

## ANALISIS BIODEGRADABLE DAN KEKUATAN TARIK BENANG DARI POLYCAPROLACTONE (PCL) DENGAN METODE WET SPINNING

\*Adam Dharmawan<sup>1</sup>, Agus Suprihanto<sup>2</sup>, Gunawan Dwi Haryadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: adamdharmawan376@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat biodegradabilitas serta kekuatan tarik benang yang dihasilkan dari material PCL menggunakan metode *wet spinning*. Larutan PCL dengan konsentrasi 20% w/v dilarutkan pada kloroform dan diekstrusi melalui *needle tip* 21G ke dalam bak koagulasi berisi etanol 96% pada suhu ruang untuk membentuk filamen padat. Spesimen kemudian dikeringkan lalu dipintal dengan variasi 2 *ply*, 3 *ply* dan 4 *ply* dan diuji menggunakan uji tarik berdasarkan standar ASTM D2256. Selain itu, pengujian biodegradasi dilakukan dengan merendam benang dalam larutan infus NaCl selama periode waktu tertentu untuk mengamati perubahan massa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa benang PCL mengalami penurunan massa secara bertahap selama perendaman, menandakan terjadinya proses biodegradasi. Secara keseluruhan, benang PCL hasil *wet spinning* menunjukkan potensi yang baik sebagai material biodegradable dengan kekuatan mekanik yang memadai untuk aplikasi biomedis maupun tekstil ramah lingkungan.

**Kata Kunci:** benang polimer; biodegradabilitas; kekuatan tarik; *polycaprolactone*; *wet spinning*

### Abstract

*This study aims to analyze the biodegradability and tensile strength of yarn produced from PCL material using the wet spinning method. A PCL solution with a concentration of 20% w/v was dissolved in chloroform and extruded through a 21G needle tip into a coagulation bath containing 96% ethanol at room temperature to form solid filaments. The specimens were then dried and spun in 2 ply, 3 ply, and 4 ply variations and tested using a tensile test based on the ASTM D2256 standard. In addition, biodegradation testing was carried out by immersing the yarn in a NaCl infusion solution for a certain period of time to observe changes in mass. The results showed that PCL yarn experienced a gradual decrease in mass during immersion, indicating the occurrence of a biodegradation process. Overall, wet-spun PCL yarn shows good potential as a biodegradable material with adequate mechanical strength for biomedical and eco-friendly textile applications.*

**Keywords:** biodegradability; *polycaprolactone*; polymer yarn; tensile strength; *wet spinning*

### 1. Pendahuluan

*Polycaprolactone* (PCL) adalah polimer semikristalin yang bermanfaat pada kehidupan sehari-hari terutama pada aplikasi biomedis karena sifat-sifat unik yang dimilikinya, seperti *bio-absorbability*, biokompatibilitas, dan biodegradabilitas. Harganya yang terjangkau dan *versatility* yang tinggi membuat PCL menjadi salah satu material yang unggul dan serbaguna. Produk berbasis serat yang dihasilkan dari PCL memiliki potensi besar untuk dikembangkan. PCL juga memiliki sifat mekanik yang unggul. PCL disintesis melalui proses polimerisasi kimia (Ikhtiarini et al., 2025).

Teknik *wet spinning* adalah metode yang banyak digunakan dalam produksi serat polimer, termasuk PCL. Proses ini melibatkan pelarutan polimer dalam pelarut yang sesuai, kemudian larutan tersebut diekstrusi melalui spinneret ke dalam *bath* koagulasi, di mana polimer mengalami pengerasan dan membentuk serat. Untuk mendapatkan serat dengan kualitas optimal, pemilihan pelarut yang tepat serta pengaturan kondisi pemrosesan menjadi faktor krusial. Misalnya, perubahan dalam kecepatan ekstrusi atau komposisi *bath* koagulasi dapat mempengaruhi struktur mikro dan makro serat, yang berdampak pada sifat fisik serta mekaniknya. Oleh karena itu, Analisis komprehensif terhadap proses *wet spinning* diperlukan guna memahami interaksi antara berbagai parameter dan efeknya terhadap karakteristik akhir serat (Bi et al., 2025).

