

BIDGE Publications

ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN
MODERN APPLICATIONS

Editor: Doç. Dr. Harun YAKA

ISBN: 978-625-372-574-7

Page Layout: Gzde YCEL

1st Edition:

Publication Date: 25.12.2024

BIDGE Publications,

All rights of this work are reserved. It cannot be reproduced in any way without the written permission of the publisher and editor, except for short excerpts to be made for promotion by citing the source.

Certificate No: 71374

Copyright © BIDGE Publications

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

Krc Biliřim Ticaret ve Organizasyon Ltd. řti.

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



Content

Modern Dental Materials: The Use of Fiber-Reinforced Composites And Its Applications	4
Halil Burak KAYBAL.....	4
Hasan ULUS.....	4
Harnessing Nanomaterials In Wearable Technologies: From Smart Fabrics To Health Monitoring Systems	27
Hasan ULUS.....	27
Halil Burak KAYBAL.....	27
Polipropilen Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi.....	50
İbrahim ASLAN.....	50

CHAPTER I

Modern Dental Materials: The Use of Fiber-Reinforced Composites And Its Applications

Halil Burak KAYBAL¹
Hasan ULUS²

1. Introduction

Human organs are unique in their characteristics and functions, making them irreplaceable. Therefore, the use of potential solutions capable of replacing them brings many challenges. The materials chosen to replace body parts and organs are referred to as biomaterials (Krishnakumar & Senthilvelan, 2021). The use of biomaterials has been traced back thousands of years through archaeological studies (Malekani, Schmutz, Gu, Schuetz, & Yarlagadda, 2011). With the invention of stainless steel, metals began to be widely used in body implants (Ramakrishna, Mayer, Wintermantel, & Leong, 2001). Although metals are an important choice for body implants due to their strength and fatigue resistance, their tendency to corrode easily in the human body and cause toxicity

¹ Assoc. Prof. Dr, Amasya University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Amasya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2312-7106, hburak@amasya.edu.tr

² Assoc. Prof. Dr, Selcuk University, Huglu Vocational School, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0001-8591-8993, hasanulus@selcuk.edu.tr

has led de-signers and researchers to search for alternative materials to metals. As a result, much research has focused on polymers that could potentially replace metals. Initially, it seemed difficult to achieve the performance of a metal material from polymers, but with deeper studies, the properties of polymers began to improve. To enhance the mechanical performance of polymers, fiber reinforcements, nano/micro-sized particles, ceramic, and metal-based products have been added to polymer matrices, creating polymer matrix composites. Each component that reinforces the polymer matrix highlights different properties in the final composite, leading to sharp differences between the properties and making it difficult to obtain the optimal material combination for specific applications. For biomedical applications, the goal for polymer matrix composites is to develop products that are non-allergenic, non-toxic, compatible with the human body, and provide high mechanical performance and corrosion resistance. Especially, achieving the desired mechanical properties is directly related to the interaction between the matrix and the reinforcement.

Dental composites are the cornerstone of modern restorative dentistry and have made significant advancements in reshaping the field of dental materials. These composite resins, which contain a matrix and inorganic fillers, have evolved from primitive formulations into sophisticated materials offering an impressive balance of aesthetic, mechanical properties, and clinical durability (Alla, 2013; Navyasri, Alla, Vineeth, & Suresh Sajjan, 2019; Ravi, Alla, Sham-mas, & Devarhubli, 2013). As the demand for minimally invasive and aesthetically satisfying dental treatments continues to rise, re-searchers and manufacturers have embarked on an innovation journey to develop dental composites that not only mimic natural tooth structure but also surpass the mechanical limitations of previous materials. Moreover, dental composites have entered a new era of innovation, with one of the most exciting developments being the evolution of fiber-reinforced composites (FRC). These advanced materials are redefining restorative dentistry by harnessing the potential of fibers to improve both aesthetic and mechanical properties. As the demand for minimally invasive and aesthetically

pleasing dental treatments continues, researchers and manufacturers have embarked on an innovation journey to develop FRCs that combine the advantages of traditional dental composites with the unique benefits of fiber reinforcement (Harsha et al., 2020).

In general, these advanced materials with engineering potential provide a unique combination of mechanical properties, aesthetics, and biocompatibility, making a valuable contribution to the field of dentistry (Aldabib, 2020). In recent years, the use of fiber-reinforced composites has gained significant momentum, enabling dentists to offer more advanced restorative solutions to patients (P. K. Vallittu, 1997). This review delves into the impressive world of fiber-reinforced composites in dentistry, exploring their types, properties, and various clinical applications.

2. Fiber Reinforced Composites in Dental Applications

When at least two components with different properties are combined, the new structures formed possess distinct and unique characteristics, which are referred to as "composites" (Aftab Ahmed Khan, AlKhureif, Mohamed, & Bautista, 2020; Aftab Ahmed Khan et al., 2023; Tripathi & Jones, 1998). Fiber-reinforced composites (FRCs) produced by human efforts show similarities to natural fiber composite materials like bone, wood, and dentin (Fuqua, Huo, & Ulven, 2012). Since their introduction in dentistry nearly sixty years ago, significant progress has been made in dental resin composites. However, the cracking of resin composites and bulk fracture of composite restorations have prevented their use in clinical situations that require higher load-bearing capacities (Aftab Ahmed Khan et al., 2023). Additionally, high polymerization shrinkage has led to clinical outcomes such as secondary caries (Aftab Ahmed Khan et al., 2020; Aftab A Khan et al., 2022). The introduction of FRC materials and material production technology has accelerated the emergence of dental resin composites with specialized mechanical properties. FRC materials contain fibers as a dispersed or regular phase within a matrix as a continuous phase. When fibers with a high aspect ratio are carefully designed in the structure, oriented in precise

directions, and well-integrated into the polymer matrix, the resulting material meets the needs of areas requiring high mechanical performance and can offer enhanced properties compared to currently used systems.

The use of FRCs in dental applications dates back to the 1960s. Initially, glass fiber reinforcements were predominantly used, but by the early 1970s, they were gradually replaced by carbon/graphite fibers. Moreover, the first reinforced applications were made with polymethyl methacrylate (PMMA), the base polymer for denture prostheses (Schreiber, 1974; Smith, 1962). Research efforts were insufficient to develop a clinically applicable method to reinforce denture bases, and the denture base polymer was later tested with ultra-high-modulus polyethylene fibers, glass fibers, and aramid fibers (Ladizesky, 1990; Ladizesky, Chow, & Ward, 1990; Ladizesky, Ho, & Chow, 1992; P. Vallittu & Lassila, 1992). Using FRC material technology, the reinforcement of denture base polymers reached a technically feasible stage after the incorporation of PMMA reinforced with pre-impregnated glass fibers (P. K. Vallittu, 1997). Subsequent studies introduced FRC material technology for clinical use (DeBoer, Vermilyea, & Brady, 1984; Grave, Chandler, & Wolfaardt, 1985; Lassila, Tanner, Le Bell, Narva, & Vallittu, 2004). In implant-supported dental prostheses designed with FRCs, the frameworks mechanically met expectations, but early clinical experiences revealed significant adhesion issues between FRCs and dental prostheses. In other commercial ventures, designs failed to provide sufficient mechanical support. The introduction of short fiber-reinforced composites for direct techniques overcame some limitations of particle-modified fillings, making these materials suitable for load-bearing applications (Tsujiimoto, Barkmeier, Takamizawa, Latta, & Miyazaki, 2016).

Today, FRCs are used in restorative and prosthetic dental applications, but the production of types with complex structures is still limited in dental laboratories. Furthermore, FRCs are used for the repair of metal-based dental implants, porcelain crown repairs (Özcan, Van Der Sleen, Kurunmäki, & Vallittu, 2006; P. Vallittu,

2002), partial and complete dentures, and implant-supported overdenture prostheses (Gibreel, Lassila, Närhi, Perea-Lowery, & Vallittu, 2018, 2019; Aftab A Khan et al., 2019). Strengthening removable dentures with FRCs has overcome issues arising from the low fatigue resistance of denture base polymers and recurrent denture fractures (Aftab Ahmed Khan et al., 2022; Narva, Lassila, & Vallittu, 2005; Narva, Vallittu, Helenius, & Yli Urpo, 2001). However, the clinical use of FRC reinforcement in removable dentures remains limited due to insufficient infrastructure among dental laboratory technicians.

FRCs have also been investigated as oral and maxillofacial implant materials (Rendenbach et al., 2019). A cranial implant made from FRC and bioactive glass, designed for cranioplasty, is already clinically used (Rendenbach et al., 2019; P. K. Vallittu, 2017, 2018). Glass fibers with a length-to-diameter ratio greater than 20 can effectively increase the fracture toughness of the composite, making it suitable for applications requiring high load-bearing capacity. In recent years, innovative glass fiber-reinforced composite implants have demonstrated increased bone and tissue volume values, followed by bone-implant contact values similar to metal counterparts. These implants have a biofiber structure and glass particles embedded in an epoxy resin matrix (A. Ballo, Lassila, Närhi, & Vallittu, 2008; A. M. Ballo et al., 2008; A. M. Ballo, Lassila, Vallittu, & Närhi, 2007; Chan et al., 2018). With the advancement of computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) technology, the production of FRC-based prostheses has been transformed, improving their clinical performance and expanding their range of applications. Industrial FRC disks, produced under controlled temperature and pressure, exhibit reduced voids, defects, and internal stresses in the microstructure. As a result, the material's structural reliability has increased, and the inter-locking and alignment of fibers in various directions have been promoted (Bergamo et al., 2021). Moreover, suitable CAD designs and precise milling, considering fiber orientation, can enhance the biomechanical performance of the framework, improve the reliability of the frame/veneering material,

and reduce fractures (Bonfante et al., 2015). With CAD/CAM FRC technology, post and core systems in various angles, diameters, and forms can be produced with high precision and efficiency (E. Mangoush, L. Lassila, P. Vallittu, & S. Garoushi, 2021; E. Mangoush, L. Lassila, P. K. Vallittu, & S. Garoushi, 2021; Suzaki et al., 2021).

3. The Polymer for Dental Composites

The ability to modify the physical structures of polymers through changes in their additives, their ease of manipulation, better reproducibility, the increased connection of connective tissues, the easier microscopic evaluation compared to metals, as well as their superior aesthetic properties and advantages, make them widely used in dental applications (Chandra, 2020; Jockusch & Özcan, 2020; Krishnakumar & Senthilvelan, 2021). The earliest studies on dental applications of polymers began with polymethyl methacrylate (PMMA) resin. The development of polymethyl methacrylate as a biologically tolerable material for dental implants paved the way for further advancements in polymer use in dental applications (Hodosh, Povar, & Shklar, 1969). These polymers have been used in applications such as replacing a natural tooth with a replica, and they have been successful in restoring basic needs (function and appearance) (Hodosh, Povar, & Shklar, 1973).

3.1. Biopolymers

Biopolymers are products derived from fundamental biological systems such as living organisms, plants, and cultured microbial systems through chemical synthesis (Verma, Kumar, Jeslin, & Dubey, 2020). Compared to synthetic polymers, biopolymers offer significant advantages; they are particularly characterized by well-defined and more complex structures, renewability, and biodegradability (Rebelo, Fernandes, & Fanguero, 2017). Biopolymers are commonly used as organic coatings, primarily with hydroxyapatite and ceramic composites, to alter the surface properties of dental implants. This helps enhance biodegradability

and biocompatibility due to the natural properties of these materials. The most well-known biopolymers in literature are PLA and chitosan.

PLA, derived from biodegradable sources such as potatoes, corn, rice, and starch, can be considered one of the most easily accessible polymers (Castro-Aguirre, Iniguez-Franco, Samsudin, Fang, & Auras, 2016). For dental implants, PLA offers advantages in terms of biocompatibility and easy curing. Although the biomechanical nature of PLA is similar to that of human-made poly(lactic-co-glycolic acid) polymers, PLA provides an additional benefit due to its easy availability at a lower cost. Moreover, implant structures made from copolymers produced by compression molding for bone development applications in dentistry are preferred due to their inertness, compatibility, and the flexibility to manipulate degradation rates (Song, Winkeljann, & Lieleg, 2020). These properties can be used in the production of dental implant skeletons to improve the mechanical properties of native polymer materials.

Chitosan is a cationic polymer obtained through high-temperature alkalization processes from crustaceans such as lobsters and crayfish (Rebelo et al., 2017). It is a biocompatible, biodegradable material that offers flexibility for shaping into porous structures. For this purpose, chitosan (CS) is used in combination with calcium phosphate-based composites. CS creates a 3D macroporous bio-ceramic structure embedded with a chitosan polymer that improves the biomechanical properties of the ceramic phase through matrix strengthening without hindering osteoblast tissue structure (Di Martino, Sittinger, & Risbud, 2005). The material made from hydroxyapatite-chitosan (with osteoconductive properties) has exhibited rapid degradation and neovascularization over a 3-month period in *in vivo* tests (Buranapanitkit et al., 2004; Ge, Baguenard, Lim, Wee, & Khor, 2004). Chitosan's intramolecular hydrogen bonds, which provide good heat resistance, have given advantages to its composites with polymethyl methacrylate (PMMA), resulting in lower exothermic curing temperatures and reduced energy consumption. Furthermore, it demonstrated high interconnected porosity, enhanced osteoconduction, and better attachment to

surrounding bone. However, long-term use has been observed to increase the pore size of this composite material due to the biological degradation of CS (Kadambi, Luniya, & Dhatrak, 2021; Kim et al., 2004).

3.2. Synthetic Polymers

It is possible to produce synthetic polymers with repeatable, predictable, and adjustable properties by appropriately designing polymer functional groups and altering their chemical structures according to specific applications (Bhatia, 2016; Simionescu & Ivanov, 2016). A comparative study between natural and synthetic polymers observed that in dental applications, synthetic polymers exhibit lower biological activity, osteoconductivity, and cellular recognition regions compared to natural polymers. Additionally, the degradation rate of synthetic polymers can be altered depending on changes in crystallinity, chemical composition, and molecular weight (Kadambi et al., 2021). Based on these observations, various ceramic and polymer particle coatings have been tested to enhance surface performance for bone tissue regeneration. However, aliphatic polyesters have been the most used in the synthetic polymer family: Poly(ether ether ketone) (PEEK), Poly(ether ketone ketone) (PEKK), Bis-GMA, and TEGDMA.

PEEK (a semi-crystalline thermoplastic polymer) possesses high strength and excellent rigidity, along with resistance to thermal and chemical changes caused by oils and acids (Zhou, Goel, & Bhaduri, 2014). PEEK, colorless and with a low elastic modulus value, is a viable option for dental device production. It has a proven elastic modulus value of 3–4 GPa and often reduces concerns related to osteoporosis and bone resorption due to stress protection effects (Najeeb et al., 2015). However, PEEK is not suitable for cell adhesion due to its natural biological inactivity. Biocompatibility, chemical resistance, and natural radiolucency are some of the key reasons for the use of PEEK and its composites.

Bis-GMA and TEGDMA are a continuous polymer matrix that can be polymerized by visible light. Bisphenol-A-glycidyl

methacrylate, diluted with triethylene glycol dimethacrylate, forms the polymeric matrix, which is reinforced with dispersing mediums such as barium, silicon, quartz, and zirconia. Resin composites are widely used in dentistry as aesthetic enhancement materials due to their superior properties, sufficient strength, and relatively low cost compared to ceramics. They also have excellent bonding ability with tooth structures (Hosseinalipour, Javadpour, Rezaie, Dadras, & Hayati, 2010). These thermosets are especially suitable for load-bearing dental implants when mixed with E-glass fibers. Bis-GMA, with its 3D polymerized structure, forms natural tight physical bonds. Additionally, an extra silane treatment on the filling surface leads to chemical bonding with the filling and base resin. Bis-GMA resin is a less volatile liquid that easily penetrates through 3D printed samples and turns into a solid after polymerization, making it a suitable candidate for use as a matrix in composites used in resin-impregnated and dental implants (Suwanprateeb, San-ngam, & Suwanpreuk, 2008).

PEKK (Polyetherketoneketone) is an important rising polymer material that can be widely used in dental implants due to its mechanical and biological properties. PEKK (a non-methylated thermoplastic) was first introduced as a high-performance polymer material by Bonner in 1962 (Huang, Qian, Wang, & Cai, 2014). Both PEKK and PEEK belong to the main PAEK (polyarylether-ketone) family. This main polymer can be represented as a linear aromatic polyether ketone containing ultra-high molecular weight polyethylene. Both PEKK and PEEK's chemical structures contain aromatic rings, with the only difference being the ratio of ether-ketone groups. PEKK, with its higher polarity and skeletal rigidity, contains a second ketone group, leading to a higher glass transition temperature and melting point (Yuan et al., 2018). Furthermore, in terms of behavior, PEKK has both crystalline and amorphous characteristics, which allows for the production of different products. Comparisons of physical properties, such as melting points, show that PEKK, with 56% linear segments, has a melting point of 305°C, whereas PEEK, with 88% linear segments, has a melting point of 360°C (Alqurashi et al., 2021). Studies have also

shown that PEKK offers similar pressure resistance and elastic modulus to dentin, which may reduce stress shielding effects in dental implants (Yuan et al., 2018).

