

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehilangan bagian tungkai bawah, terutama di area bawah lutut, dapat memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan bergerak serta kualitas hidup penderitanya. Untuk membantu memulihkan fungsi gerak, penggunaan alat prostetik seperti kaki buatan menjadi pilihan yang umum. Salah satu bagian yang memiliki peran krusial adalah soket prostetik, yang berfungsi sebagai sambungan utama antara tunggul kaki dan bagian prostetik lainnya. (Suryawan dkk., 2019). Meskipun demikian, proses perancangan soket yang benar benar cocok masih menjadi tantangan karena harus dapat mengikuti bentuk anatomi pengguna serta memberikan kenyamanan optimal (Mendaza-DeCal dkk., 2023). Permasalahan muncul Ketika diperlukan pengurangan massa untuk meningkatkan kenyamanan dan efisiensi waktu cetak, tetapi di sisi lain soket tetap harus memiliki kekuatan dan ketahanan yang cukup untuk menopang beban aktivitas sehari hari hingga beban puncak.

Kemajuan teknologi manufaktur aditif, khususnya metode *fused deposition modelling* (FDM), menghadirkan alternatif yang lebih fleksibel, ekonomis, serta mudah disesuaikan berdasarkan data hasil pemindaian anatomi. Proses digital terintegrasi mulai dari pemindaian, perancangan hingga pencetakan mampu mempercepat waktu produksi, mengurangi biaya pembuatan soket dan memungkinkan proses manufaktur dilakukan lebih dekat dengan pengguna (Setyawan & Ngadiyono, 2022). Walaupun demikian, hasil pencetakan dengan *fused deposition modelling* (FDM) sangat bergantung pada konfigurasi proses yang digunakan. Variabel seperti ketebalan soket, pilihan material serta ukuran *nozzle* dapat mempengaruhi kualitas pola cetak, kekuatan ikatan antar lapisan dan akurasi bentuk akhir. Dampaknya terlihat pada perbedaan waktu produksi, bobot cetakan serta performa mekanik komponen yang dihasilkan.

Variasi ketebalan dan jenis material pada proses 3D printing memberikan pengaruh langsung terhadap durasi pencetakan, massa komponen, serta karakteristik mekanis soket. Dalam perancangan prostetik, pengaturan ketebalan harus diperhitungkan secara cermat untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan kenyamanan pengguna (Wardana dkk., 2023). Soket yang terlalu tebal dapat meningkatkan beban dan mengganggu mobilitas, sedangkan soket yang terlalu tipis dapat mengurangi ketahanannya. Oleh karena itu, aspek ringan saja tidak menjadi ukuran utama. Parameter yang lebih representatif adalah *specific strength*, yaitu perbandingan antara kekuatan tarik maksimum dan densitas material, sehingga mampu menunjukkan sejauh mana kompromi antara kekuatan dan keringanan dapat dicapai pada soket.

Dengan menetapkan *specific strength* sebagai indikator utama, proses optimasi tidak lagi melihat aspek massa dan kekuatan secara terpisah, melainkan menggabungkan keduanya menjadi satu tolak ukur performa yang lebih sesuai dengan kenyamanan dan keamanan pengguna. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan metode yang terarah dalam menentukan kombinasi parameter pencetakan terbaik, salah satunya melalui metode taguchi. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menjawab kekurangan pada pembuatan soket prostetik secara tradisional, sekaligus memberikan alternatif produksi yang lebih ekonomis namun tetap berkualitas bagi penyandang disabilitas. Akan tetapi, sejumlah penelitian sebelumnya masih cenderung menitikberatkan pada penurunan berat komponen atau percepatan waktu pencetakan. Upaya eksplisit untuk menjadikan *specific strength* sebagai prioritas desain dan mengintegrasikannya Bersama target proses seperti massa serta durasi pencetakan dalam satu kerangka optimasi masih terbatas dilakukan.