Penelitian ini berfokus pada analisis proses pembuatan kain dari serat-serat PCL yang telah diekstrusi berdasarkan beberapa parameter dan pengaruhnya terhadap kualitas kain. Dengan menganalisis faktor-faktor utama dalam proses *wet spinning*, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam untuk mengoptimalkan produksi serat PCL serta

memperluas penggunaannya di berbagai sektor industri. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam kemajuan teknologi serat polimer, terutama dalam penerapannya di bidang industri dan medis.

## 2. Dasar Teori

Biomaterial merupakan bahan sintetis atau alami yang dirancang untuk dimasukkan ke dalam jaringan hidup, pada dunia medis umumnya berupa bagian dari perangkat medis atau implan. Bahan alami ini contohnya seperti polimer atau logam. Biomaterial memiliki sifat khusus yang memungkinkan mereka berinteraksi dengan jaringan hidup tanpa memicu reaksi penolakan dari sistem imun tubuh.

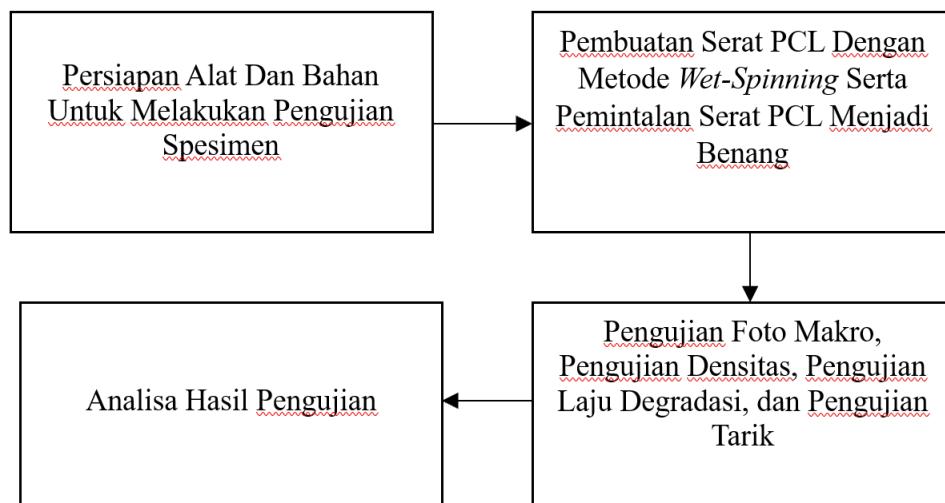
Polycaprolactone (PCL) adalah jenis biodegradable polyester yang bersifat semi-kristalin, memiliki ketahanan mekanik yang baik, serta dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme dalam lingkungan tertentu. PCL memiliki titik leleh rendah, sekitar 59–64°C, dan larut dalam berbagai pelarut organik seperti kloroform. PCL adalah bahan penghantaran obat yang sangat serbaguna karena dapat membungkus berbagai macam obat-obatan, bersifat biokompatibel, *biodegradable*, serta dapat dimanipulasi menjadi nanopartikel dan mikropartikel untuk penghantaran obat yang tepat (Singh et al., 2019).

Metode *wet spinning* adalah proses pembuatan serat yang melibatkan penggunaan larutan polimer yang disuntikkan melalui spinneret ke dalam bath koagulasi. Dalam proses ini, polimer dilarutkan dalam pelarut yang sesuai untuk menghasilkan larutan homogen. Larutan ini kemudian diekstrusi melalui spinneret ke dalam bath koagulasi yang mengandung non-pelarut. *Wet spinning* memungkinkan kontrol yang tepat atas ukuran dan bentuk serat, memungkinkan peningkatan sifat mekanik dan kinerja piezoelektrik melalui penyesuaian orientasi serat dan kristalinitas (Pan et al., 2024).