4. Fibers in FRCs

A fiber is typically defined as an elongated, homogeneous material with a diameter or thickness usually smaller than 250 μm , possessing a more co-axial and homogeneous cross-sectional diameter or thickness. Although the aspect ratio (length-to-diameter or length-to-thickness ratio) is generally greater than 100, in certain cases such as chopped fibers, whiskers, or staple fibers, this ratio may be less than 100 (Sakai, 2001). The orientation, content, distribution, and ability to maintain these parameters are crucial factors for reinforcement and, thus, clinical success. The type, length, orientation, and volume fraction of fibers influence the tensile-compressive strength, modulus, fatigue resistance, density, electrical and thermal properties, and cost of fiber-reinforced composites (FRCs) (Soares, Soares, & Freitas, 2013; Zhang & Matinlinna, 2012).

In FRCs, different fibers enhance the structural integrity of restorative resins by providing additional reinforcement and improving mechanical properties. The addition of fibers to the resin matrix increases durability, fracture resistance, and toughness. Various fiber types, such as glass fibers, carbon fibers, and aramid fibers, offer unique advantages in enhancing the structural integrity of FRCs.

4.1. Glass Fiber

Glass fibers are widely used in dental applications such as reinforcing denture bases, repairing broken dentures, creating fixed partial dentures, endodontic posts, restorative materials, orthodontic retainers, and periodontal splints (Lastumäki, Lassila, & Vallittu, 2003). Glass fibers in denture bases increase mechanical strength, provide flexural modulus, impact resistance, and longevity (Dyer, Lassila, Jokinen, & Vallittu, 2004). In endodontic posts, they

enhance light transmission and strengthen the cement-dentin bond, while in restorative applications, they reduce polymerization shrinkage stresses and prevent marginal leakage. Furthermore, glass fibers offer durability, aesthetics, and ease of application in orthodontic retainers and periodontal splints. These features make glass fibers a durable, aesthetic, and versatile dental material (Safwat, Khater, Abd-Elsatar, & Khater, 2021).

4.2. Carbon Fibers

Carbon fibers are suitable for applications where superior mechanical properties, such as high tensile strength and stiffness, are required (Mount, 2007). When used in dental FRCs, carbon fibers significantly improve the composite's tensile strength and fracture toughness (Lastumäki et al., 2003). They are particularly prevalent in dental implants. The high elastic modulus of carbon fibers contributes to reducing bending deformation in the composite under load.

4.3. Polyethylene Fibers

Polyethylene fibers impart high flexibility and toughness to composites (Aftab Ahmed Khan et al., 2023). Adding polyethylene fibers increases the impact resistance of FRCs and reduces the risk of brittle failure. These fibers also facilitate excellent stress transfer between the resin matrix and fibers, enhancing load-bearing capacity (Dyer et al., 2004). PMMA fibers provide good compatibility with resin matrices and improve toughness and resistance to crack propagation (Sebold, André, Sahadi, Breschi, & Giannini, 2021). The addition of PMMA fibers increases the composite's bending strength and prevents early failures under mechanical loading (Alla et al., 2023). Combining different fibers in FRCs results in a synergistic effect, improving the overall structural integrity by contributing the unique mechanical properties of each fiber type. This helps overcome the limitations of traditional dental resins and provides durable, reliable materials for various restorative applications (Alla et al., 2023).

4.4. Aramid Fibers

Aramid fibers, such as Kevlar, exhibit exceptional toughness and impact resistance (Fennis et al., 2002). When incorporated into restorative resins, aramid fibers enhance resistance to crack propagation and prevent sudden failures (Kumbuloglu, ÖZCAN, & User, 2008). The unique combination of durability and toughness in aramid fibers helps with energy absorption and distribution under functional loading, thereby increasing the durability and reliability of FRCs.

5. Conclusion

The impact of fiber-reinforced composites (FRCs) on dental applications has revolutionized modern dentistry by providing innovative solutions that meet the demands of the field. Considering the complexity of the human body and the challenges of biomaterial needs, FRCs offer significant advantages in both biocompatibility and mechanical durability. FRC materials have become indispensable for restorative and prosthetic applications due to their minimal invasiveness, aesthetic solutions, and high load-bearing capacities. However, the complex structures and manufacturing challenges of FRCs, particularly due to limitations in dental laboratories, restrict their broader clinical use. The application of FRCs in im-plant-supported prostheses, porcelain veneer repairs, and cranial implants demonstrates the versatility and effectiveness of these materials. Nonetheless, issues such as the lack of technical knowledge and inadequate production infrastructure remain critical concerns in the clinical adaptation process. In conclusion, FRC materials continue to offer significant opportunities for both researchers and clinicians in dentistry. In the future, further optimization of material properties and the resolution of technical challenges in manufacturing processes will allow for more widespread adoption of FRCs. These materials will continue to be a

turning point in dentistry with solutions that improve both patient comfort and clinical outcomes.

References

Aldabib, J. (2020). Reinforcement of poly (methyl methacrylate) denture base material. *Dental and Medical Journal-Review*, 2(2), 46-53.

Alla, R. K. (2013). *Restorative Materials: Composite Resins*,(In) *Dental Materials Science*. Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, New Delhi, India, 130-148.

Alla, R. K., Sanka, G. S. S. J. L., Saridena, D. S. N. G., Av, R., Makv, R., & Mantena, S. R. (2023). Fiber-Reinforced Composites in Dentistry: Enhancing structural integrity and aesthetic appeal. *International Journal of Dental Materials*, 5(03), 78-85.

Alqurashi, H., Khurshid, Z., Syed, A. U. Y., Habib, S. R., Rokaya, D., & Zafar, M. S. (2021). Polyetherketoneketone (PEKK): An emerging biomaterial for oral implants and dental prostheses. *Journal of Advanced Research*, 28, 87-95.

Ballo, A., Lassila, L., Narhi, T., & Vallittu, P. K. (2008). In vitro mechanical testing of glass fiber-reinforced composite used as dental implants. *J Contemp Dent Pract*, 9(2), 41-48.

Ballo, A. M., Kokkari, A. K., Meretoja, V. V., Lassila, L. L., Vallittu, P. K., & Narhi, T. O. (2008). Osteoblast proliferation and maturation on bioactive fiber-reinforced composite surface. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19, 3169-3177.

Ballo, A. M., Lassila, L. V., Vallittu, P. K., & Närhi, T. O. (2007). Load bearing capacity of bone anchored fiber-reinforced composite device. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 18, 2025-2031.

Bergamo, E. T., Yamaguchi, S., Lopes, A. C., Coelho, P. G., de Araújo-Júnior, E. N., Jalkh, E. B. B., . . . Bonfante, E. A. (2021). Performance of crowns cemented on a fiber-reinforced composite framework 5-unit implant-supported prostheses: in silico and fatigue analyses. *Dental Materials*, 37(12), 1783-1793.

Bhatia, S. (2016). *Natural polymer drug delivery systems*: Springer.

Bonfante, E. A., Suzuki, M., Carvalho, R. M., Hirata, R., Lubelski, W., Bonfante, G., . . . Coelho, P. G. (2015). Digitally produced fiber-reinforced composite substructures for three-unit implant-supported fixed dental prostheses. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 30(2).

Buranapanitkit, B., Srinilta, V., Ingvinga, N., Oungbho, K., Geater, A., & Ovatlarnporn, C. (2004). The efficacy of a hydroxyapatite composite as a biodegradable antibiotic delivery system. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)*, 424, 244-252.

Castro-Aguirre, E., Iniguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., & Auras, R. (2016). Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 333-366.

Chan, Y.-H., Lew, W.-Z., Lu, E., Loretz, T., Lu, L., Lin, C.-T., & Feng, S.-W. (2018). An evaluation of the biocompatibility and

osseointegration of novel glass fiber reinforced composite implants: In vitro and in vivo studies. *Dental Materials*, 34(3), 470-485.

Chandra, S. (2020). Natural and synthetic polymers. In *Polymers in concrete* (pp. 5-25): CRC Press.

DeBoer, J., Vermilyea, S., & Brady, R. (1984). The effect of carbon fiber orientation on the fatigue resistance and bending properties of two denture resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 51(1), 119-121.

Di Martino, A., Sittinger, M., & Risbud, M. V. (2005). Chitosan: a versatile biopolymer for orthopaedic tissue-engineering. *Biomaterials*, 26(30), 5983-5990.

Dyer, S. R., Lassila, L. V., Jokinen, M., & Vallittu, P. K. (2004). Effect of fiber position and orientation on fracture load of fiber-reinforced composite. *Dental Materials*, 20(10), 947-955.

Fennis, W. M., Kuijs, R. H., Kreulen, C. M., Roeters, F. J. M., Creugers, N. H., & Burgersdijk, R. C. (2002). A survey of cusp fractures in a population of general dental practices. *International Journal of Prosthodontics*, 15(6).

Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural fiber reinforced composites. *Polymer reviews*, 52(3), 259-320.

Ge, Z., Baguenard, S., Lim, L. Y., Wee, A., & Khor, E. (2004). Hydroxyapatite-chitin materials as potential tissue engineered bone substitutes. *Biomaterials*, 25(6), 1049-1058.

Gibreel, M., Lassila, L. V., Närhi, T. O., Perea-Lowery, L., & Vallittu, P. K. (2018). Load-bearing capacity of simulated

Locator-retained overdenture system. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 120(4), 558-564.

Gibreel, M., Lassila, L. V., Närhi, T. O., Perea-Lowery, L., & Vallittu, P. K. (2019). Fatigue resistance of a simulated single LOCATOR overdenture system. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 122(6), 557-563.

Grave, A., Chandler, H., & Wolfaardt, J. (1985). Denture base acrylic reinforced with high modulus fibre. *Dental Materials*, 1(5), 185-187.

Harsha, G., Anoosha, M., Pradeep, K., Padmapriya, C., Ravi Varma, U. S. R., & Usha Sree, R. (2020). Fiber reinforced composite and surface coated esthetic archwires: a review. *Int J Dent Mater*, 1(3), 85-88.

Hodosh, M., Povar, M., & Shklar, G. (1969). The dental polymer implant concept. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 22(3), 371-380.

Hodosh, M., Povar, M., & Shklar, G. (1973). Development of the self-supporting polymer tooth implant. *Journal of Biomedical Materials Research*, 7(3), 205-216.

Hosseinalipour, M., Javadpour, J., Rezaie, H., Dadras, T., & Hayati, A. N. (2010). Investigation of mechanical properties of experimental Bis-GMA/TEGDMA dental composite resins containing various mass fractions of silica nanoparticles. *Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry*, 19(2), 112-117.

Huang, B., Qian, J., Wang, G., & Cai, M. (2014). Synthesis and properties of novel copolymers of poly (ether ketone diphenyl

ketone ether ketone ketone) and poly (ether amide ether amide ether ketone ketone). *Polymer Engineering & Science*, 54(8), 1757-1764.

Jockusch, J., & Özcan, M. (2020). Additive manufacturing of dental polymers: An overview on processes, materials and applications. *Dental materials journal*, 39(3), 345-354.

Kadambi, P., Luniya, P., & Dhatrak, P. (2021). Current advancements in polymer/polymer matrix composites for dental implants: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 740-745.

Khan, A. A., AlKhureif, A. A., Mohamed, B. A., & Bautista, L. S. (2020). Enhanced mechanical properties are possible with urethane dimethacrylate-based experimental restorative dental composite. *Materials Research Express*, 7(10), 105307.

Khan, A. A., Fareed, M. A., Alshehri, A. H., Aldegheishem, A., Alharthi, R., Saadaldin, S. A., & Zafar, M. S. (2022). Mechanical properties of the modified denture base materials and polymerization methods: A systematic review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5737.

Khan, A. A., Mohamed, B. A., Al-Shamrani, S. S., Ramakrishnaiah, R., Perea-Lowery, L., Säilynoja, E., & Vallittu, P. K. (2019). Influence of monomer systems on the bond strength between resin composites and polymerized fiber-reinforced composite upon aging. *J. Adhes. Dent*, 21, 509-516.

Khan, A. A., Zafar, M. S., Ali A Ghubayri, A., AlMufareh, N. A., Binobaid, A., Eskandrani, R. M., & Al-Kheraif, A. A. (2022). Polymerisation of restorative dental composites: influence on

physical, mechanical and chemical properties at various setting depths. *Materials Technology*, 37(12), 2056-2062.

Khan, A. A., Zafar, M. S., Fareed, M. A., AlMufareh, N. A., Alshehri, F., AlSunbul, H., . . . Vallittu, P. K. (2023). Fiber-reinforced composites in dentistry—An insight into adhesion aspects of the material and the restored tooth construct. *Dental Materials*, 39(2), 141-151.

Kim, S. B., Kim, Y. J., Yoon, T. L., Park, S. A., Cho, I. H., Kim, E. J., . . . Shin, J.-W. (2004). The characteristics of a hydroxyapatite–chitosan–PMMA bone cement. *Biomaterials*, 25(26), 5715-5723.

Krishnakumar, S., & Senthilvelan, T. (2021). Polymer composites in dentistry and orthopedic applications-a review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9707-9713.

Kumbuloglu, O., ÖZCAN, M., & User, A. (2008). Fracture strength of direct surface-retained fixed partial dentures: effect of fiber reinforcement versus the use of particulate filler composites only. *Dental materials journal*, 27(2), 195-202.

Ladizesky, N. (1990). The integration of dental resins with highly drawn polyethylene fibres. *Clinical Materials*, 6(2), 181-192.

Ladizesky, N., Chow, T., & Ward, I. (1990). The effect of highly drawn polyethylene fibres on the mechanical properties of denture base resins. *Clinical Materials*, 6(3), 209-225.

Ladizesky, N., Ho, C., & Chow, T. (1992). Reinforcement of complete denture bases with continuous high performance polyethylene fibers. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 68(6), 934-939.

Lassila, L. V., Tanner, J., Le Bell, A.-M., Narva, K., & Vallittu, P. K. (2004). Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dental Materials*, 20(1), 29-36.

Lastumäki, T., Lassila, L., & Vallittu, P. (2003). The semi-interpenetrating polymer network matrix of fiber-reinforced composite and its effect on the surface adhesive properties. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 14(9), 803-809.

Malekani, J., Schmutz, B., Gu, Y., Schuetz, M., & Yarlagadda, P. (2011). Biomaterials in orthopedic bone plates: a review. Paper presented at the Proceedings of the Annual International Conference on Materials Science, Metal and Manufacturing.

Mangoush, E., Lassila, L., Vallittu, P., & Garoushi, S. (2021). Microstructure and Surface Characteristics of Short-Fiber Reinforced CAD/CAM Composite Blocks. *The European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, 29(3).

Mangoush, E., Lassila, L., Vallittu, P. K., & Garoushi, S. (2021). Shear-bond strength and optical properties of short fiber-reinforced CAD/CAM composite blocks. *European journal of oral sciences*, 129(5), e12815.

Mount, G. (2007). A new paradigm for operative dentistry. *Australian dental journal*, 52(4), 264-270.

Najeeb, S., Khurshid, Z., Matinlinna, J. P., Siddiqui, F., Nassani, M. Z., & Baroudi, K. (2015). Nanomodified peek dental implants: Bioactive composites and surface modification—A review. *International journal of dentistry*, 2015(1), 381759.

Narva, K. K., Lassila, L. V., & Vallittu, P. K. (2005). The static strength and modulus of fiber reinforced denture base polymer. *Dental Materials*, 21(5), 421-428.

Narva, K. K., Vallittu, P. K., Helenius, H., & Yli-Urpo, A. (2001). Clinical survey of acrylic resin removable denture repairs with glass-fiber reinforcement. *International Journal of Prosthodontics*, 14(3).

Navyasri, K., Alla, R. K., Vineeth, G., & Suresh Sajjan, M. (2019). An overview of dentin bonding agents. *Int J Dent Mater*, 1(2), 60-67.

Özcan, M., Van Der Sleen, J. M., Kurunmäki, H., & Vallittu, P. K. (2006). Comparison of repair methods for ceramic-fused-to-metal crowns. *Journal of Prosthodontics*, 15(5), 283-288.

Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., & Leong, K. W. (2001). Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. *Composites science and technology*, 61(9), 1189-1224.

Ravi, R. K., Alla, R. K., Shamma, M., & Devarhubli, A. (2013). Dental Composites-A Versatile Restorative Material: An Overview. *Indian Journal of Dental Sciences*, 5(5).

Rebelo, R., Fernandes, M., & Figueiro, R. (2017). Biopolymers in medical implants: a brief review. *Procedia engineering*, 200, 236-243.

Rendenbach, C., Steffen, C., Sellenschloh, K., Heyland, M., Morlock, M. M., Toivonen, J., . . . Vallittu, P. K. (2019). Patient specific glass fiber reinforced composite versus titanium plate: A comparative biomechanical analysis under cyclic dynamic loading.

Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 91, 212-219.

Safwat, E. M., Khater, A. G., Abd-Elsatar, A. G., & Khater, G. A. (2021). Glass fiber-reinforced composites in dentistry. *Bulletin of the National Research Centre*, 45, 1-9.

Sakai, T. (2001). *Encyclopedia of materials. Science and Technology*, 7079-7084.

Schreiber, C. (1974). The clinical application of carbon fibre/polymer denture bases. *British Dental Journal*, 137(1), 21-22.

Sebold, M., André, C. B., Sahadi, B. O., Breschi, L., & Giannini, M. (2021). Chronological history and current advancements of dental adhesive systems development: a narrative review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(18), 1941-1967.

Simionescu, B. C., & Ivanov, D. (2016). Natural and synthetic polymers for designing composite materials. In *Handbook of bioceramics and biocomposites* (pp. 233-286): Springer.

Smith, D. (1962). Recent developments and prospects in dental polymers. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 12(6), 1066-1078.

Soares, C. A. M., Soares, C. M. M., & Freitas, M. J. (2013). *Mechanics of composite materials and structures* (Vol. 361): Springer Science & Business Media.

Song, J., Winkeljann, B., & Lieleg, O. (2020). Biopolymer-based coatings: promising strategies to improve the biocompatibility

and functionality of materials used in biomedical engineering. *Advanced Materials Interfaces*, 7(17), 2000850.

Suwanprateeb, J., Sanngam, R., & Suwanpreuk, W. (2008). Fabrication of bioactive hydroxyapatite/bis-GMA based composite via three dimensional printing. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19, 2637-2645.

Suzaki, N., Yamaguchi, S., Nambu, E., Tanaka, R., Imazato, S., & Hayashi, M. (2021). Fabricated CAD/CAM post-core using glass fiber-reinforced resin shows innovative potential in restoring pulpless teeth. *Materials*, 14(20), 6199.

Tripathi, D., & Jones, F. R. (1998). Single fibre fragmentation test for assessing adhesion in fibre reinforced composites. *Journal of materials science*, 33, 1-16.

Tsujimoto, A., Barkmeier, W. W., Takamizawa, T., Latta, M. A., & Miyazaki, M. (2016). Bonding performance and interfacial characteristics of short fiber-reinforced resin composite in comparison with other composite restoratives. *European journal of oral sciences*, 124(3), 301-308.

Vallittu, P. (2002). Use of woven glass fibres to reinforce a composite veneer. A fracture resistance and acoustic emission study. *Journal of oral rehabilitation*, 29(5), 423-429.

Vallittu, P., & Lassila, V. (1992). Reinforcement of acrylic resin denture base material with metal or fibre strengtheners. *Journal of oral rehabilitation*, 19(3), 225-230.

Vallittu, P. K. (1997). Glass fiber reinforcement in repaired acrylic resin removable dentures: preliminary results of a clinical study. *Quintessence International*, 28(1).

Vallittu, P. K. (2017). Bioactive glass-containing cranial implants: an overview. *Journal of materials science*, 52(15), 8772-8784.

Vallittu, P. K. (2018). An overview of development and status of fiber-reinforced composites as dental and medical biomaterials. *Acta biomaterialia odontologica Scandinavica*, 4(1), 44-55.

Verma, M. L., Kumar, S., Jeslin, J., & Dubey, N. K. (2020). Microbial production of biopolymers with potential biotechnological applications. In *Biopolymer-based formulations* (pp. 105-137): Elsevier.

Yuan, B., Cheng, Q., Zhao, R., Zhu, X., Yang, X., Yang, X., . . . Zhang, X. (2018). Comparison of osteointegration property between PEKK and PEEK: Effects of surface structure and chemistry. *Biomaterials*, 170, 116-126.

Zhang, M., & Matinlinna, J. P. (2012). E-glass fiber reinforced composites in dental applications. *Silicon*, 4, 73-78.

Zhou, H., Goel, V. K., & Bhaduri, S. B. (2014). A fast route to modify biopolymer surface: a study on polyetheretherketone (PEEK). *Materials Letters*, 125, 96-98.

CHAPTER II

Harnessing Nanomaterials in Wearable Technologies: From Smart Fabrics To Health Monitoring Systems

Hasan ULUS¹

Halil Burak KAYBAL²

1. Introduction

Wearable technologies have undergone significant advancements over recent decades, fundamentally reshaping how individuals engage with digital systems and seamlessly integrating technology into daily routines. Initially emerging as simple devices like digital watches and fitness trackers, wearable technologies have evolved into advanced systems capable of monitoring health, enhancing productivity, and facilitating real-time data interaction. These developments highlight the transformative potential of wearable devices in modern society. The rapid evolution of this field is primarily driven by advancements in miniaturized sensors, wireless communication technologies, and material science. Today, wearable devices play critical roles in diverse sectors, including healthcare, where they enable remote monitoring and diagnostics;

¹ Selcuk University, Huglu Vocational School, Konya/Türkiye
(hasanulus@selcuk.edu.tr)

² Amasya University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering,
Amasya/Türkiye (hburak@amasya.edu.tr)

fitness, where they track physical activities; and other industries like entertainment, defense, and smart clothing. This transformation reflects the growing societal demand for personalized, on-the-go solutions that combine functionality with user comfort. Moreover, wearable technologies have become increasingly embedded in our fast-paced digital landscape, driven by their ability to continuously collect and analyze data. These devices are essential for monitoring health and performance metrics, benefiting from breakthroughs in microelectronic miniaturization and nanomaterial development. By reducing sensor sizes and enhancing flexibility, wearable devices are now seamlessly integrated with the human body for prolonged use. The biocompatibility of nanomaterials further ensures comfort and precise biometric data collection, adapting to users' movements with ease. Nanomaterials, especially carbon-based ones, have been instrumental in improving wearable technology performance. They contribute exceptional electrical conductivity, mechanical and chemical durability, making sensors more reliable and efficient. These advancements underscore the pivotal role of materials science in shaping the future of wearable technologies. These properties render them highly suitable for incorporation into flexible, biocompatible sensors utilized in wearable devices, facilitating effective and sustained data collection for health monitoring systems (Yao et al., 2018). The distinct characteristics of nanomaterials also support the development of miniaturized, flexible electronics, which are crucial for the seamless operation of wearable devices. Materials such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene (GNP), are frequently utilized in wearable technologies because of their outstanding mechanical, electrical, and thermal characteristics. These materials allow for the creation of more sensitive, flexible, and user-friendly devices. For instance, CNTs and GNPs offer excellent conductivity and flexibility, making them ideal for wearable sensors that must conform to the body's movements. The integration of nanomaterials into wearable technologies not only enhances the accuracy and efficiency of data tracking, particularly in health monitoring and sports applications, but also improves overall quality of life by enabling continuous, real-time data collection and analysis.

These advancements provide more reliable health metrics, including heart rate, glucose levels, and body temperature, thereby contributing to personalized healthcare and performance optimization (Kazanskiy et al., 2024; Luo et al., 2024).

2. Nanomaterials Contribution to Wearable Technologies

Nanomaterials exhibit unique quantum effects at this scale, where classical physical laws give way to quantum mechanical principles. The tiny dimensions of nanomaterials result in a notable enhancement in surface area, which directly influences their reactivity, mechanical strength, and electrical and thermal conductivity (Asha & Narain, 2020). These characteristics render nanomaterials especially suitable for use in wearable technologies.

One of the key advantages offered by nanomaterials is their enhanced chemical reactivity, driven by their high surface area relative to bulk materials. This enhanced surface area improves the performance of wearable devices by optimizing processes like data collection in biosensors, allowing for greater precision and sensitivity in detecting biological signals (Raza et al., 2021; Wujcik & Lu, 2018). For instance, nanomaterial-based biosensors can detect biomarkers such as glucose, lactate, or cortisol at ultra-low concentrations, which is critical for applications in non-invasive medical diagnostics.

Additionally, nanomaterials, including GNP and CNT, are extremely thin and lightweight while exhibiting high elastic moduli. This adaptability is an essential characteristic for wearable technologies, as these devices need to fit the changing contours of the human body. By integrating flexible, lightweight materials, wearable devices can offer maximum user comfort while maintaining durability and functionality. Moreover, the ability of nanomaterials to withstand repeated mechanical deformation ensures their long-term usability, even under strenuous conditions, such as athletic or industrial settings.

For example, carbon-based nanomaterials combined with elastomeric polymers enable the creation of sensors that adhere to the skin, allowing them to adapt seamlessly to movement. Such innovations are revolutionizing health monitoring and athletic performance tracking (Palumbo et al., 2022). Nanomaterials also excel in terms of electrical conductivity, a crucial factor for wearable electronics. Materials like graphene and silver nanowires provide excellent conductivity, enhancing the performance of sensors and ensuring reliable, long-lasting data transmission. This characteristic not only ensures the reliable functioning of wearable devices but also aids in protecting against electromagnetic interference, which is crucial for preserving signal integrity in intricate environments (Nguyen et al., 2024; Yan et al., 2024). In addition, their superior thermal management properties help dissipate heat generated by electronic components, which is essential for maintaining user comfort and device efficiency during prolonged use.

Finally, the integration of nanomaterials enables multifunctional capabilities in wearable devices. For instance, nanostructured coatings can render fabrics water-repellent while maintaining breathability or incorporate antimicrobial properties to ensure hygiene in wearable systems. These attributes work together to create more responsive, accurate, and efficient wearable systems, improving the quality of real-time health data acquisition and other essential applications.

3. Use of Nanomaterials in Smart Fabrics

Nanomaterials offer significant advantages in textile technologies by imparting new functional properties to fabrics. These materials can be coated onto fabric surfaces or integrated directly into the textile structure, enhancing performance in various ways. This provides the development of enhanced wearable technologies that provide practical solutions for everyday use (Kiran et al., 2022). Key features that nanomaterials bring to fabrics include:

Nanomaterials have revolutionized water-repellent fabrics by creating hydrophobic surfaces. Through specialized coatings, they prevent water from adhering to fabric surfaces, allowing droplets to roll off and keep the fabric dry (Mehrizi & Shahi, 2021; Sfameni et al., 2022). This is particularly beneficial for outdoor apparel, where comfort in wet environments is crucial. Drawing inspiration from the water-repellent characteristics of lotus leaves, textiles enhanced with nanomaterials provide superior durability and performance (Ge et al., 2023). For example, (González et al.) developed a waterproofing technique for military uniforms by treating fabrics with a combination of silicon dioxide nanoparticles (SiO_2) and other chemical compounds. The treated camouflage denim fabric showed significant water-repellent improvement after laboratory testing. Joung & Buie, 2015 created durable anti-wetting polyester fabrics using electrophoretic deposition (EPD). They enhanced adhesion and prevented cracking by first applying polymer layers, followed by a uniform dispersion of nano-silica particles, which retained flexibility and air permeability. Chirila et al., 2020 developed hydrophobic and oleophobic textile materials with hybrid coatings using ZnO and SiO_2 nanoparticles, applied to 100% cotton fabrics. The textiles exhibited reduced wetting and increased water and oil repulsion without altering the fibers' surface morphology. In addition, Chirila et al., 2020 introduced multifunctional cotton fabrics with UV protection, self-cleaning properties, water repellency, and antibacterial characteristics, using TiO_2 nanoparticles and cross-linking techniques.

Nanomaterials also provide antibacterial properties to fabrics, crucial for hygiene in sectors like healthcare and sportswear. Silver nanoparticles, known for their antibacterial effects, can prevent bacterial growth and eliminate unpleasant odors in fabrics, benefiting athletic wear (Vrinceanu et al., 2022). Salat et al., 2018 developed an antibacterial coating for cotton medical textiles by incorporating nano-ZnO particles and gallic acid, achieving long-lasting antibacterial properties after 60 wash cycles at 75°C . Petkova et al., 2014 used sonochemical deposition to create ZnO

and chitosan hybrid antimicrobial coatings on cotton, significantly enhancing the fabric's antibacterial efficacy and durability after multiple washings. Abdul-Reda Hussein et al., 2023 investigated the use of copper and silver nanoparticles for antimicrobial modifications, offering safer, non-toxic alternatives to traditional chemicals. Kowal et al., 2014 explored the use of titanium dioxide nanoparticles to create antimicrobial textiles with the potential to reduce hospital-acquired infections. After washing the treated fabrics for 30 cycles at various temperatures, they demonstrated strong antibacterial performance and minimal environmental impact, making them ideal for healthcare settings.

Flexibility is another essential feature of smart textiles. Nanomaterials such as CNTs impart elasticity and durability, allowing fabrics to accommodate movement without compromising strength (Zhang et al., 2023). When combined with elastomeric polymers, these materials enhance the flexibility of smart textiles, ensuring comfort during daily activities. (Doshi et al., 2019) developed stretch sensors by coating nylon-polyester-spandex fabrics with CNTs. These sensors, incorporated into knee sleeves, demonstrated significant resistance changes during movement, suitable for human motion analysis. Di et al., 2016 reviewed CNT fibers in wearable devices, noting their high strength and flexibility, making them promising for advanced smart textiles.

In addition to structural benefits, nanomaterials contribute to energy generation within fabrics. Piezoelectric nanomaterials have the ability to convert mechanical energy into electrical energy, enabling the development of smart fabrics that generate power from movement. These textiles harness energy from walking or running to power small electronic devices (Shah et al., 2022; Sowbhagyam, 2024). The use of nanomaterials with piezoelectric and triboelectric properties allows smart textiles to harness movement energy for practical applications. Ponnamma et al., 2019 designed a piezoelectric nanogenerator using PVDF-HFP nanofibers with cellulose nanocrystals and Fe-doped ZnO, which generated significant energy during human movement, such as finger tapping

and elbow flexion. Wu et al., 2021 created piezoelectric films using cellulose nanofibrils and molybdenum disulfide nanosheets, achieving high mechanical properties and piezoelectric performance suitable for energy harvesting. Shim et al., 2022 explored boron nitride nanotubes (BNNTs) combined with ZnO quantum dots to enhance piezoelectric performance in composite materials. Their nanogenerator exhibited substantial improvements in piezoelectricity, highlighting the potential for wearable energy-harvesting technologies.

4. Sensor Technology in Wearable Health Devices

Nanomaterials greatly enhance the performance and sensitivity of sensors in wearable health devices, serving as key enablers of real-time health monitoring. These devices, which collect data directly from the human body, are gaining popularity for their precision and ease of use. Nanomaterials offer key advantages like flexibility, lightweight properties, and high sensitivity, making wearable health devices more comfortable for prolonged use (Miozzi et al., 2018).

Body temperature monitoring is one area where nanomaterials excel. Precise body temperature measurement is essential for remote tracking health conditions, and nanomaterial-based sensors provide rapid and accurate detection. Graphene-based sensors, known for their high thermal conductivity, are especially effective, enabling fast response times for monitoring fluctuations in body temperature (Nag et al., 2022). This is crucial for early warnings of health irregularities.

In blood glucose monitoring, particularly for diabetic patients, traditional methods can be invasive and uncomfortable. Nanomaterial-based sensors, however, allow for non-invasive continuous monitoring. For example, sensors incorporating gold nanoparticles have significantly enhanced the accuracy of glucose measurement in wearable devices (Zhang et al., 2020). CNTs and other nanomaterials are being employed to create biosensors capable

of monitoring glucose levels through sweat, providing a less invasive alternative to traditional blood tests (Taguchi et al., 2014).

Heart rate monitoring has also benefitted from nanomaterial advancements (Shen et al., 2021). Nanomaterials such as CNTs and GNPs, known for their high electrical conductivity, are utilized in wearable devices to assess heart rate and rhythm (Huang et al., 2019). These materials enhance the ability of sensors to detect electrical signals from the body, providing more accurate and continuous monitoring of cardiac activity. This is especially beneficial for individuals with heart conditions requiring real-time monitoring.

Nanomaterials are also used in wearable devices to monitor various biological indicators in body fluids such as sweat (Erdem et al., 2022). For instance, CNT-based electrochemical biosensors can measure pH levels, glucose, and lactate in real time (Besteman et al., 2003). These sensors provide valuable feedback for athletes, tracking electrolyte losses during exercise, and for diabetic patients, enabling glucose monitoring through non-invasive means. The flexibility of nanomaterials further enhances the comfort of these devices, making them appropriate for extended wear without discomfort.

5. Nanomaterial-Based Energy Storage Units for Wearable Devices

Nanomaterials are essential for the energy storage systems in wearable devices, which require compact, efficient, and long-lasting power solutions to maintain functionality (Pomerantseva et al., 2019). Recent developments in nanotechnology have enabled the creation of more advanced energy storage systems, including batteries and supercapacitors, that utilize nanomaterial properties to improve performance. Incorporating nanomaterials into lithium-ion batteries has gained significant importance, with materials like graphene and silicon nanoparticles greatly enhancing energy density and improving the charge-discharge cycle (Liu et al., 2006). These

innovations allow for faster charging times and extended battery lifespans, a crucial aspect for wearable devices that require continuous operation with minimal downtime. Graphene's high conductivity and large surface area, for example, allow for the development of more efficient electrodes, resulting in enhanced overall battery performance.

