018), How Does The A/C System Work In Our Vehicle, <https://www.lincolncustomauto.com/blog/how-does-the-a-c-system-work-in-our-vehicle->

Knebles Auto Service Center (2023), Vehicle Heating Schematics, <https://a3x8z3v5.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/12/automotive-cooling-system.webp>

Chen, Youyi & Kwak, Kyoung & Kim, Jaewoong & Jung, Dewey & Kim, Youngki. (2024). Integrated Thermal Management of Electric Vehicles Based on Model Predictive Control With Approximated Value Function. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2024.3393409.

ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook—Fundamentals (Chapter 14). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