Filamen adalah serat tekstil fundamental yang memiliki oleh panjangnya yang tidak terbatas atau sangat panjang secara kontinu. Filamen dapat berupa monofilamen (terdiri dari satu helai tunggal) atau multifilamen (gabungan banyak helai filamen halus), masing-masing menawarkan karakteristik unik untuk berbagai aplikasi tekstil. Komposisi campuran polimer dan proses ekstrusi berperan pada kualitas filamen yang dihasilkan (Logar et al., 2025).

## 3. Metode Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat diperhatikan pada Gambar 1. pada gambar diperlihatkan cara pembuatan spesimen dan pengujian-pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanis benang *polycaprolactone* (PCL).



Gambar 1. Diagram Blok Penelitian.

### 3.1 Proses Pembentukan Benang

Proses pemintalan serat *polycaprolactone* (PCL) dengan metode *twisting* menggunakan *spindle* dilakukan untuk mengubah kumpulan serat tunggal menjadi benang yang memiliki kekuatan dan kohesi lebih baik. Tahapan diawali dengan menyiapkan beberapa helai serat PCL yang telah dikeringkan dan memiliki panjang seragam. Serat-serat tersebut kemudian diajarkan sejajar agar distribusi tegangan selama pemintalan merata. Selanjutnya, kumpulan serat ditempatkan pada *spindle*, yaitu alat pemutar yang berfungsi memberikan putaran (*twist*) sepanjang arah serat. Pemintalan dilakukan dengan memutar *spindle* pada kecepatan tertentu sehingga serat mengalami gaya torsi yang menyebabkan serat-serat saling melilit dan berikatan secara mekanis.

### 3.2 Uji Densitas

Pengujian densitas adalah metode yang digunakan untuk menentukan massa per satuan volume suatu material. Parameter densitas memiliki peranan penting dalam karakterisasi material karena berkaitan langsung dengan sifat fisik seperti kekuatan, kekerasan, dan stabilitas struktural.

### 3.3 Uji Laju Degradasi

Dalam ilmu material, degradasi merujuk pada proses perubahan yang menyebabkan penurunan kinerja atau kualitas material seiring waktu. Pengukuran laju degradasi sering dilakukan dengan merendam sampel dalam larutan tertentu dan mengamati perubahan berat atau massa setelah jangka waktu tertentu.

### 3.4 Uji Makrografi

Analisis foto makro merupakan metode visual yang diterapkan untuk mengamati permukaan sampel pada skala makro dengan tetap mempertahankan detail yang signifikan. Teknik ini sangat berguna untuk mengidentifikasi fitur-fitur fisik krusial, seperti tekstur, pola retakan, dan distribusi material, yang tidak dapat terlihat hanya dengan pengamatan mata telanjang.

### 3.5 Uji Tarik

Uji tarik merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik suatu material melalui pemberian beban tarik secara aksial hingga material mengalami deformasi dan akhirnya mengalami kegagalan atau patah. Dalam pengujian ini, spesimen uji ditarik dengan gaya yang meningkat secara bertahap menggunakan mesin uji tarik, sementara perubahan panjang dan gaya yang bekerja dicatat secara simultan.