In addition to batteries, supercapacitors represent a promising alternative for energy storage in wearable devices. Unlike traditional batteries, supercapacitors can store and release energy at much faster rates, thanks to the unique characteristics of nanostructures like CNTs and metal oxide nanoparticles (Liu et al., 2014). These materials enable supercapacitors to attain higher energy density, which is crucial for applications demanding rapid energy bursts. Moreover, the flexibility and lightweight properties of nanomaterials make them especially well-suited for incorporation into the compact, portable designs typical of wearable technology. Nanomaterial-based supercapacitors not only enhance energy storage capabilities but also contribute to the overall comfort and usability of wearable devices by reducing weight and increasing durability.

Sevilla et al., 2016 addressed the mechanical limitations of free-standing graphene films in flexible energy storage applications by developing robust graphene-cellulose composites. These composites integrate graphene layers onto porous cellulose tissue, forming interconnected 3D architectures that enhance mechanical strength and ion transport efficiency. The unique structure facilitates high ionic mobility, making the materials suitable for flexible supercapacitors. The study highlights the potential of combining nanomaterials with flexible substrates to achieve both mechanical robustness and efficient energy storage, paving the way for advancements in portable and wearable electronic devices. Kim et al., 2022 addressed the challenges of powering smart wearable devices by exploring nanomaterial-based energy harvesting and storage systems. They highlighted technologies such as biomechanical, solar, and thermoelectric energy harvesters, as well

as batteries, supercapacitors, and hybrid devices, focusing on advanced 1D, 2D, and 3D structures. Their findings emphasize the importance of engineered nanomaterials and optimized device configurations for reliable, lightweight, and flexible power systems in applications like health monitoring and personal electronics. While progress has been made, challenges remain in achieving high performance, scalability, and compatibility, underscoring the need for further research on nanoscale interfaces and integration strategies to enable sustainable wearable technologies. He et al., 2021 developed novel dandelion-like hollow microspheres of gamma-MnO₂ mesocrystals through a one-pot biomineralization process. They found that even a low concentration of collagen could transform the nanostructure of gamma-MnO₂ from nanorods to microspheres. The resulting gamma-MnO₂ microspheres, composed of nanoneedle-like units, demonstrated exceptional electrochemical performance, maintaining high discharge capacities over 100+ cycles. This unique hierarchical structure contributed to their superior electrochemical behavior. This biomineralization approach presents an environmentally friendly method for producing advanced nanostructured metal oxides with potential applications in wearable and implantable healthcare devices. Su et al., 2024 developed a flexible silicon-based anode material for batteries, combining 1D silicon nanowire arrays with carbon nanomaterials (CNFs and CNTs) to enhance structural integrity and electrochemical performance. This approach resulted in a robust and flexible configuration with excellent electrochemical performance, maintaining 60% of its initial capacity after 1000 cycles. The anode also demonstrated minimal capacity loss (less than 1%) after 100 bending cycles, making it a promising candidate for flexible, high-loading energy-storage devices, particularly for wearable electronics. Tian et al., 2023 developed a fiber-based supercapacitor (FSC) using MnO₂ nanowires with a tunable crystalline structure to improve the electrochemical performance of wearable energy storage devices. The MnO₂ nanowires, synthesized via a one-step hydrothermal method, demonstrated excellent capacitance (43.8 F g⁻¹), high-rate performance, and strong cyclic

stability. The MnO₂ nanowires were then combined with reduced graphene oxide (rGO) to form hybrid fibers with up to 50 wt% MnO₂ content. These hybrid fibers exhibited improved strength (11.73 MPa) and superior electrochemical properties, including a high volumetric capacitance and energy density. When assembled into all-solid-state FSCs, these fibers demonstrated excellent flexibility, showing great potential for use in wearable energy storage applications.

The application of nanomaterials in these energy storage systems has revolutionized the field of wearable technology, leading to more efficient, longer-lasting, and user-friendly devices. As research into nanomaterial properties progresses, the potential for further advancements in energy storage is expected to increase, enhancing the capabilities and convenience of wearable technology in the future.

6. The Future of Wearable Technologies and Challenges

Wearable technologies are advancing rapidly with the integration of nanomaterials, enabling innovative applications in health monitoring, energy generation, and smart textiles. These advancements, while groundbreaking, face critical challenges, including manufacturing complexities, safety concerns, and ethical considerations. Wu et al., 2019 reviewed flexible batteries for wearable electronics, highlighting the transformative role of carbon nanomaterials such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene. These materials provide lightweight, flexible, and conductive frameworks that endure mechanical deformation while maintaining electrochemical performance. Advances in fabricating fiber-shaped, paper-like, and foam-structured carbon nanomaterials have significantly improved flexibility and surface area, facilitating efficient electron transport and active material adhesion. However, challenges such as scaling up production, enhancing electrical conductivity, and optimizing surface morphologies persist. Additional issues include structural degradation, electrolyte safety concerns, and limitations in packaging materials.

Solid electrolytes have emerged as a promising solution to address safety and energy density limitations. Wu et al. concluded that while flexible batteries show substantial potential for wearable devices, interdisciplinary research is essential to overcome technical barriers, paving the way for transformative applications in healthcare and daily convenience through wearable power systems. Jiang et al., 2020 investigated metal oxide nanomaterials for flexible electronics and energy storage. Although metal oxides exhibit high electrochemical energy storage potential, their low mechanical strength limits their use as freestanding electrodes. To address this, Jiang et al. developed two-dimensional metal oxide nanosheets, akin to graphene, offering low thickness and high flexibility. By optimizing chemical composition, size, and surface properties, they enhanced the mechanical strength and electrochemical performance of these nanosheets. Their methods for aligning and assembling these sheets into macroscopic forms represent a significant advancement in wearable energy storage devices.

Recent developments in two-dimensional metal oxide nanosheets have further addressed mechanical and electrochemical limitations. Doping with functional elements and creating hybrid materials have improved charge storage capacity and conductivity. Controlling the size of the nanosheets has balanced flexibility and structural stability, crucial for wearable devices that endure frequent mechanical stress. Moreover, optimizing surface structures has enhanced interaction with active materials and electrolytes, improving ion transport efficiency and reducing energy losses. Techniques like layer-by-layer assembly or magnetic alignment ensure uniform distribution of properties, enhancing the structural integrity of films, membranes, or composites. These aligned structures maximize active surface area, crucial for energy storage applications.

Innovations in assembling nanosheets into macroscopic forms, such as flexible films or hierarchical architectures, have expanded their usability. These structures combine flexibility with mechanical strength, making them suitable for wearable integration.

Interface engineering has been pivotal, addressing material compatibility and adhesion challenges. Modified surface chemistries ensure robust interactions between nanosheets and other components, preventing delamination and performance degradation under mechanical deformation. These advancements collectively overcome traditional mechanical limitations and significantly enhance the electrochemical performance of wearable energy storage devices. By ensuring long-term reliability, these innovations position two-dimensional nanosheets as foundational for the future of self-powered, multifunctional wearable technologies.

The future of wearable technologies depends on continuous advancements in functionality, performance, and user-friendliness. Research indicates that wearable devices will evolve into multifunctional, self-powered, and highly integrated systems. For instance, Kwak et al., 2019 demonstrated that triboelectric nanogenerators can harvest energy from users' movements, eliminating the need for conventional charging. Furthermore, health monitoring systems integrated with artificial intelligence and big data will play a vital role in personal health management (Secara & Hordiiuk, 2024).

Despite these advancements, integrating nanomaterials into wearable technologies poses significant manufacturing challenges. Large-scale production of nanomaterials remains complex and costly. For example, the commercial-scale production of graphene has yet to achieve cost-effective scalability (Dong et al., 2020). Streamlining supply chains and reducing production costs are crucial for broader adoption. Additionally, integrating nanomaterials into textiles presents technological limitations. Maintaining the stability of nanomaterials while ensuring the flexibility of textiles demands precision in manufacturing (Pereira et al., 2020; Yetisen et al., 2016).

The proliferation of nanotechnology-based wearables also raises safety and ethical concerns. These devices continuously collect and process personal health data, making data security a critical issue. Misuse of health data could compromise users'

privacy. Furthermore, the long-term health impacts of nanomaterials, including potential toxicity of materials such as silver nanoparticles and CNTs, remain unclear. Research suggests that prolonged exposure to these materials may pose biological risks, necessitating careful consideration (Li et al., 2012; Stern & McNeil, 2008). Ethically, wearable technologies enabling constant surveillance raise concerns. Collecting health data without informed consent violates privacy, underscoring the need for robust ethical guidelines (Lee, 2014; Norval & Henderson, 2017).

In summary, wearable technologies hold immense potential to revolutionize health care, energy generation, and daily convenience. However, addressing manufacturing, safety, and ethical challenges is imperative to realize their full potential. Continued interdisciplinary research and innovation will be essential to overcome these barriers and establish wearable technologies as a cornerstone of modern life.

References

Abdul-Reda Hussein, U., Mahmoud, Z., Alaziz, K. A., Alid, M., Yasin, Y., Ali, F., Faisal, A., Abd, A., & Kianfar, E. (2023). Antimicrobial finishing of textiles using nanomaterials. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e264947.

Asha, A. B., & Narain, R. (2020). Nanomaterials properties. In *Polymer science and nanotechnology* (pp. 343-359). Elsevier.

Besteman, K., Lee, J.-O., Wiertz, F. G., Heering, H. A., & Dekker, C. (2003). Enzyme-coated carbon nanotubes as single-molecule biosensors. *Nano letters*, 3(6), 727-730.

Chirila, L., Radulescu, D. E., Cinteza, L. O., Radulescu, D. M., Tanase, M., & Stanculescu, I. R. (2020). Hybrid materials based on ZnO and SiO₂ nanoparticles as hydrophobic coatings for textiles. *Industria Textila*, 71(4), 297-301.

Di, J., Zhang, X., Yong, Z., Zhang, Y., Li, D., Li, R., & Li, Q. (2016). Carbon-nanotube fibers for wearable devices and smart textiles. *Advanced Materials*, 28(47), 10529-10538.

Dong, Z., Li, B., Cui, C., Qian, W., Jin, Y., & Wei, F. (2020). Catalytic methane technology for carbon nanotubes and graphene. *Reaction Chemistry & Engineering*, 5(6), 991-1004.

Doshi, S. M., Murray, C., Chaudhari, A., & Thostenson, E. T. (2019). Carbon nanotube coated textile sensors with ultrahigh sensitivity for human motion detection. *2019 IEEE SENSORS*,

Erdem, Ö., Derin, E., Zeibi Shirejini, S., Sagdic, K., Yilmaz, E. G., Yildiz, S., Akceoglu, G. A., & Inci, F. (2022). Carbon-based

nanomaterials and sensing tools for wearable health monitoring devices. *Advanced Materials Technologies*, 7(3), 2100572.

Ge, H., Liu, Y., & Liu, F. (2023). Up to date review of nature-inspired superhydrophobic textiles: Fabrication and applications. *Materials*, 16(21), 7015.

González, A. M. R., Sánchez, M. P., & Castañeda, E. E. Application method of a coating technique to generate a water repellent effect on the fabric used for the manufacturing of the military clothing of the Colombian Army.

He, H., Fu, C., An, Y., Feng, J., & Xiao, J. (2021). Biofunctional hollow γ -MnO₂ microspheres by a one-pot collagen-templated biomineralization route and their applications in lithium batteries. *Rsc Advances*, 11(59), 37040-37048.

Huang, H., Su, S., Wu, N., Wan, H., Wan, S., Bi, H., & Sun, L. (2019). Graphene-based sensors for human health monitoring. *Frontiers in chemistry*, 7, 399.

Jiang, K., Xiong, P., Ji, J., Zhu, J., Ma, R., Sasaki, T., & Geng, F. (2020). Two-dimensional molecular sheets of transition metal oxides toward wearable energy storage. *Accounts of Chemical Research*, 53(10), 2443-2455.

Joung, Y. S., & Buie, C. R. (2015). Antiwetting fabric produced by a combination of layer-by-layer assembly and electrophoretic deposition of hydrophobic nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(36), 20100-20110.

Kazanskiy, N. L., Khonina, S. N., & Butt, M. A. (2024). A review on flexible wearables-Recent developments in non-invasive

continuous health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 114993.

Kim, H., Pyun, K. R., Lee, M. T., Lee, H. B., & Ko, S. H. (2022). Recent advances in sustainable wearable energy devices with nanoscale materials and macroscale structures. *Advanced Functional Materials*, 32(16), 2110535.

Kiran, S., Meda, U. S., Ranga, S., & Basavaraja, R. (2022). Advances in Incorporation of Nanomaterials Onto Fabrics. *ECS Transactions*, 107(1), 4853.

Kowal, K., Cronin, P., Dworniczek, E., Zeglinski, J., Tiernan, P., Wawrzynska, M., Podbielska, H., & Tofail, S. A. (2014). Biocidal effect and durability of nano-TiO₂ coated textiles to combat hospital acquired infections. *Rsc Advances*, 4(38), 19945-19952.

Kwak, S. S., Yoon, H. J., & Kim, S. W. (2019). Textile-based triboelectric nanogenerators for self-powered wearable electronics. *Advanced Functional Materials*, 29(2), 1804533.

Lee, L. M. (2014). Health Information in the Background: Justifying Public Health Surveillance Without Patient Consent. *Emerging Pervasive Information and Communication Technologies (PICT) Ethical Challenges, Opportunities and Safeguards*, 39-53.

Li, X., Wang, L., Fan, Y., Feng, Q., & Cui, F.-z. (2012). Biocompatibility and toxicity of nanoparticles and nanotubes. *Journal of Nanomaterials*, 2012(1), 548389.

Liu, H. K., Wang, G. X., Guo, Z., Wang, J., & Konstantinov, K. (2006). Nanomaterials for lithium-ion rechargeable batteries. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 6(1), 1-15.

Liu, S., Sun, S., & You, X.-Z. (2014). Inorganic nanostructured materials for high performance electrochemical supercapacitors. *Nanoscale*, 6(4), 2037-2045.

Luo, X., Tan, H., & Wen, W. (2024). Recent Advances in Wearable Healthcare Devices: From Material to Application. *Bioengineering*, 11(4), 358.

Mehrizi, M. K., & Shahi, Z. (2021). A Review on Hydrophobicity and Fabricating Hydrophobic Surfaces on the Textiles. *Sustainable Practices in the Textile Industry*, 149-165.

Miozzi, C., Amendola, S., Bergamini, A., & Marrocco, G. (2018). Clinical trial of wireless epidermal temperature sensors: Preliminary results. *EMBEC & NBC 2017: Joint Conference of the European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC) and the Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC)*, Tampere, Finland, June 2017,

Nag, A., Simorangkir, R. B., Gawade, D. R., Nuthalapati, S., Buckley, J. L., O'Flynn, B., Altinsoy, M. E., & Mukhopadhyay, S. C. (2022). Graphene-based wearable temperature sensors: A review. *Materials & Design*, 221, 110971.

Nguyen, D. K., Pham, T. N., Pham, A. L. H., Nguyen, V. C., Tran, M.-S., Bui, V. Q., & Vu, M. C. (2024). Multilayered silver nanowires and graphene fluoride-based aramid nanofibers for excellent thermoconductive electromagnetic interference shielding materials with low-reflection. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 688, 133553.

Norval, C., & Henderson, T. (2017). Contextual consent: Ethical mining of social media for health research. arXiv preprint arXiv:1701.07765.

Palumbo, A., Li, Z., & Yang, E.-H. (2022). Trends on carbon nanotube-based flexible and wearable sensors via electrochemical and mechanical stimuli: a review. *IEEE Sensors Journal*, 22(21), 20102-20125.

Pereira, C., Pereira, A. M., Freire, C., Pinto, T. V., Costa, R. S., & Teixeira, J. S. (2020). Nanoengineered textiles: from advanced functional nanomaterials to groundbreaking high-performance clothing. In *Handbook of functionalized nanomaterials for industrial applications* (pp. 611-714). Elsevier.

Petkova, P., Francesko, A., Fernandes, M. M., Mendoza, E., Perelshtein, I., Gedanken, A., & Tzanov, T. (2014). Sonochemical coating of textiles with hybrid ZnO/chitosan antimicrobial nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(2), 1164-1172.

Pomerantseva, E., Bonaccorso, F., Feng, X., Cui, Y., & Gogotsi, Y. (2019). Energy storage: The future enabled by nanomaterials. *Science*, 366(6468), eaan8285.

Ponnamma, D., Parangusan, H., Tanvir, A., & AlMa'adeed, M. A. A. (2019). Smart and robust electrospun fabrics of piezoelectric polymer nanocomposite for self-powering electronic textiles. *Materials & Design*, 184, 108176.

Raza, T., Qu, L., Khokhar, W. A., Andrews, B., Ali, A., & Tian, M. (2021). Progress of wearable and flexible electrochemical

biosensors with the aid of conductive nanomaterials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 761020.