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Comotti dkk., (2015), berfokus pada pengembangan desain serta proses fabrikasi soket prostetik untuk tungkai bawah lutut dengan memanfaatkan teknologi 3D printing. Dalam studi tersebut digunakan mesin *fused deposition modeling* (FDM), yaitu teknik manufaktur aditif yang bekerja dengan mengekstrusi material secara bertahap

hingga membentuk geometri akhir. Material yang dicetak merupakan *polylactic acid* (PLA), sementara variabel utama yang diuji adalah variasi persentase *infill* sebesar 5%, 10% dan 20%. Temuan penelitian itu menunjukkan bahwa pola dan tingkat kepadatan struktur internal memiliki pengaruh besar terhadap kekauan serta kemampuan deformasi soket yang dihasilkan.

Penelitian yang dilakukan oleh Campbell dkk., (2018) bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi persentase *infill* terhadap kemampuan menahan beban pada soket transtibial yang diproduksi melalui metode cetak 3D printing. Pengujian dilakukan secara statis menggunakan *universal testing machine* *tinus Olsen* sesuai protocol ISO, di mana gaya diberikan secara bertahap hingga mencapai 4480 N dan dipertahankan selama 30 detik. Fokus pengujian diarahkan pada kondisi fase *initial stance*, karena fase tersebut merupakan tahap dengan pembebanan tertinggi selama berjalan. Dalam penelitian ini digunakan material PLA dengan tiga variasi *infill*, yaitu 30%, 40% dan 50% dan masing masing dicetak tiga sampel. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh sampel berhasil melampaui batas minimum keamanan sesuai standar ISO 10238.

Penelitian yang dilakukan Lestari dkk., (2024) penelitian ini berfokus pada pengoptimalan parameter pencetakan 3D untuk soket prostetik menggunakan metode taguchi dan *Response Surface Methodology* (RSM). Parameter utama yang dianalisis termasuk ketebalan soket, tinggi lapisan, kepadatan *infill*, kecepatan cetak, dan suhu nosel. Material yang digunakan adalah filamen *Polylactic Acid* (PLA). Lima parameter proses cetak adalah ketebalan soket (3 mm, 4 mm, 5 mm), tinggi lapisan (0,1 mm, 0,15 mm, 0,3 mm), kerapatan isi (80 %, 90 %, 100 %), kecepatan cetak (70 mm/s, 80 mm/s, 90 mm/s) dan suhu nosel (190 °C, 200 °C, 210 °C). Penelitian menemukan parameter optimal yang mengurangi waktu cetak dan massa soket. Hasil penelitian yang didapat ini dengan menggunakan parameter ketebalan soket 3 mm, tinggi lapisan 0,2 mm, kepadatan isi 100%, kecepatan cetak 80 mm/s, dan suhu nosel 190 °C merupakan faktor-faktor yang berkontribusi dalam mencapai kualitas cetak yang lebih baik.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter proses seperti kepadatan *infill*, suhu *nozzle* serta kecepatan pencetakan berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanik komponen yang diproduksi melalui 3D printing. Oleh sebab itu, masih diperlukan penelitian lanjutan mengenai optimalisasi parameter proses pada material PLA, ABS dan PP untuk memperoleh performa cetak yang lebih baik, khususnya pada aplikasi di bidang biomedis seperti manufaktur soket prostetik berbasis teknologi 3D printing.

Merujuk pada permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengidentifikasi kombinasi terbaik antara ketebalan soket, jenis material dan diameter *nozzle* pada proses pencetakan soket prostetik untuk amputasi bawah lutu dengan menggunakan teknologi 3D printing. Faktor utama yang dikaji meliputi variasi ketebalan, material dan diameter *nozzle*, sedangkan parameter hasil yang dianalisis adalah durasi pencetakan, massa soket dan *specific strength*. Diharapkan temuan penelitian ini dapat memberikan acuan dalam merancang soket yang tidak hanya nyaman dan memiliki performa mekanik yang memadai, namun juga lebih efisien dari sisi waktu produksi dan penggunaan material. Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan menjadi kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi prostetik yang lebih ekonomis dan berorientasi pada kebutuhan pengguna.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang didapatkan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi parameter proses pencetakan 3D yang meliputi ketebalan, material, dan *nozzle* diameter terhadap respon waktu cetak, massa soket, *specific strength*, *stress von mises*, dan *safety factor* pada pembuatan soket prostetik?
2. Bagaimana menentukan parameter proses yang memberikan kinerja terbaik untuk setiap respon secara individu dengan menggunakan Metode Taguchi?
3. Bagaimana kombinasi parameter proses yang paling optimal untuk menghasilkan soket prostetik dengan kinerja terbaik berdasarkan hasil analisis Taguchi dan *Desirability*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah didapat tujuan dari penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi parameter proses pencetakan 3D yang meliputi ketebalan, material, dan *nozzle* diameter terhadap respon kinerja soket prostetik berupa waktu cetak, massa soket, *specific strength*, *stress von mises*, dan *safety factor*.
2. Menentukan parameter proses yang memberikan kinerja paling baik untuk setiap respon secara individual menggunakan Metode Taguchi.
3. Menentukan kombinasi parameter proses yang paling optimal untuk menghasilkan soket prostetik dengan performa terbaik melalui pendekatan optimasi multi respon menggunakan Metode Taguchi dan *Desirability*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini berperan sebagai kemajuan teknologi prostetik, terutama dalam upaya peningkatan mutu serta efektivitas proses pembuatan soket prostetik menggunakan metode pencetakan 3D printing. Adapun sejumlah manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut.