## 4. Hasil dan Pembahasan

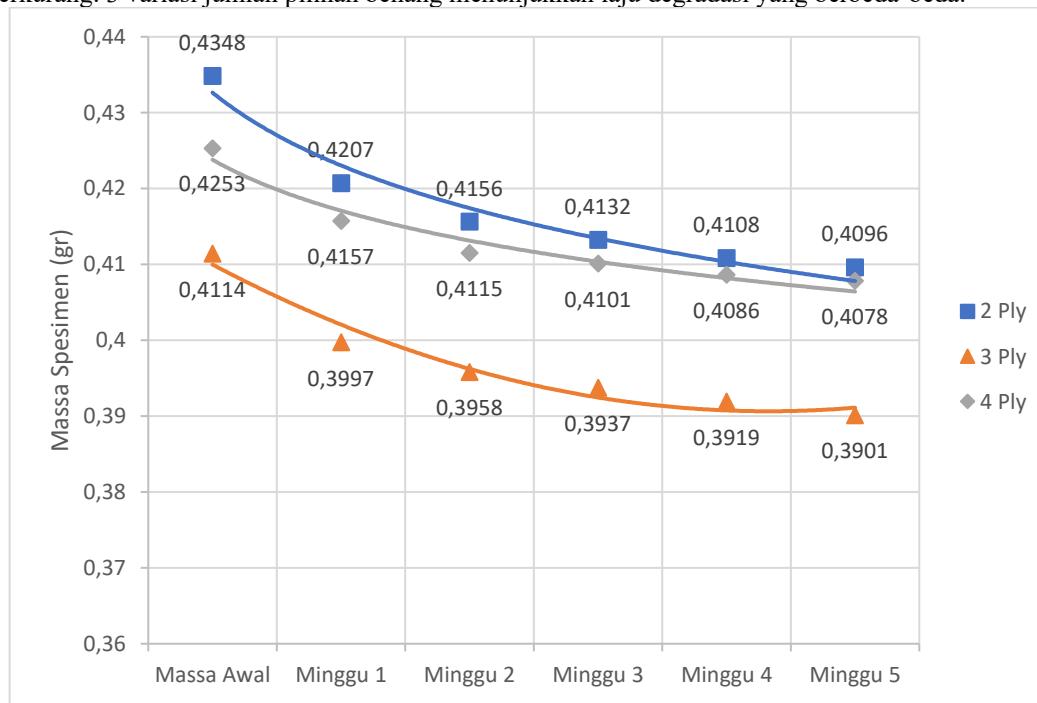
### 4.1 Uji Densitas

Densitas dari serat PCL diukur menggunakan alat *Quantachrome Ultrapyc 1200e* dengan pengujian pertama dengan volume 6,7476 cc memiliki densitas senilai 0,1626 g/cc. Pengujian kedua dengan volume 6,6564 cc memiliki densitas senilai 0,1648 g/cc. Lalu, pengujian ketiga dengan volume 6,7319 cc diperoleh densitas sebesar 0,1630 g/cc.

Setelah melakukan pengujian dengan 3 *runs*, bisa diambil rata-rata densitas serat PCL sebesar 0,1635 g/cc. Dapat ditarik Kesimpulan untuk setiap variasi benang PCL densitasnya tidak akan jauh berbeda karena komposisi penyusunnya sama, yaitu 2 gram PCL dengan 10 mL kloroform (konsentrasi 20%).

### 4.2 Uji Laju Degradasi

Hasil dari pengujian laju degradasi benang yang terbuat dari *Polycaprolactone* (PCL) selama 5 minggu di larutan infus NaCl 0,9% dapat dilihat pada Gambar 2. Seiring bertambahnya waktu perendaman, massa spesimen juga akan semakin berkurang. 3 variasi jumlah pilinan benang menunjukkan laju degradasi yang berbeda-beda.