Salat, M., Petkova, P., Hoyo, J., Perelshtein, I., Gedanken, A., & Tzanov, T. (2018). Durable antimicrobial cotton textiles coated sonochemically with ZnO nanoparticles embedded in an in-situ enzymatically generated bioadhesive. *Carbohydrate polymers*, 189, 198-203.

Secara, I.-A., & Hordiiuk, D. (2024). Personalized Health Monitoring Systems: Integrating Wearable and AI. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 16(02), 44-52.

Sevilla, M., Ferrero, G., & Fuertes, A. (2016). Graphene-cellulose tissue composites for high power supercapacitors. *Energy Storage Materials*, 5, 33-42.

Sfameni, S., Lawnick, T., Rando, G., Visco, A., Textor, T., & Plutino, M. R. (2022). Functional silane-based nanohybrid materials for the development of hydrophobic and water-based stain resistant cotton fabrics coatings. *Nanomaterials*, 12(19), 3404.

Shah, M. A., Pirzada, B. M., Price, G., Shibiru, A. L., & Qurashi, A. (2022). Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review. *Journal of Advanced Research*, 38, 55-75.

Shen, S., Xiao, X., & Chen, J. (2021). Wearable triboelectric nanogenerators for heart rate monitoring. *Chemical Communications*, 57(48), 5871-5879.

Shim, J., Son, D. I., Lee, J. S., Lee, J., Lim, G.-H., Cho, H., Kim, E.-y., Bu, S. D., Sungbin, I., & Jeong, C. K. (2022). BNNT-ZnO QDs nanocomposites for improving piezoelectric

nanogenerator and piezoelectric properties of boron nitride nanotube. *Nano Energy*, 93, 106886.

Sowbhagyam, D. V. (2024). Smart Fabric Textiles Using Nanomaterials: A Contemporary Overview. *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, 2(02), 205-209.

Stern, S. T., & McNeil, S. E. (2008). Nanotechnology safety concerns revisited. *Toxicological sciences*, 101(1), 4-21.

Su, P., Zhang, Z., Luo, L., Zhang, Z., Lan, C., Li, Y., Xu, S., Han, X., Lin, G., & Li, C. (2024). Silicon Nanowire Array Weaved by Carbon Chains for Stretchable Lithium-Ion Battery Anode. *Small*, 20(18), 2307716.

Taguchi, M., Ptitsyn, A., McLamore, E. S., & Claussen, J. C. (2014). Nanomaterial-mediated biosensors for monitoring glucose. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 8(2), 403-411.

Tian, X., Cheng, X., Liao, S., Chen, J., Lv, P., & Wei, Q. (2023). High Electrochemical Capacity MnO₂/Graphene Hybrid Fibers Based on Crystalline Regulatable MnO₂ for Wearable Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(45), 52415-52426.

Vrinceanu, N., Bucur, S., Rimbu, C. M., Neculai-Valeanu, S., Ferrandiz Bou, S., & Sucheai, M. P. (2022). Nanoparticle/biopolymer-based coatings for functionalization of textiles: recent developments (a minireview). *Textile Research Journal*, 92(19-20), 3889-3902.

Wu, T., Song, Y., Shi, Z., Liu, D., Chen, S., Xiong, C., & Yang, Q. (2021). High-performance nanogenerators based on

flexible cellulose nanofibril/MoS₂ nanosheet composite piezoelectric films for energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105541.

Wu, Z., Wang, Y., Liu, X., Lv, C., Li, Y., Wei, D., & Liu, Z. (2019). Carbon-nanomaterial-based flexible batteries for wearable electronics. *Advanced Materials*, 31(9), 1800716.

Wujcik, E. K., & Lu, Y. (2018). *Advanced Nanomaterials for Bio-Monitoring*. SoutheastCon 2018,

Yan, S., Wang, H., & Li, P. (2024). Aligned Silver Nanowires Wrapped in Graphene as a Transparent Electrode for Electromagnetic Interference Shielding Applications. *ACS Applied Nano Materials*, 7(1), 77-83.

Yao, S., Swetha, P., & Zhu, Y. (2018). Nanomaterial-enabled wearable sensors for healthcare. *Advanced healthcare materials*, 7(1), 1700889.

Yetisen, A. K., Qu, H., Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Hinestroza, J. P., Skorobogatiy, M., Khademhosseini, A., & Yun, S. H. (2016). Nanotechnology in textiles. *ACS nano*, 10(3), 3042-3068.

Zhang, T., Ran, J., Ma, C., & Yang, B. (2020). A universal approach to enhance glucose biosensor performance by building blocks of Au nanoparticles. *Advanced Materials Interfaces*, 7(12), 2000227.

Zhang, Y., Xia, X., Ma, K., Xia, G., Wu, M., Cheung, Y. H., Yu, H., Zou, B., Zhang, X., & Farha, O. K. (2023). Functional textiles with smart properties: their fabrications and sustainable applications. *Advanced Functional Materials*, 33(33), 2301607.

CHAPTER III

Polipropilen Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi

İbrahim ASLAN¹

Giriş

Polimerler, monomer adı verilen birçok atomun birbirine bağlanarak oluşturduğu büyük moleküllerdir. Bu moleküller, üretim maliyetlerinin düşük olması, şekil alma kolaylığı ve çeşitli amaçlara uygun bir şekilde üretilebilme özellikleri sayesinde günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Çevik, 2014). Polimer bazlı malzemeler günümüz toplumunun vazgeçilmez bir unsuru olmuştur. İşleme kolaylıkları, düşük maliyetleri ve kolay bulunabilmeleri nedeniyle birçok uygulamada geleneksel metallerin ve cam bazlı malzemelerin yerini almıştır. Polimerler, ısı varlığındaki davranışlarına göre termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki

¹ Öğr. Gör. Dr. İbrahim ASLAN, Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Amasya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9157-9286, ibrahim.aslan@amasya.edu.tr

ana sınıfa ayrılır. Termosetler, kürlenme işlemi sırasında geri dönüşü olmayan kimyasal çapraz bağlanmaya uğrayan ve bunları çözünmeyen ve erimeyen üç boyutlu bir yapıya dönüştüren polimerik zincirler içerir. Termoplastikler ise ısıtılarak akıcı bir sıvı haline getirilebilen ve soğutulduğunda katılaşılabilen polimerik malzemelerdir. Uygulama üzerine tekrar tekrar yumuşatılabilir ve yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastik polimerlerin umut verici özelliklerinden bazıları arasında yüksek darbe direnci, kimyasal direnç, yüksek reformasyon yeteneği ve geri dönüştürülebilirlik kolaylığı yer alır. Bu farklı özelliklerinden dolayı termoplastik polimerlerin günlük yaşamımızda çok yaygın uygulamaları vardır. Bu polimerlerin kullanımı, tüketim malları, paketlenme ve depolama malzemeleri, tıbbi ekipman, makine ve otomotiv parçalarını içeren düşük düzeyden üst düzey uygulamalara kadar değişmektedir (Parit & Jiang, 2020). Günümüzde tüketici ve ticari malların büyük bir kısmı termoplastik malzemeler kullanılarak üretilmektedir (Das vd., 2020).

Çeşitli araştırma ve endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerlerin ilgili özellikleri arasında; gelişmiş mukavemet değerleri, yüksek tokluk, sertlik, tartışılmaz kimyasal stabilite, optik şeffaflık, dayanıklılık, termal ve elektriksel davranış, kendi kendine yağlama yeteneği ve hidrofobik veya su geçirmezlik potansiyeli yer alır. Isıyla sertleşen bir polimerin erime sıcaklığının üzerinde ısıtılıp soğutulması, geri dönüşü olmayan bir katılaşma süreci olan sıvı katı hal geçişine yol açar. Kürlenme işlemi, küçük moleküllerin kimyasal bağlar kurarak karmaşık ağlar oluşturduğu bir süreçtir. Sonuç olarak, kalıcı ve sert bir ürün elde edilir. Termosetlerin aşırı ısıtılması, kimyasal ayrışma ve önemli yapısal değişikliklere yol açar. Termoset polimerlerin mekanik

özellikleri, termoplastiklere göre sıcaklıktan etkilenmez. Termoplastik polimerlerin en büyük avantajlarından biri, işleme sırasında ve sonrasında minimum kimyasal değişimlerinin yanı sıra süneklik ve geri dönüşüm potansiyelleriyle ilgilidir (Bîrcă, Gherasim, Grumezescu, & Grumezescu, 2019).

Popüler termoplastikler malzemeler, polipropilen (PP), polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) ve poliüretandır (PU). Polipropilen (PP) termoplastik malzemelerin doğal özellikleri nedeniyle yeniden biçimlendirilmek ve yeniden kullanılmak üzere uygun şekilde ısıtılabilen malzemedir (Lin, Lin, & Bao, 2021).

Polipropilen, petrol rafinasyonunun nispeten ucuz bir yan ürünü olan propenden türetilen bir termoplastiktir (Spoerk, Holzer, & Gonzalez-Gutierrez, 2020). PP; yangına dayanıklılık, basitlik, yüksek ısıl bozulma sıcaklığı ve boyutsal sağlamlık gibi olağanüstü özelliklere sahip, ucuz bir termoplastik polimerdir. PP, müşteriler için plastik ambalaj gibi son ürünlerin yapımında yaygın olarak kullanılan bir plastiktir ve dünya çapındaki plastik sektörünün %16'sını oluşturur. PP'nin doğal ve yapay elyaflarla çeşitli kombinasyonları, termal ve mekanik özellikleri ve PP ile işlenen yeni ürünler üretme yetenekleri nedeniyle önem kazanmaktadır. PP ilk olarak 1954 yılında tanımlandı ve en düşük yoğunluğa sahip plastiklerden biri olması ve erime noktasına ulaştığında sıvıya dönüşmesi nedeniyle termoplastik olarak bilinmesi nedeniyle hızla kullanıldı. Doğası gereği termoplastik olan PP, baz bileşiminde önemli bir bozulmaya neden olmadan ısıtılabilmesi, soğutulabilmesi ve yeniden ısıtılabilmesi nedeniyle birçok endüstride oldukça faydalı kabul edilmektedir. Termoplastik bir polimer olarak PP; fiziksel özellikleri, uyarlanabilirliği ve çevre dostu geçmişi nedeniyle en

umut verici ürünlerden biri olarak görülüyor. Ek olarak PP, iyi termal stabiliteye, kimyasal dirence, mekanik dayanıklılığa ve düşük maliyete sahip olduğundan mikro gözenekli membranların imalatında en çok kullanılan polimerlerden biridir (Alsabri, Tahir, & Al-Ghamdi, 2022).

Birçok araştırmacıya göre polipropilen, mükemmel kimyasal stabilitesi nedeniyle çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu, düşük işlem sıcaklığı ve yüksek sertliği nedeniyle ileri teknolojilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bendaoued, Messaoud, Harzallah, Bistac, & Salhi, 2022). Polipropilen, paketleme, tekstil, kırtasiye, otomotiv parçaları ve ev eşyaları gibi birçok alanda kullanılan bir termoplastik polimerdir (Somashkhar, Shanthakumar, & Nagamadhu, 2020); Kumar & Satish, 2020).

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK)

Kaynak ile birleştirme, otomobil, petrokimya, havacılık, enerji ve denizcilik endüstrilerinde kullanılan, boyutları ve geometrileri ne olursa olsun farklı bileşenlerin birleştirilmesinde ve üretilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel ergitme kaynağı teknikleri, kaba mikro yapıya ve gözeneklilik, kalıntı, çatlak, füzyon eksikliği, penetrasyon eksikliği vb. gibi kusurlara sahip düşük kaliteli kaynaklı bağlantılar üretir. Geleneksel kaynak teknolojileriyle ilgili sorunlar, bilim adamlarını titreşim kaynağı, lazer kaynağı, ultrasonik kaynak, sürtünme karıştırma kaynağı gibi yeni verimli kaynak teknolojileri geliştirmeye motive etmiştir (Elsheikh, 2023).

Sürtünme karıştırma kaynağı, farklı erime noktalarına sahip iki veya daha fazla benzer veya farklı malzemeyi, sürtünme ve

bağlantı yerindeki malzemelerin mekanik olarak karıştırılmasıyla oluşturulan bir ısı karışımı yoluyla kaynaklayan bir katı hal birleştirme işlemidir. Alüminyum, magnezyum vb. elementler içeren farklı alaşımlar ve çelik gibi sert malzemeler genellikle bu yöntemle kaynak yapılır. Sürtünme karıştırma kaynağında, kaynak yalnızca dövme etkisi nedeniyle gerçekleştiğinden ve malzemelerde herhangi bir erime meydana gelmediğinden, birleştirilecek malzemelerin mekanik özellikleri azalmaz. SKK, 1991 yılında Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) mali desteğiyle Wayne Thomas tarafından geliştirilen nispeten yeni bir birleştirme yöntemidir. Başlangıçta bu işlemin amacı yörüngesel uzay aracının ağırlığını azaltmaktı ve iş alüminyum alaşımlarıyla sınırlıydı, ancak zamanla sürtünme karıştırma kaynak işleminin alanı arttı ve takım malzemeleri de değişti. Sürtünme karıştırma kaynağı da oldukça verimlidir, gaz yaymaz ve bu işlemi çevre dostu hale getirmek için dolgu malzemesi kullanmaz. Bu yöntem, arayüz kırılmalı bileşiklerin oluşumunu en aza indirdiğinden bağlantının mukavemet gibi mekanik özelliklerini geliştirebilir. Farklı malzemeler ve kaynak yapılması zor malzemeler de bu yöntemle kaynak yapılabilir. Kaynak hızı, omuz çapı, eğim açısı, aksel yük, takımların dönme hızı, takım profili ve aksel basınç, kaynağın oluşması için gerekli ısı ve basıncı sağlamak üzere kontrol edilmesi gereken temel değişkenlerdir. Sürtünme karıştırma, maliyet tasarrufu sağlayan bir işlem olarak değerlendirilmektedir. Bu, sarf malzemesi maliyetlerinin ortadan kaldırılmasıyla mümkündür. Enerji tüketimi de daha azdır, bu da onu bir enerji tüketimi açısından oldukça verimli bir süreç; önemli bir maliyet tasarrufu süreci olacaktır. Süreç, gemi yapımı ve açık deniz, havacılık, otomotiv, demiryolları, imalat, robotik ve kişisel

bilgisayarlar vb. gibi çeşitli endüstrilerde verimli bir şekilde kullanılmaktadır (Singh, Dubey, Singh, & Kumar, 2021).

SKK işlemi, ardışık dört aşamadan meydana gelmektedir. İlk olarak takım dönmeye başlar ve kaynak yapılacak iki plakanın içine daldırılır. Dalma, omuzun kaynak plakaları ile temas etmesiyle sona erer. Takım birkaç saniye boyunca dönerek ve sürtünme yoluyla ısı üreterek pozisyonunda kalır, ardından dönerken kaynak hattı boyunca ileri doğru hareket eder. Kaynağın sonunda takım dönerken geri çekilir. SKK'nin geleneksel eritme bazlı teknolojilere göre avantajları daha düşük enerji tüketimi, tehlikeli dumanların olmaması ve otomatikleştirme kolaylığıdır. 2050'deki sıfır emisyon hedefinin temsil ettiği yeni küresel zorluk, önümüzdeki yıllarda önemli bir rol oynayabilecek çevre dostu katı hal kaynak teknolojileri için bir fırsattır. Bu nedenle, ulaştırma sektörünü kasıp kavuran büyük dönüşümün getirdiği yeni beklentilere yanıt vermek için SKK'ye ilişkin temel ve uygulamalı araştırma faaliyetleri teşvik edilmelidir (Ambrosio, Morisada, Ushioda, & Fujii, 2023).

SKK birleştirme işleminde; takım tutma süresi, takım eğim açısı, takım omuz geometrisi, takım ilerleme hızı ve dönüş hızı gibi parça imalatının kalitesini ve verimliliğini artırabilecek proses parametreleri vardır. Birleştirme işleminde iki önemli parametre takım dönüş hızı ve ilerleme hızıdır. SKK sürecinde verimliliği artırmak için süreç parametrelerinin etkileri farklı araştırma çalışmalarında analiz edilmektedir (Soori, Asmael, & Solyalı, 2020). Aşağıda SKK birleştirme işlem parametreleri verilmiştir.

1.Takım dönme hızı: SKK sırasında takımın dönmesi, malzemeyi dönen pim etrafında karıştırarak, malzemeyi pimin önünden arkasına doğru hareket ettirir ve böylece kaynak işlemi

tamamlanır. Daha yüksek takım dönüş hızları, artan sürtünmeli ısınma nedeniyle daha fazla sıcaklık üretir ve bu da malzemenin daha yoğun bir şekilde karıştırılmasına yol açar. Takım yüzeyinin iş parçası ile olan sürtünmeli bağlantısı, ısınmayı kontrol etmede önemli bir rol oynamaktadır. Takım dönüş hızının artması, arayüzdeki sürtünme katsayısının değişmesine yol açacağından, ısınmanın monoton bir şekilde artması beklenmemektedir (Mishra & Ma, 2005).