1. **Bagi Peneliti**
 - a. Memberikan pemahaman dan pengalaman langsung dalam pemanfaatan teknologi 3D printing untuk pengembangan komponen prostetik, terutama dalam hal optimasi material dan ketebalan.
 - b. Meningkatkan kemampuan peneliti dalam melakukan analisis serta evaluasi desain dengan pendekatan optimasi, yang memiliki keterkaitan dengan perkembangan teknologi prostetik maupun bidang rekayasa lainnya.
 - c. Menghasilkan kontribusi ilmiah berupa penelitian yang berpotensi dipublikasikan di jurnal internasional, sehingga dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan karir akademik peneliti.

2. **Bagi Institusi**

- a. Mendorong institusi untuk semakin berperan dalam penelitian inovatif dan berorientasi pada solusi bagi penyandang disabilitas, terutama di bidang prostetik.
- b. Memperkuat citra institusi dalam bidang riset teknologi kesehatan dan manufaktur, sehingga membuka peluang kolaborasi Lembaga institusi dan industri terkait.
- c. Memberikan kesempatan bagi institusi untuk lebih dikenal melalui publikasi ilmiah dan potensi paten dari teknologi atau metode yang dikembangkan dalam penelitian ini.

3. **Bagi Industri atau Masyarakat**

- a. Menyediakan pendekatan yang lebih hemat biaya, ringan, serta cepat dalam proses produksi bagi industri prostetik melalui penerapan teknologi pencetakan 3D, sehingga produk prostetik dapat dijangkau oleh lebih banyak pengguna.
- b. Berperan dalam meningkatkan kenyamanan dan kualitas hidup penyandang disabilitas dengan menghadirkan desain soket prostetik yang ringan, ergonomis, serta disesuaikan dengan kebutuhan aktivitas sehari-hari.
- c. Memberikan pandangan baru bagi industri untuk memanfaatkan teknologi 3D printing dan optimasi material sebagai alternatif dalam pembuatan prostetik, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan melalui pengurangan limbah material.

1.5 **Batasan Masalah**

Penelitian ini dibatasi oleh beberapa parameter, antara lain:

1. Teknik manufaktur yang diterapkan pada penelitian ini adalah dengan metode 3D printing *Fused Deposition Modeling* (FDM).
2. Variasi diameter *nozzle* yang dipakai meliputi 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm.
3. Ketebalan dinding soket yang diuji adalah 1 mm, 2 mm, 3 mm.

4. Bentuk soket yang diteliti merupakan desain prostetik untuk bagian bawah lutut dengan ukuran tertentu yang telah disesuaikan dengan kebutuhan umum pengguna.
5. Ruang lingkup penelitian tidak meliputi pengujian klinis maupun uji ketahanan mekanik pada soket. Pengujian hanya difokuskan pada analisis efisiensi waktu pencetakan dan massa soket sebagai dasar optimasi ketebalan serta material yang digunakan.
6. Setiap jenis filamen yang digunakan (PLA, ABS dan PP) memiliki parameter khusus yang disesuaikan berdasarkan hasil uji tarik yang menunjukkan performa paling optimal.