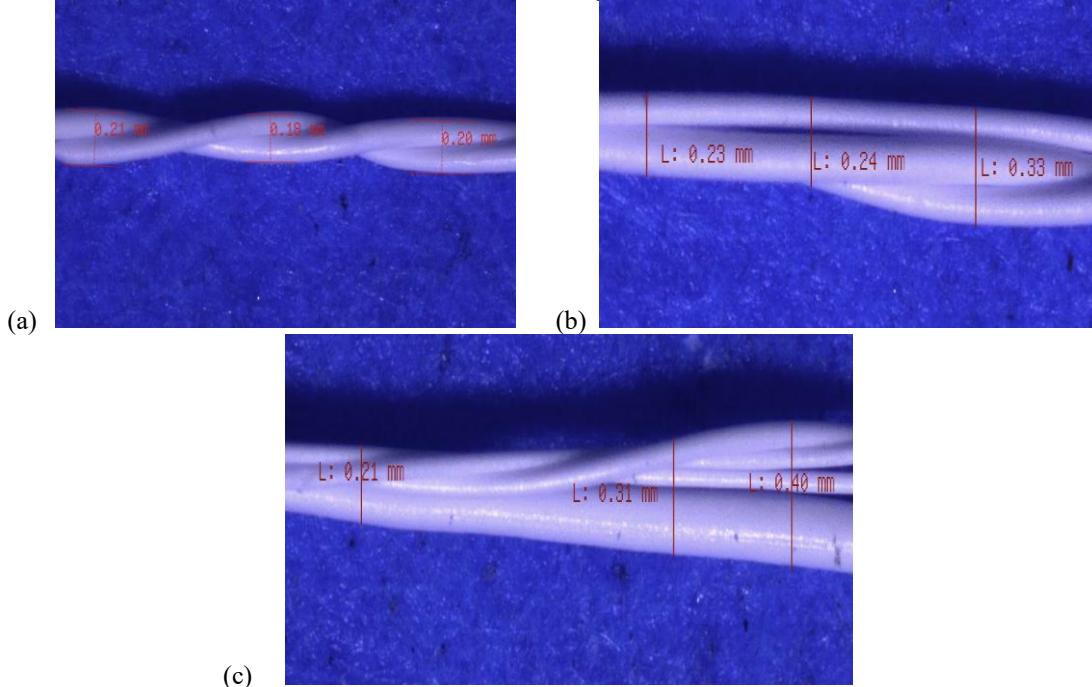


Gambar 2. Grafik Perubahan Massa Benang.

Secara umum, seluruh spesimen menunjukkan penurunan massa seiring bertambahnya waktu, menandakan terjadinya proses degradasi polimer akibat interaksi dengan medium cair. Namun, laju penurunan massa paling besar terjadi pada benang 2 *ply*, di mana massa awal sebesar 0,4348 gram menurun hingga 0,4096 gram pada minggu kelima atau setara dengan kehilangan 5,78% massa awalnya. Penurunan ini lebih signifikan dibandingkan benang 3 *ply* dan 4 *ply*, yang masing-masing memiliki massa awal 0,4114 gram dan 0,4253 gram menjadi 0,3901 gram dan 0,4078 gram dari massa awal di minggu terakhir. Penurunan massa yang terjadi pada benang 2 *ply* dan 3 *ply* setara dengan kehilangan 5,18% dan 4,12% dari massa awalnya.

#### 4.3 Uji Makrografi

Serat yang dihasilkan dari *needle tip 21G* yang diamati pada uji foto makro ini memiliki diameter yang seragam, yaitu sebesar 0,9 mm. Satu helai serat ini akan dipintal untuk memperkuat sifat mekanisnya dan membentuk benang. Benang PCL dengan variasi 2 *ply*, 3 *ply*, dan 4 *ply* dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.