2.Kaynak hızı (İlerleme hızı): Bağlantı hattı yönü boyunca çalıştırılan SKK takım dönüşünün kaynak hızı, sonuç olarak kaynak özelliklerini etkileyen çeşitli kaynak parametrelerini belirler. Düşük kaynak hızının sıcaklığı etkilediği gözlemlenmiştir (Rajak, Pagar, Menezes, & Eyvazian, 2020). Daha yüksek ilerleme hızlarında kaynak yapılan bağlantıların daha yüksek sertliği ve nihai çekme mukavemeti, tane sınırı, çökme ve altyapı güçlendirme mekanizmalarıyla ilgilidir. İlerleme hızın azalmasıyla birlikte, SKK sırasında eklemlerin tepe sıcaklığı ve ısı girdisi artar. Ayrıca, daha düşük ilerleme hızlarında kaynak yapılan bağlantılar, daha yüksek ilerleme hızlarında üretilen bağlantılara kıyasla daha sünek kırılma modunu ortaya çıkarır (Barenji, 2016).

3.Eksenel kuvvet: Eksenel kuvvet, kaynak bölgesindeki tane boyutunu, kaynak kusurlarının oluşumunu ve karıştırma bölgesindeki kaynağın sertliğini önemli ölçüde etkiler; bu durum da kaynak özelliklerini etkiler. Yüksek eksenel kuvvet, artan plastikleştirilmiş malzeme akışıyla birlikte karışma bölgesinde sıcaklıkların yükselmesine neden olurken, düşük eksenel kuvvet, yetersiz sürtünme ısısının ve dövme basıncının oluşmasına neden olur (Rajak vd., 2020).

4.Takım tasarımı: Takım geometrisi, süreç optimizasyonunun en baskın özelliklerinden biridir. Takım, lokal ısı üretimi, düzgün malzeme akışı, karıştırmanın teşvik edilmesi, plastik deformasyon, dövme kuvvetinin oluşumu gibi temel amaçları yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Isı, takım dalmasının erken safhasında esas olarak takım probu ve taban malzemesi arasındaki sürtünme nedeniyle oluşur (Gite, Loharkar, & Shimpi, 2019). SKK işleminin başarısı kaynak takımının tasarımına bağlıdır. Kaynak takımı iki parçadan oluşur; bir pim ve bir omuz. Takım geometrisi, SKK bağlantılarının enerji girdisini, deformasyon modelini, dalma kuvvetini, mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler (He, Gu, & Ball, 2014). Kaynak kalitesi ve takım aşınması, takım malzemesi seçerken dikkate alınan iki önemli husustur. Takım malzemesinin özellikleri, yani takım mukavemeti, kırılma tokluğu, sertlik numarası, termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik, takım performansı için ana düzenleyici parametrelerdir (Rajak vd., 2020).

4.1.Omuz geometrisi: SKK işlemi için bir takım tasarlanırken takım geometrisi, bağlantıların mekanik özelliklerini etkilediğinden önemli ölçüde dikkate alınmalıdır. Ayrıca kaynak kusurlarının oluşumu, takım geometrisinden önemli ölçüde etkilenir. Takım omuz çapı, ısının çoğunu üretir ve plastikleştirilmiş malzemelerle temas halinde olduğundan, kaynağın kalitesini daha da belirleyen malzeme akış alanını kontrol eder. Takımın omuz çapı için tasarım kriterleri, malzemenin ısı transfer hızları ve akış hızı tarafından hesaplanan tork kullanımına dayanmaktadır. Daha büyük çap, yüzeydeki ısı üretim miktarını önemli ölçüde artırarak stresleri azaltır (Rajak vd., 2020).

4.2.Pim geometrisi: Takım geometrisi, ısı oluşumunu lokalize eden ve karıştırma etkisi ile malzeme akışını yöneten bileşen olduğundan SKK prosesinde önemli bir etkiye sahiptir. SKK’de konik, dişli, silindirik ve üçgen gibi farklı takım pimi geometrileri kullanılmaktadır (Rajak vd., 2020).

5.Takım eğim açısı ve dalma derinliği: Takım eğim açısı, sürtünme karıştırma kaynak bağlantılarının mikro yapısını belirleyen etkili bir faktördür. Takım omuzu ile iş parçası arasındaki takım eğim açısının neden olduğu temassız alan, farklı proses parametreleri setleri altında belirlenir ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilir (Zhai, Wu, & Su, 2020). Milin arka yönündeki uygun eğim, takımın omzunun karıştırılan malzemeyi dişli pimle tutmasını ve malzemeyi pimin önünden arkasına etkili bir şekilde hareket ettirmesini sağlar (Mishra & Ma, 2005).

Ayrıca, takım omuzlarıyla kaliteli kaynaklar üretmek için pimin iş parçalarına dalma derinliği önemlidir. Takım, iş parçalarının arasına derin bir şekilde yerleştirildiğinde, takım omzu iş parçası üzerinde bir etki yapar ve daldığı bu derinliğe dalma derinliği denir (Sharma, Khan, & Siddiquee, 2022). Daldırma derinliği çok sığ olduğunda takımın omuzu orijinal iş parçası yüzeyine temas etmez. Bu nedenle, dönen omuz, karıştırılan malzemeyi etkin bir şekilde pimin önünden arkasına doğru hareket ettiremez, bu da iç kanallı veya yüzey oyuklu kaynakların oluşmasına neden olur. Daldırma derinliği çok derin olduğunda, takımın omuzu iş parçasına dalar ve aşırı çapak oluşumuna neden olur. Bu durumda, içbükey bir kaynak üretilmesi, kaynaklı plakaların yerel olarak incelmesine neden olur (Mishra & Ma, 2005).

6. Bağlantı tasarımı: Sürtünme karıştırma kaynakları farklı yapısal konfigürasyonlarda uygulanabilir. Yapısal uygulamalar için ekstrüzyonların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın SKK konfigürasyonları alın, alın bindirme ve bindirme bağlantılarıdır (Trimech, Annan, Walbridge, & Maljaars, 2023). Yaygın kullanılan SKK bağlantı tiplerinin yanı sıra mühendislik uygulamalarındaki karmaşık yapısal ihtiyaçlar nedeniyle kare alın, kenar alın, T alın bağlantısı, çoklu bindirme bağlantısı, T bindirme bağlantısı ve köşe bağlantısı şeklinde çeşitli SKK bağlantı tipleri de bulunmaktadır (He vd., 2014).

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ise, sürtünme karıştırma kaynağının bir çeşididir. SKNK, kısa çevrim süresinden dolayı geçici bir süreç olarak düşünülebilir (Hirasawa, Badarinarayan, Okamoto, Tomimura, & Kawanami, 2010). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, 2001 yılında otomotiv endüstrisinde alüminyum levhaların dirençli nokta kaynağına alternatif olarak geliştirilmiştir. SKNK süreci üç aşamadan meydana gelir: daldırma, karıştırma ve geri çekilme. İşlem, takımın yüksek bir dönme hızında dönmesiyle başlar. Daha sonra takım, takımın omuzu üst iş parçasına dalıncaya kadar iş parçasına doğru zorlanır. Takımın dalma hareketi malzemenin dışarı çıkmasına neden olur. Takım önceden belirlenen derinliğe ulaştığında dalma hareketi sona erer ve karıştırma aşaması başlar. Bu aşamada takım, iş parçalarının içinde dalmadan döner. Daldırma ve karıştırma aşamalarında sürtünme ısı üretilir ve böylece takıma bitişik malzeme ısıtılır ve yumuşatılır. Yumuşatılmış üst ve alt iş parçası malzemeleri karıştırma aşamasında birbirine karışır. Takımın omuzu yumuşatılmış malzeme üzerinde bir sıkıştırma gerilimi oluşturur. Karıştırma aşamasında katı halli bir bağlantı oluşur. Önceden belirlenmiş bir bağlanma elde edildiğinde

işlem durdurulur ve takım iş parçalarından geri çekilir. Ortaya çıkan kaynağın, bağlantının ortasında karakteristik bir anahtar deliği vardır (M. K. Bilici, 2012).

SKNK sırasında, takımın nüfuz etmesi ve kalma süresi, ısı oluşumu, malzemenin plastikleşmesi, kaynak geometrisi ve kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir. Takım, omuz ve pim olmak üzere iki parçadan oluşur. Omuz, sürtünme veya deformasyon nedeniyle oluşan ısının büyük bir kısmını üretir. Pim, iş parçaları arasında malzeme akışına yardımcı olur. Bu işlemlere daha fazla yardımcı olmak için omuz ve pim yüzeylerine özellikler eklenmiştir. Kaynaklar için proses koşulları optimize edilmezse ortaya çıkan bağlantı kaynak kusurları içerebilir (Hirasawa vd., 2010). Kaynak parametreleri ve takım geometrisi SKK ve SKNK karıştırma bölgesi oluşumunu ve kaynak mukavemetini etkiler. SKNK'de kaynak parametreleri (takım dönme hızı, bekleme ve gecikme süresi, dalma hızı ve derinliği) ve takım geometrisi (pim çapı, pim uzunluğu, pim açısı, pim profili, omuz çapı ve omuz içbükey açısı) en uygun şekilde seçilmelidir (M. K. Bilici, 2012).

SKNK işleminde; dalma derinliği, takım dönme hızı ve takım geometrisi parametreleri de SKK işleminde açıklandığı üzere birleştirmede etki eden parametrelerdir. Bunlara ek olarak SKNK işleminde etki eden parametreler aşağıda açıklanmıştır.

1.Bekleme süresi: Bekleme süresi arttıkça çevrim süresi de artar. Yüksek bekleme süresi, yüksek sıcaklık ve artan ısı girdisi nedeniyle karışma bölgesinde aşırı plastikleşmeye ve daha kaba tanelere neden olur. Uzun bekleme süreleri sırasında yüksek ısı girişinin bir sonucu olarak dövme kuvveti azalır, bu da levhalar

arasında zayıf metalurjik bağlanmaya ve karışma bölgesinde düşük sertliğe neden olur. Bekleme süresinin sertlik üzerinde kayda değer bir etkisi bulunmaktadır. Tüm bekleme sürelerinde aşırı sertlik anahtar deliğinin yakınında ölçülür (Sathyaseelan vd., 2022).

2.Gecikme süresi: Karışma bölgesi kalınlığı için gecikme süresi çok önemlidir. Daha uzun gecikme süreleriyle daha büyük kaynak karışma bölgeleri elde edilir ve bu da bağlantı mukavemetini artırır. SKNK'deki kaynak-bağ alanının şekli yüksek önem taşımaktadır. Bir kaynak karışma bölgesinin kesit alanı, kaynağın mukavemetini belirler. Küçük bir bağ alanına sahip bir kaynak, sıfır gecikme süresinde düşük bir çekme kuvveti altında kırılır (Mustafa Kemal Bilici, 2014).

3.Dalma hızı: Dalma hızının artırılması ısı girdisini azaltır. Dalma hızı daha belirgin olduğunda döngü süresi kısalmır, dalma hızı daha düşük olduğunda döngü süresi daha uzundur. Daha uzun döngü uzunluğunun ürettiği artan karıştırma kuvveti, karışma bölgesinde daha iri taneli bir yapıya yol açar. Daha düşük dalma hızlarında yüksek maksimum sıcaklıklar gözlenir ve bu da daha fazla ısı girdisine neden olur. Ayrıca dalma hızı, bağlantının performansının yanı sıra kaynağın sertliğini de etkiler. En mükemmel sertlik, kullanılan dalma hızlarına bakılmaksızın (karıştırma bölgesi içinde) anahtar deliği çevresinde belirlenir (Ramya vd., 2022).

Polipropilen ile Polipropilen ve Diğer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Bu kısımda, polipropilen ile polipropilen ve diğer malzemelerin SKNK ile ilgili vaka çalışmaları ele alınmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

Vaka 1: Bilici 2012 yılında yaptığı çalışmada, polipropilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı parametrelerini optimize etmek için Taguchi yaklaşımı uygulanmıştır. Deneysel testler, takım dönme hızı, dalma derinliği ve kaynağın başlangıcındaki bekleme süresi gibi proses faktörlerinin kombinasyonlarına göre, Taguchi ortogonal tablosu L9'a dayanarak rastgele yapılmıştır. Başlangıç kaynak parametrelerinden optimum kaynak parametrelerine kadar kaynak mukavemetindeki iyileşme yaklaşık %47,7'dir (Mustafa Kemal Bilici, 2012).

Vaka 2: Kurtulmuş 2012 yılında yaptığı çalışmada, SKNK yönteminde kaynak takımının dönme ve takım dalma hızı, bekleme süresi, takım dalma derinliği ve takımın geri çekilme gecikmesi parametrelerinin polipropilen sürtünme karıştırma noktası kaynaklarında bağlantı oluşumu ve kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Test sonuçlarından takım dalma hızının polipropilen levhaların SKNK'si üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bekleme süresi, takımın dönüş hızı ve dalma derinliği SKNK karışma bölge oluşumunu ve bağlantının gücünü etkilediği bulunmuştur (Kurtulmuş, 2012).

Vaka 3: Nugroho vd. 2021 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen levha sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantının karakterizasyonu araştırılmıştır. Takım dönme hızının ve geometrik şeklinin polipropilen bağlantının mekanik özelliklerine etkisi, SKNK tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Omuz açıları 0° ve 5° olan iki tip cihaz hazırlanmış, diğer parametrik geometriler aynı alınmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) işlemi 985, 1660 ve 2350 rpm'lik dönme hızlarındaki değişikliklerle gerçekleştirilirken, takım dalma hızı, bekleme süresi ve gecikme

süresi gibi diğerkaynak işlemin parametreleri sabit kabul edilmiştir. Takım dönme hızının artmasıyla yük kapasitesi artmıştır (Nugroho, Dadang Dika, Budiyanoro, & Himarosa, 2021).

Vaka 4: Arıcı ve Mert 2008 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen şerit numuneleri üzerinde bindirme bağlantıları oluşturmak için SKNK kullanılmıştır. Polipropilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağında takım dalma derinliği ve bekleme süresi parametrelerinin bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu parametrelerin, ortaya çıkan bağlantıların çekme kopma yükü üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bağlantı kopma yükünü maksimuma çıkaran optimum bir parametre kombinasyonu belirlenmiştir (Arici & Mert, 2008).

Vaka 5: Bilici vd. 2014 yılında yaptığı çalışmada, takım geometrisi ve kaynak parametrelerinin sürtünme karıştırma nokta kaynaklı polipropilen levhaların makro yapısı, kırılma modu ve kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bindirme kesme çekme yükü ve karışma bölgesi kalınlığı, artan takım dönme hızı ve bekleme süresiyle birlikte arttığı bulunmuştur. Makro yapı, kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Farklı kaynak parametreleri kullanıldığında, polipropilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında bağlantıların farklı kırılma modları elde edilmiştir. 4 mm'lik levhalar için en uygun takımın konik silindirik pim olduğu bulunmuştur (Mustafa Kemal Bilici, 2014).

Vaka 6: Sidhom vd. 2022 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemin deneysel olarak incelenmiştir. Takım geometrisi, dalma hızı ve derinliği tüm testler boyunca sabit tutulmuştur. Bekleme süresinin

ve takım dönme hızının bindirme kesme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Polipropilen malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı incelenmiş ve optimum kaynak koşulları, 40 s bekleme süresiyle 3500 rpm dönme hızı olarak belirlenmiştir. Farklı polimerlerin (PP'den HDPE'ye ve HDPE'den PP'ye) SKNK ile birleştirilmesi, 80 saniye bekleme süresinde 2300 rpm dönme hızının optimum kaynak koşuluyla başarıyla gerçekleştirilmiştir (Sidhom, Naga, & Kamal, 2022).

Vaka 7: Paidar vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, AA2219/PP-C30S polipropilen polimerinin sürtünme karıştırma nokta kaynaklı hibrit bağlantılarının mukavemetini arttırmak için parametre kombinasyonu değiştirilerek önceden imal edilmiş kilitleme kollarının/dişlerinin kullanımı incelenmiştir. Sonuçlar, takım dönme hızındaki bir artışın reaksiyon tabakasının kalınlığını (Al ve polimer alt tabakalar arasında), kesme-çekme yükünü (268-540 N) ve hibrit AA2219/PPC30S bağlantısının çapraz çekme yükünü (171-321 N) artırdığını göstermiştir (Paidar, Ojo, Moghanian, Pabandi, & Elsa, 2019).

Vaka 8: Bilici 2021 yılında yaptığı çalışmada, SKNK ile yapılan birleştirmelerde öncelikle PP/PP ve HDPE/HDPE daha sonra farklı malzemelerin PP/HDPE, HDPE/PP birleştirme işlemleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. Karıştırma süresinin ve takım dönme hızının bağlantı oluşumu ve kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Benzer plastik levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında yüksek kaynak dayanımları elde edilmiştir. En yüksek kaynak dayanımları PP-PP kaynaklarında ve en düşük kaynak dayanımları ise PP-HDPE kaynaklarında elde edilmiştir (Mustafa Kemal Bilici, 2021).

Tablo 1: PP/PP ve PP/Diğer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma
Nokta Kaynağı

Referans	Vaka	Malzemeler	Bağlantı türü	Çalışma için seçilen parametreler	Optimum şartlar
(Mustafa Kemal Bilici, 2012)	1	PP-PP	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Bekleme süresi Takım dalma derinliği Takım dönme hızı	Optimum kaynak parametreleri; 100 saniyelik bekleme süresi, 5,7 mm takım dalma derinliği ve 900 rpm takım dönme hızıdır.
(Kurtulmus, 2012)	2	PP-PP	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım dönme hızı Takım dalma derinliği Takım dalma hızı Bekleme süresi ve takım geri çekilme gecikmesi	Çalışmada optimum kaynak parametreleri olarak 900 rpm takım dönme hızı, 120 s bekleme süresi ve 5,7 mm dalma derinliği belirlenmiştir.
(Nugroho vd., 2021)	3	PP-PP	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım omuz açısı Takım dönme hızı	SKNK bağlantısının 2253 N maksimum çekme kesme yükü kapasitesi, takım tipi 2 (5°'lik omuz açısına sahip konik silindir) için 2350 rpm dönme hızına ulaşmıştır.
(Arici & Mert, 2008)	4	PP-PP	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım dalma derinliği Bekleme süresi	80 saniyelik bekleme süresi, 8 ve 8,5 mm takım dalma derinliği optimum değerlerdir.
(Mustafa Kemal Bilici, 2014)	5	PP-PP	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım dönme hızı Bekleme süresi Takım gecikme süresi Takım geometrisi	Optimum kaynak parametreleri, 900 dev/dak takım dönme hızı, 120 s bekleme süresi ve 45 s gecikme süresi olarak bulunmuştur.
(Sidhom vd., 2022)	6	PP-PP PP-HDPE	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım dönme hızı Bekleme süresi	PP-PP için optimum kaynak koşulları, polipropilen için 40 s bekleme süresiyle 3500 rpm dönme hızıdır. PP-HDPE için 80 sn bekleme süresinde 2300 rpm dönme hızında optimum kaynak koşulları elde edilmiştir.
(Paidar vd., 2019)	7	PP-Al alaşımı	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takım dönme hızı	Maksimum çekme kesme yükü; 1800 rpm takım dönme hızı, 5 sn bekleme süresi ve 0,1 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir.
(Mustafa Kemal Bilici, 2021)	8	PP-PP PP-HDPE	Bindirme kaynak nokta bağlantısı	Takımın dönme hızı Karıştırma süresi	900 rpm takım dönme hızı ve 120 saniyelik karıştırma süresi, PP-PP kaynakları için en iyi parametre bulunmuştur. PP-HDPE kaynakları için en iyi kaynak parametreleri ise 120 saniye karıştırma süresi ve 1600 rpm takım dönme hızıdır.

Polipropilen ile Diğer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Bu kısımda, polipropilen ile diğer malzemelerin SKK ile ilgili vaka çalışmaları ele alınmış ve Tablo 2’de verilmiştir.

Vaka 1: Sahu vd. 2017 yılında yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımı Al 6063 ile polipropilen arasında sürtünme karıştırma kaynağının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Alın kaynağı için takım dönme hızı, takım eğim açısı ve çapraz kaynak hızı gibi üç değişken dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, alüminyumun termoplastiğe yeterli şekilde karışması nedeniyle, 2° takım eğim açısında yeterli ilerleme hızıyla (25 mm/dak) orta düzeyde takım dönüşünde (750 rpm) maksimum bağlantı verimliliğinin %10'un altında olduğu bulunmuştur (Sahu vd., 2017).

Vaka 2: Sahu vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, sensör sinyalleri kullanılarak polipropilene ile Al 6063 alaşımı için sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kaynak kalitesini artırmak için köprü bağlantısı olarak takım ofsetleme ve oluklu kenar tabanlı taban plakası tasarımı gibi farklı takım konumlarında silindirik ve dişli takım pimi profili için Al6063 ile polipropilen sürtünme karıştırma alın kaynağının fizibilitesini ele alınmıştır. Dişli takım pimi profili kullanan yeni oluklu kenar tabanlı tasarımın oldukça verimli olduğu görülmüştür (Sahu, Pal, Mahto, & Dash, 2019).

Vaka 3: Moghanian vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, Saf magnezyum ve polipropilenin bindirmeli bağlantı konfigürasyonunda sürtünme karıştırma kaynağı incelenmiştir. Çalışmada kullanılan takım dönme ve ilerleme hızları sırasıyla 500-700 dev/dak ve 50-100 mm/dak’dır. Sonuçlar, mekanik kilitlemenin

optimum yüzdesi (%48) ve magnezyum oksitin varlığı nedeniyle bağlantının 22,5 MPa'lık maksimum çekme kesme mukavemetine, 700 dev/dak ve 75 mm/dak'da ulaşıldığını göstermiştir (Moghianian, Paidar, Seyedafghahi, & Ojo, 2019).

Vaka 4: Payganeh vd., 2011 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma kaynak işlemi parametrelerinin ağırlıkça %30 cam elyaf içeren polipropilen kompozit kaynakların görünümü ve mukavemeti üzerine etkileri incelenmiştir. Takım pimi geometrisi, takım dönme hızı, iş doğrusal hızı ve takım eğim açısı gibi önemli proses parametrelerinin çekme mukavemeti ve kaynak görünümü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, takım pimi geometrisinin kaynak kalitesini önemli ölçüde etkilediğini ve dönme hızı ile eğim açısının kaynak görünümü ve mukavemeti üzerindeki etkilerinin iş doğrusal hızından daha fazla olduğunu göstermiştir (Payganeh, Arab, Asl, Ghasemi, & Boroujeni, 2011).

Vaka 5: Hajideh vd., 2018 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen ve akrilonitril bütadien stiren malzemelerinin SKK bağlantılarının kaynak bölgesine bakır tozu ekleyerek güçlendirilmesini incelemişlerdir. Proses parametreleri, özellikle dönme ve ilerleme hızları ile ısıtıcı sıcaklığının bağlantıların mekanik özellikleri ve makro yapısı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bağlantıya bakır tozu eklenmesi, optimum kaynak koşullarında çekme mukavemetini yaklaşık %36 ve sertliği %30 artırmıştır (Hajideh, Farahani, & Molla Ramezani, 2018).

Vaka 6: Miranda vd., 2023 yılında yaptıkları çalışmada, iki farklı polimer UHMWPE (ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) ve PP (polipropilen) malzemeleri sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilmiş ve mekanik özellikleri

değerlendirilmiştir. Çalışmada tasarlanan ve üretilen sabit alüminyum omuzun, ilerleme hızı, dönme hızı, yaklaşma hızı, ön ısıtma veya ön ısıtmanın olmaması gibi uygun SKK parametreleriyle birlikte kullanılması belirgin şekilde iyileştirilmiş sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Mekanik özellikler, farklı bağlantı noktaları için çekme mukavemetinin ana malzemelerin kaynak verimliliğine göre %80'e kadar ulaştığını gösterecek şekilde iyileştirilmiştir (Mario A. Sánchez Miranda vd., 2023).

Vaka 7: Hajideh vd., 2017 yılında yaptıkları çalışmada, takım geometrisinin SKK'lı polietilen ve polipropilen levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dişli silindirik, kare, üçgen ve düz silindirik olmak üzere 4 farklı pim profili dikkate alınmıştır. Dönme hızı ve ilerleme hızı dahil kaynak değişkenlerinin etkileşim etkileri de incelenmiştir. Dişli silindirik pim profilinin her kaynak işlemi koşulu için en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir (Hajideh, Farahani, Alavi, & Molla Ramezani, 2017).

Vaka 8: Eslami vd., 2015 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen ve polietilen polimerlerin bindirme bağlantılarının kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek için yeni bir kaynak takımı kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Bu takımla üretilen kaynaklar, kaynakların yüzey kalitesini ve mukavemetini önemli ölçüde artırmıştır. Dönme ve ilerleme hızının, numunenin çekme mukavemeti üzerinde en belirleyici etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Eslami, Ramos, Tavares, & Moreira, 2015).

Vaka 9: Miranda vd., 2022 yılında yaptıkları çalışmada, SKK kullanılarak ABS ve PP malzemeleri birleştirilmiş ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Proses parametrelerinin, özellikle

dönme hızının, ilerleme hızının ve yaklaşım hızının değiştirilmesinde, ortaya çıkan mekanik özelliklerden yeterli düzeyde bir uzlaşma elde edilmiştir. Benzer olmayan ABS-PP numunelerinin birleştirilmesi üzerine yapılan çekme testleri, ana malzemelerle karşılaştırıldığında %90'a kadar yüksek bir mukavemet göstermiştir (M.A. Sánchez Miranda, Almaraz, López, & Vilchez, 2022).

Vaka 10: Eslami vd., 2018 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklı polimer bağlantılarının parametre optimizasyonunu araştırılmıştır. Çalışmada, ince polipropilen ve polietilen levhaların harici ısıtma olmadan bindirmeli bağlantı konfigürasyonunda birbirine kaynaklanması için teflondan yapılmış sabit bir omuz kullanılmıştır. Bağlantıların bindirme-kesme mukavemeti açısından takım tasarımının en belirleyici etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Optimize edilmiş kaynak parametreleriyle üretilen kaynaklar, iyi yüzey kalitesi ve mukavemet sunmuştur (Eslami, De Figueiredo, Tavares, & Moreira, 2018).

Tablo 2: PP/Diğer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Referans	Vaka	Malzemeler	Bağlantı türü	Çalışma için seçilen parametreler	Optimum şartlar
(Sahu vd., 2017)	1	PP-Al alaşımı	Alın bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Takım ilerleme hızı	750 rpm dönme hızı, 25 mm/dak kaynak hızı, 0,1 mm dalma derinliği ve 2° eğim açısı için maksimum 120,79 N çekme yükü elde edilmiştir.
(Sahu vd., 2019)	2	PP-Al alaşımı	Alın bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Takım ilerleme hızı Takım geometrisi	Oluşlu kenar tabanlı tasarımda dişli pim kullanılarak 700 rpm takım dönme hızında ve 30 mm/dak ilerleme hızında maksimum birleştirme verimliliği %23,33 olarak bulunmuştur.
(Moghaniyan vd., 2019)	3	PP-Mg	Bindirme bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Takım ilerleme hızı	22,5 MPa maksimum çekme kesme mukavemetine 700 rpm ve 75 mm/dak'da ulaşılmıştır.
(Payganeh vd., 2011)	4	PP Kompozit-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım geometrisi Takım dönme hızı Doğrusal iş hızı Takım eğim açısı	Maksimum çekme dayanımı, 630 devir/dakikalık takım dönme hızı, 8 mm/dak doğrusal iş hızı, 2° eğim açısında elde edildi.
(Hajideh vd., 2018)	5	Kompozit PP-ABS-Bakır tozu	Alın bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Takım ilerleme hızı Isıtıcı Sıcaklığı	1600 rpm dönme hızı, 16 mm/dak ilerleme hızı ve 80 °C'lik ısıtıcı sıcaklığı, bağlantının en iyi mekanik özelliklerini sunmuştur.
(Mario A. Sánchez Miranda vd., 2023)	6	PP-UHMWPE	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Ön ısıtma	Maksimum çekme mukavemeti, 1100 rpm takım dönme hızı, 12 mm/dak takım ilerleme hızı ve ön ısıtmasız olarak elde edilmiştir.
(Hajideh vd., 2017)	7	PP-PE	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	1860 rpm'lik optimum takım dönme hızı ve 12,5 mm/dak'lık en yüksek takım ilerleme hızı ile her takım şekli için en iyi kaynak mekanik özellikleri elde edilmiştir.
(Eslami vd., 2015)	8	PP-PE	Bindirme bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	Maksimum çekme mukavemeti, üçgen pim şekli, 2500 rpm dönme hızı ve 100 mm/dak ilerleme hızı ile üretilen numunede meydana gelmiştir.
(M.A. Sánchez Miranda vd., 2022)	9	PP-ABS	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım yaklaşım hızı	Maksimum mekanik özellikler, 2000 rpm dönme hızı, 1,5-3 mm/dakika ilerleme hızı, 2,5 mm/dakika penetrasyon hızı, silindirik pim ile elde edilmiştir.
(Eslami vd., 2018)	10	PP-PE	Bindirme bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	Kaynak mukavemeti için optimum kaynak parametreleri; düz yüzeyli pim şekli, 2500 rpm dönme hızı, 20 mm/dak hareket hızı, 3 mm pim çapı ve 2,8 mm pim uzunluğudur.

Polipropilen ile Polipropilen Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Bu kısımda, polipropilen ile polipropilen malzemelerin SKK ile ilgili vaka çalışmaları ele alınmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

Vaka 1: Jaiganesh vd., 2014 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen levhanın sürtünme karıştırma kaynağında proses parametrelerinin optimizasyonu araştırılmıştır. Çalışmada, plakalar yarı otomatik SKK makinesinde uygun kelepçe ile sabitlenerek kaynak yapılmış ve fener milinin hızı 900-1200 rpm arasında, ilerleme aralığı 5-15 mm/dak ve eğim açısı 0°-1° olacak şekilde değiştirilmiştir. 5 mm kalınlığındaki polipropilen levha, kare, silindirik ve üçgen dişli pim profilleri ile birleştirilmiştir. Bağlantının kalitesi, çekme mukavemeti ve mikro yapısal analiz yoluyla değerlendirilmiştir (Jaiganesh, Maruthu, & Gopinath, 2014).

Vaka 2: Sahu vd., 2018 yılında yaptıkları çalışmada, termoplastiklerin birleştirilmesi için SKK işleminin uygulanması araştırılmıştır. Kaynak kalitesini araştırmak amacıyla silindirik, kare ve konik pim geometrisine sahip üç farklı takım kullanılmıştır. Proseslerin gerçekleştirilmesi için üç farklı takım dönüş hızı ve ilerleme hızı seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek kaliteli kaynakların elde edilmesinde kare pimin potansiyelini kanıtlamıştır. İşlem parametrelerinin, kaynakların çekme mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir (Sahu vd., 2018).

Vaka 3: Stadler vd., 2023 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklı polipropilen malzemenin dayanımı ve kaynak kuvvetleri incelenmiştir. Çalışmada, yöntemin polimerik malzemelerin kaynaklanması için uygulanabilirliği araştırılmış ve SKK parametrelerinin etkisini analiz edilmiştir. 4 mm kalınlığındaki

polipropilen levhalar, iki kaynak parametresi olarak takım dönme ve ilerleme hızı dört seviyede değiştirilerek kaynaklanmıştır. Bağlantının çekme mukavemeti ve dolayısıyla bağlanma verimliliği, dönme hızı arttıkça artmış, ilerleme hızı arttıkça ise azalmıştır (Stadler, Szebényi, & Horváth, 2023).

Vaka 4: Panneerselvam ve Lenin 2013 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma kaynak işleminde polipropilen levhanın farklı parametreler için etkileri ve kusurları incelenmiştir. Çalışmada, bağlantıların kalitesine göre SKK takım pimi profilinin, dönme hızının ve kaynak hızının rolü analiz edilmiştir. Prosesler 1500, 1750, 2000 ve 2250 devir/dakika dönüş hızlarında, 30, 40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızlarında ve takım pimi profilleri olan üçgen, kare, dişli ve konik pim profillerinde gerçekleştirilmiştir (Panneerselvam & Lenin, 2013).

Vaka 5: Lenin vd., 2014 yılında yaptıkları çalışmada, Taguchi yaklaşımı kullanılarak polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı için proses parametrelerinin optimizasyonu araştırılmıştır. Takım pimi profili, takım dönme ve ilerleme hızı gibi kaynak parametreleri, maksimum mukavemet ve minimum kusurla iyi bir kaynak bağlantısı üretmek amacıyla seçilmiştir. Proses parametrelerinin seçiminde maksimum dayanım dikkate alınmıştır. Çalışmada, kaynak parametrelerinin maksimum dayanım üzerindeki etkilerinin takım pimi profili, ilerleme hızı ve takım dönüş hızı şeklinde olduğu bulunmuştur (Lenin, Shabeer, Kumar, & Panneerselvam, 2014).

Vaka 6: Mirabzadeh vd., 2021 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma yöntemiyle kaynak yapılan polipropilen levhaların eğilme mukavemetinin optimize edilmesi araştırılmıştır.

Bu yöntemde üretilen bileşenlerin yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri büyük ölçüde dönme hızı, doğrusal hız, geometri ve takım eğimi parametrelerine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, kaynak eğilme mukavemetini araştırmak için bu parametrelerin etkisi üç farklı seviyede hem deneysel hem de istatistiksel olarak değerlendirilmiştir (Mirabzadeh, Parvaneh, & Ehsani, 2021).