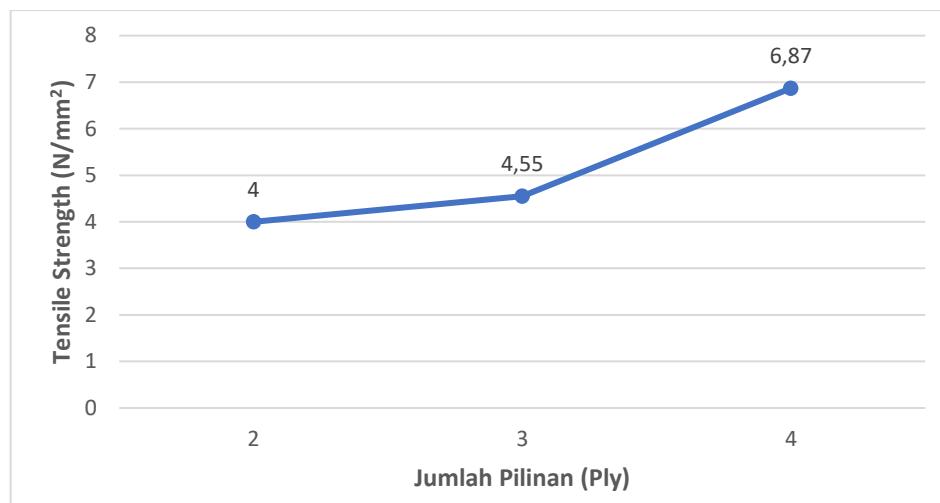


**Gambar 3.** Foto Makro Benang PCL. (a) Benang 2 *Ply*. (b) Benang 3 *Ply*. (c) Benang 3 *Ply*.

Dari foto makro tersebut, terdapat beberapa titik di mana diameter benang tidak seragam. Oleh karena itu, dapat dilakukan pencarian rata-rata dari titik-titik tersebut untuk mewakili diameter benang. Setelah dilakukan pencarian rata-rata diperoleh bahwa masing-masing diameter benang secara berurutan adalah 0,20 mm, 0,25 mm, dan 0,31 mm.

#### 4.4 Uji Tarik

Terlihat pada Gambar 4 bahwa peningkatan jumlah pilinan dari 2 hingga 4 *ply* menyebabkan kenaikan signifikan pada nilai *tensile strength*. Pada 2 *ply*, kekuatan tarik benang memiliki nilai sebesar 4 N/mm<sup>2</sup>, meningkat menjadi 4,55 N/mm<sup>2</sup> pada 3 *ply*, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 6,87 N/mm<sup>2</sup> pada 4 *ply*. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah pilinan, gaya tarik yang dapat ditahan oleh benang semakin besar. Peningkatan ini dapat dijelaskan secara mekanis bahwa proses pemintalan memperkuat ikatan antar serat melalui peningkatan gaya gesek internal dan distribusi tegangan yang lebih merata di sepanjang struktur benang. Akibatnya, benang menjadi lebih kompak dan memiliki daya tahan lebih tinggi terhadap beban tarik. Dengan demikian, penambahan jumlah *ply* berperan penting dalam meningkatkan performa mekanik benang melalui peningkatan interaksi antar filamen yang efektif.