Vaka 7: Nik vd., 2017 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağının takım pimi şeklinin polipropilene etkisi incelenmiştir. Proses parametreleri, 1500 rpm dönme hızı, 45 mm/dak. ilerleme hızı ve 1° eğim açısı belirlenerek sabitlenmiştir. Takım geometri şekilleri dikkate alınan ana parametrelerdir. Takım geometri şeklinin optimum tasarımları, bağlantının çekme dayanımına göre belirlenmiştir. Çalışma sonuçları aynı dönme hızı, ilerleme hızı ve eğim açısı ile optimum tasarımın elde edilebileceğini göstermiştir (Nik, Ishak, & Othman, 2017).

Vaka 8: Nath vd., 2021 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen levhanın sürtünme karıştırma kaynağı için yeni bir çift taraflı kaynak yaklaşımı araştırılmıştır. Takımın dönme hızının kaynaklı bağlantıların yapısı ve özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çift taraflı kaynak sırasında takıma uygulanan tork ve kuvvetler, tek taraflı kaynakla karşılaştırılmıştır. Çift taraflı kaynak tekniği, tek taraflı kaynakla elde edilen birleştirmelere göre çekme ve eğilme mukavemeti açısından daha üstün birleştirmeler sağladığı belirlenmiştir (Nath, Jha, Maji, & Barma, 2021).

Vaka 9: Moochani vd., 2019 yılında yaptıkları çalışmada, termoplastiklerin yeni bir ısı destekli takım tasarımı ile sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Takım sıcaklığı, dönme hızı ve ilerleme hızı dahil proses parametrelerinin polipropilen levhaların

mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi, Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Kaynaklı bağlantılar, ana malzemenin %96'sına kadar çekme mukavemeti ve %99'a kadar kopma uzaması göstermiştir (Moochani, Omidvar, Ghaffarian, & Goushegir, 2019).

Vaka 10: Nath vd., 2019 yılında yaptıkları çalışmada, polipropilen levhaların kaynağı için kendinden ısıtılmalı sürtünme karıştırma kaynağı takımı geliştirilmiştir. Kaynak sırasında takım pimine uygulanan mil torku ve çeşitli kuvvetler incelenmiştir. Her iki takımdan elde edilen kaynaklar, kaynak morfolojisini ve çekme mukavemetini analiz etmek amacıyla test edilmiştir. Kendinden ısıtılmalı SKK takımı, geleneksel SKK takımına kıyasla çekme mukavemeti açısından üstün mekanik özelliğe sahip dayanıklı kaynak üretebildiği bulunmuştur (Nath, Maji, & Barma, 2019).

Tablo 3: PP/PP Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Referans	Vaka	Malzemeler	Bağlantı türü	Çalışma için seçilen parametreler	Optimum şartlar
(Jaiganesh vd., 2014)	1	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi Takım eğim açısı	950 ila 1000 rpm dönme hızı, 9 ila 12 mm/dak ilerleme hızı ve 1° eğim açısı ile üstün bir kaynak elde edilmiştir.
(Sahu vd., 2018)	2	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	Maksimum çekme dayanımı, 750 rpm takım dönme hızında, 15 mm/dak. takım ilerleme hızında kare pim geometrik şeklinde elde edilmiştir.
(Stadler vd., 2023)	3	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı	Testlerde en iyi bağlantı verimi, 1500 rpm dönme hızı ve 50 mm/dak. ilerleme hızında elde edilmiş olup, bağlantı verimi %34 olarak bulunmuştur.
(Panneerselvam & Lenin, 2013)	4	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	En uygun numuneler, 40 ve 50 mm/dk ilerleme hızı ve 2250 ve 1500 rpm dönme hızına sahip dişli pim profili ile oluşturulmuştur.
(Lenin vd., 2014)	5	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım geometrisi	SKK parametrelerinin optimum kombinasyonu dişli pim profili, 60 mm/dak ilerleme hızı ve 1500 rpm takım dönme hızıdır.
(Mirabzadeh vd., 2021)	6	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Takım ilerleme hızı Takım eğim açısı Takım çapı oranı	İstatistiksel modelin optimal yanıtına dayanarak, dönme hızı 997 dev/dak, takım çapı oranı 2, takım eğim açısı 2° ve takım ilerleme hızı 30 mm/dak kullanılarak maksimum eğilme mukavemeti elde edilmiştir.
(Nik vd., 2017)	7	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım geometrisi	En yüksek çekme mukavemeti, silindirik konik pim şekilli takımla elde edilmiştir.
(Nath vd., 2021)	8	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım dönme hızı Kaynak tekniği	Çift taraflı kaynak durumunda, 750 rpm'lik takım dönme hızı 15,4 MPa'lık en yüksek çekme mukavemeti sağlanmıştır.
(Moochani vd., 2019)	9	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım dönme hızı Takım sıcaklığı	Maksimum çekme dayanımı, 565 rpm takım dönme hızında, 24 mm/dak. takım ilerleme hızında 150 °C takım sıcaklığında elde edilmiştir.
(Nath vd., 2019)	10	PP-PP	Alın bağlantı kaynak	Takım ilerleme hızı Takım tipi	Kendinden ısıtılmalı takım ile 0,3 mm/sn ilerleme hızında kaynak yapılan numune için 16,13 MPa'lık en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir.

Sonuç

SKK ve SKNK yöntemleri metal ve metal olmayan malzemelerin ekonomik, çevre dostu ve verimli bir şekilde birleştirilebilmesi için kullanılan katı hal birleştirme teknikleridir. SKK işleminde, özel konturlara sahip pim ve omuzlardan oluşan bir takımın, birleştirilecek malzemelerin yüzeyleri üzerinde dönmesi ve ileri doğru hareket etmesi nedeniyle meydana gelir. Takımın yüzeye uyguladığı basınç ve dönme hareketi, yüzeyde sürtünme ve ısı üretir. Bu, kaynak yapılacak malzemeyi yumuşatır ve özel şekillendirilmiş pimler ile kaynakta karışıma neden olur. Böylece takımın ilerleme hareketi, kaynağı belirtilen hat boyunca oluşturur. SKNK yönteminde ise, SKK işleminden farklı olarak kaynak takımı dikey doğrultudaki hareket dışında herhangi bir yönde hareket etmemektedir. SKK ve SKNK birleştirme yöntemlerinin çeşitli metal ve polimer malzemelere uygulandığı görülmektedir.

Son yıllarda SKK ve SKNK birleştirme yöntemlerinde polimer malzemelerin kullanımının arttığı görülmektedir. Bu polimer malzemelerden biri de polipropilen termoplastıdır. Polipropilen malzemenin fiziksel ve kimyasal avantajlarından dolayı endüstride otomotiv, inşaat, tekstil kimya ve gıda gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, birçok sektörde sıklıkla kullanılan polipropilen malzemeler hakkında, SKK ve SKNK birleştirme yöntemleri, üretim parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca PP/PP ve PP/diğer malzemelerin SKK ve SKNK birleştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarla ilgili proses parametreleri, uygulamaları ve optimum şartları araştırmacılar için ele alınmıştır. Ayrıca, incelenen makalelerden elde edilen veriler

tablolar halinde verilerek, ilgi duyan araştırmacıların, konu hakkında daha detaylı bilgi edinmesine olanak sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, SKK ve SKNK yöntemlerinde kaynak kalitesi için proses parametrelerinin optimizasyonunun ve takım tasarımının çok önemli olduğu görölmüştür.

KAYNAKÇA

Alsabri, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2245-2251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>

Ambrosio, D., Morisada, Y., Ushioda, K., & Fujii, H. (2023). Material flow in friction stir welding: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 320, 118116. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118116>

Arici, A., & Mert, Ş. (2008). Friction stir spot welding of polypropylene. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(18), 2001-2004. <https://doi.org/10.1177/0731684408089134>

Barenji, R. V. (2016). Effect of tool traverse speed on microstructure and mechanical performance of friction stir welded 7020 aluminum alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(2), 663-673. <https://doi.org/10.1177/1464420715584950>

Bilici, M. K. (2012). Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets. *Express Polymer Letters*, 6(10), 805-813. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.86>

Bilici, Mustafa Kemal. (2012). Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. *Materials & Design*, 35, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.033>

Bilici, Mustafa Kemal. (2014). Effect of the tool geometry and welding parameters on the macrostructure, fracture mode and weld strength of friction-stir spot-welded polypropylene sheets. *Materiali in Tehnologije*, 48 (5), 705-711.

Bilici, Mustafa Kemal. (2021). Investigation of friction stir spot welding of high density polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Elastomers & Plastics*, 53(7), 922-940. <https://doi.org/10.1177/00952443211001526>

Bîrcă, A., Gherasim, O., Grumezescu, V., & Grumezescu, A. M. (2019). Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. *Încinde Materials for Biomedical Engineering* (ss. 1-28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816874-5.00001-3>

Çevik, B. (2014). Polimer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2, 271-277.

Das, A., Chatham, C. A., Fallon, J. J., Zawaski, C. E., Gilmer, E. L., Williams, C. B., & Bortner, M. J. (2020). Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing*, 34, 101218. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>

Elsheikh, A. H. (2023). Applications of machine learning in friction stir welding: Prediction of joint properties, real-time control and tool failure diagnosis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105961>

Eslami, S., De Figueiredo, M. A. V., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2018). Parameter optimisation of friction stir welded dissimilar polymers joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5-8), 1759-1770. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0043-5>

Eslami, S., Ramos, T., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2015). Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers. *Procedia Engineering*, 114, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.059>

Gite, R. A., Loharkar, P. K., & Shimpi, R. (2019). Friction stir welding parameters and application: A review. *Materials Today: Proceedings*, 19, 361-365. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.613>

Hajideh, M. R., Farahani, M., Alavi, S. A. D., & Molla Ramezani, N. (2017). Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>

Hajideh, M. R., Farahani, M., & Molla Ramezani, N. (2018). Reinforced dissimilar friction stir weld of polypropylene to acrylonitrile butadiene styrene with copper nanopowder. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.010>

He, X., Gu, F., & Ball, A. (2014). A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*, 65, 1-66. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.003>

Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T., & Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11), 1455-1463. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.04.003>

Jaiganesh, V., Maruthu, B., & Gopinath, E. (2014). Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate. *Procedia Engineering*, 97, 1957-1965. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.350>

Kurtulmus, M. (2012). Friction stir spot welding parameters for polypropylene sheets. *Scientific Research and Essays*, 7(8). <https://doi.org/10.5897/SRE11.1909>

Lenin, K., Shabeer, H. A., Kumar, K. S., & Panneerselvam, K. (2014). Process parameters optimization for friction stir welding of polypropylene material using Taguchi's approach. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 73, 369-374.

Lin, T. A., Lin, J.-H., & Bao, L. (2021). A study of reusability assessment and thermal behaviors for thermoplastic composite materials after melting process: Polypropylene/ thermoplastic polyurethane blends. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123473>

Mirabzadeh, R., Parvaneh, V., & Ehsani, A. (2021). Estimating and optimizing the flexural strength of bonding welded polypropylene sheets by friction-stir welding method. *Proceedings*

of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 235(1), 73-86. <https://doi.org/10.1177/1464420720951972>

Miranda, M.A. Sánchez, Almaraz, G. M. D., López, J. J. V., & Vilchez, J. A. R. (2022). Dissimilar joining of ABS and PP using friction stir welding (FSW) and mechanical properties evaluation. *Procedia Structural Integrity*, 39, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.085>

Miranda, Mario A. Sánchez, Almaraz, G. M. D., López, J. J. V., Dominguez, A. E., Vilchez, J. A. R., & Juarez, J. C. V. (2023). Welding of two dissimilar polymers UHMWPE and PP, using friction stir welding and evaluation of mechanical properties. *Procedia Structural Integrity*, 47, 310-324. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.094>

Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1-2), 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>

Moghanian, A., Paidar, M., Seyedafghahi, S. S., & Ojo, O. O. (2019). Friction stir welding of pure magnesium and polypropylene in a lap-joint configuration: Microstructure and mechanical properties. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(6), 766-774. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1784-y>

Moochani, A., Omidvar, H., Ghaffarian, S. R., & Goushegir, S. M. (2019). Friction stir welding of thermoplastics with a new heat-assisted tool design: Mechanical properties and microstructure.

Welding in the World, 63(1), 181-190.
<https://doi.org/10.1007/s40194-018-00677-x>

Nath, R. K., Jha, V., Maji, P., & Barma, J. D. (2021). A novel double-side welding approach for friction stir welding of polypropylene plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(3-4), 691-703.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06602-9>

Nath, R. K., Maji, P., & Barma, J. D. (2019). Development of a self-heated friction stir welding tool for welding of polypropylene sheets. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), 553.
<https://doi.org/10.1007/s40430-019-2059-2>

Nik, Z. C., Ishak, M., & Othman, N. H. (2017). The effect of tool pin shape of friction stir welding (FSW) on polypropylene. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 238, 012003.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/238/1/012003>

Nugroho, A. W., Dadang Dika, O. H., Budiyanoro, C., & Himarosa, R. A. (2021). Characterization of polypropylene sheet friction stir spot welded joint. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012007>

Paidar, M., Ojo, O. O., Moghanian, A., Pabandi, H. K., & Elsa, M. (2019). Pre-threaded hole friction stir spot welding of AA2219/PP-C30S sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 273, 116272.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116272>

Panneerselvam, K., & Lenin, K. (2013). Effects and defects of the polypropylene plate for different parameters in friction stir

welding process. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 02(02), 143-152. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0202010>

Parit, M., & Jiang, Z. (2020). Towards lignin derived thermoplastic polymers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 3180-3197. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.173>

Payganeh, G. H., Arab, N. B. M., Asl, Y. D., Ghasemi, F. A., & Boroujeni, M. S. (2011). Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds. *Int. J. Phys. Sci.*, Vol. 6(19), 4595-4601.

Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Eyvazian, A. (2020). Friction-based welding processes: Friction welding and friction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(24), 2613-2637. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1780716>

Ramya, G., Pounrajan, S., Prasad, D. V. S. S. S. V., Soni, S., Ravichandran, P., Kosanam, K., ... Shaik, B. (2022). Assessment of rotational speed and plunge rate on lap shear strength of FSSW joints of AA7075/Mild steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/6215249>

Sahu, S. K., Mishra, D., Mahto, R. P., Sharma, V. M., Pal, S. K., Pal, K., ... Dash, P. (2018). Friction stir welding of polypropylene sheet. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(2), 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.03.002>

Sahu, S. K., Pal, K., Mahto, R. P., & Dash, P. (2019). Monitoring of friction stir welding for dissimilar Al 6063 alloy to polypropylene using sensor signals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1-4), 159-177. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03855-3>

Sahu, S. K., Panda, M., Mahto, R. P., Pal, S. K., Pal, K., & Dash, P. (2017). Experimental investigation to join Al 6063 alloy to polypropylene using friction stir welding. pp 727-731. Indian Institute of Technology Madras, Chennai - 600036 India,.

Sathyaseelan, P., Manickavasagam, V. M., Ravichandran, P., Prasad, D. V. S. S. V., Ramana Murty Naidu, S. C. V., Pradeep Kumar, S., ... Kerga, G. A. (2022). Effect of dwell time on fracture load of friction stir spot welded dissimilar metal joints. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2022/2163507>

Sharma, A., Khan, Z. A., & Siddiquee, A. N. (2022). A short review of the effect of plunge depth on friction stir welding of aluminium pipes. *Materials Today: Proceedings*, Volume 64, Part 3, ISSN 2214-7853, Pages 1504-1506,. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.257>

Sidhom, A. A. E., Naga, S. A. R., & Kamal, A. M. (2022). Friction stir spot welding of similar and dissimilar high density polyethylene and polypropylene sheets. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 4, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100076>

Singh, R. P., Dubey, S., Singh, A., & Kumar, S. (2021). A review paper on friction stir welding process. *Materials Today: Proceedings*, 38, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.208>

Somashekhar, S., Shanthakumar, G. C., & Nagamadhu, M. (2020). Influence of fiber content and screw speed on the mechanical characterization of jute fiber reinforced polypropylene composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 24, 2366-2374. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.766>

Soori, M., Asmael, M., & Solyalı, D. (2020). Recent development in friction stir welding process: A review. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 14(1), 05-14-01-0006. <https://doi.org/10.4271/05-14-01-0006>

Spoerk, M., Holzer, C., & Gonzalez-Gutierrez, J. (2020). Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(12), 48545. <https://doi.org/10.1002/app.48545>

Stadler, G. R., Szabényi, G., & Horváth, R. (2023). Investigation of weld forces and strength of friction stir welded polypropylene. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 67(3), 183-189. <https://doi.org/10.3311/PPme.21899>

Trimech, M., Annan, C. D., Walbridge, S., & Maljaars, J. (2023). Fatigue behaviour of butt-lap friction stir welded joints used with aluminum bridge decks. *Structures*, 51, 1795-1805. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.151>

Zhai, M., Wu, C., & Su, H. (2020). Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding. *Journal of*

Manufacturing Processes, 59, 98-112.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.038>