**Gambar 4.** Grafik Hubungan Jumlah Pilinan Benang dengan *Tensile Strength* Benang.

## 5. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini akan dijelaskan pada uraian berikut:

1. Kekuatan tarik benang yang terbuat dari PCL dipengaruhi oleh banyaknya jumlah pilinan pada benang tersebut. Benang 2 ply memiliki tensile strength sebesar 4,00 N/mm<sup>2</sup> dengan elongasi 146,82%, benang 3 ply memiliki tensile strength sebesar 4,55 N/mm<sup>2</sup> dengan elongasi 136,85%, dan benang 4 ply memiliki tensile strength sebesar 6,87 N/mm<sup>2</sup> dengan elongasi 119,24%. Semakin banyak jumlah pilinan maka semakin besar juga nilai tensile strength benang, tetapi persen elongasi akan menurun.
2. Laju degradasi benang PCL dipengaruhi oleh banyaknya jumlah pilinan pada benang tersebut. Benang 2 ply mengalami penurunan massa sebesar 5,78% massa awalnya, benang 3 ply mengalami penurunan massa sebesar 5,18% massa awalnya, dan benang 4 ply mengalami penurunan massa sebesar 4,12% massa awalnya. Semakin banyak jumlah pilinan maka semakin sedikit massa yang terdegradasi pada waktu yang sama. Hal ini terjadi karena kerapatan struktur pilinan menghambat penetrasi air infus ke dalam matriks polimer.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] Afewerki, S., Harb, S. V., Stocco, T. D., Ruiz-Esparza, G. U., & Lobo, A. O. (2023). Polymers for surgical sutures. In Advanced Technologies and Polymer Materials for Surgical Sutures (pp. 95–128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819750-9.00004-8>
- [2] Bi, X., Li, J., Guo, J., & Yu, C. (2025). A novel in-situ crosslinking wet spinning method for promoting the strength of CNC/alginate fiber. *Polymer*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128313>
- [3] Ikhtiarini, N., Kamil, M. Z., Bukit, B. F., Juliadmi, D., Prasetyo, K. W., Fransiska, D., Sedayu, B. B., Subiyanto, B., Sulastiningsih, I. M., Rochima, E., Arivendan, A., & Syamani, F. A. (2025). Biocompatible composites based on alginate, polycaprolactone, and nanocellulose - A review. In International Journal of Biological Macromolecules (Vol. 311). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143423>
- [4] Logar, M., Prebeg, T., Fiala, E. N., Vrsaljko, D., & Matijašić, G. (2025). Production and evaluation of polymer filaments for potential use in 3D printing of bioreversible drug-eluting stents. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.106544>
- [5] Maqsood, M., & Seide, G. (2018). Statistical Modeling of Thermal Properties of Biobased Compostable Gloves Developed from Sustainable Polymer. *Fibers and Polymers*, 19(5), 1094–1101. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-1126-0>
- [6] Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (n.d.). Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices.
- [7] Mirbagheri, M., Mohebbi-kalhori, D., & Jirofti, N. (2017). Evaluation of Mechanical Properties and Medical Applications of Polycaprolactone Small Diameter Artificial Blood Vessels. *International Journal of Basic Science in Medicine*, 2(1), 58–70. <https://doi.org/10.15171/ijbsm.2017.12>
- [8] Ochanda, F. (2012). Polyacrylonitrile-Metal Organic Framework (MOF) Composite Electrospun Nanofibers Designed to Remove Chemical Warfare Agent Simulants from a Solution. <https://www.researchgate.net/publication/263315176>
- [9] Paetzold, R., Coulter, F. B., Singh, G., Kelly, D. J., & O'Cearbhaill, E. D. (2022). Fused filament fabrication of polycaprolactone bioscaffolds: Influence of fabrication parameters and thermal environment on geometric fidelity and mechanical properties. *Bioprinting*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2022.e00206>

- 
- [10] S. Palla and S Anitha, "Anthropometric Examination of Footprints in South Indian Population for Sex Estimation," *Forensic Science International: Reports*, pp. 100354–100354, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2024.100354>.
  - [11] Pan, L., Wang, Y., Jin, Q., Wu, D., Zhu, L., Zhou, Z., & Zhu, M. (2024). Scalable wet-spinning multilevel anisotropic structured PVDF fibers enhanced with cellulose nanocrystals-exfoliated MoS<sub>2</sub> for high-performance piezoelectric textiles. *Chemical Engineering Journal*, 497. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155671>
  - [12] E. C. Silva *et al.*, "3D facial anthropometry of Chilean workers and migrants: Cross-country comparisons and insights for PPE design," *Applied Ergonomics*, vol. 128, pp. 104551–104551, May 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104551>.
  - [13] R. Alharbi, A., M. Alarifi, I., S. Khan, W., & Asmatulu, R. (2016). Highly Hydrophilic Electrospun Polyacrylonitrile/ Polyvinylpyrro-lidone Nanofibers Incorporated with Gentamicin as Filter Medium for Dam Water and Wastewater Treatment. *Journal of Membrane and Separation Technology*, 5(2), 38–56. <https://doi.org/10.6000/1929-6037.2016.05.02>.
  - [14] Razzaq, S., Shahid, S., & Nawab, Y. (2024). Applications and environmental impact of biodegradable polymers in textile industry: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 282). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136791>