



Perancangan Sendi Lutut Prostetik untuk Penderita Amputasi Transfemoral di Indonesia

Marihot Nainggolan¹, Hanky Fransiscus,² Daniella Alexandra Djulaini³

^{1,2,3} Program Studi Teknologi Industri, Jurusan Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung 40141

Email: marihot.nainggolan@unpar.ac.id, hanky.fransiscus@unpar.ac.id, alexandradaniella22@gmail.com,

Abstract

The main problem that experienced by transfemoral amputees in Indonesia is limited mobility, so they need prosthetic limbs to walk and do daily activities. However, the limited movement and also expensive price of the prosthetic knee joint causes not all the needs of the transfemoral amputee can be accommodated. This study aims to design the artificial leg joints that can meet the needs of the Indonesian amputees. Stages of this research include searching for unmet user needs, developing concepts to produce a prosthetic knee joint repair plan and evaluating it. From this research, six initial concepts of prosthetic knee joints, and one concept (AD+) has been selected using concept screening and concept scoring. A physical prototype has been made using printer 3D. The final prosthetic knee joint using polycentric knee type joint with constant friction drive type, having a human knee joint shape, has a height dimension of 188.84 millimeters and width of 82.46 millimeters, has a maximum bending angle of 151.40, mass 598, 62 grams, can support a maximum load of 272 kilograms (according to CAD model), made of nylon, has a production cost about one million rupiah (less than USD100), has a single speed and impact high level ambulation, and has a rotator and lock function. Evaluation is done by simulation and qualitative assessment. The results showed that 68.42% of the needs were met well and 31.58% were adequately met by this new proposed prosthetic knee joint design.

Keywords: *transfemoral amputee, prosthetic knee joint design, house of quality, computer aided design, printer 3D*

Abstrak

Masalah utama yang dialami oleh penderita amputasi transfemoral di Indonesia adalah keterbatasan mobilitas, sehingga membutuhkan kaki palsu untuk berjalan dan melakukan aktivitas sehari-hari. Namun keterbatasan gerak serta mahalnya harga sendi lutut prostetik menyebabkan tidak semua kebutuhan pasien amputasi transfemoral dapat diakomodasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sendi kaki palsu yang dapat memenuhi kebutuhan penderita amputasi di Indonesia. Tahapan penelitian ini meliputi pencarian kebutuhan pengguna yang belum terpenuhi, mengembangkan konsep untuk menghasilkan rencana perbaikan sendi lutut prostetik dan mengevaluasinya. Enam konsep awal sendi lutut prostetik berhasil dibangun, dan satu konsep (AD+) telah dipilih melalui penyaringan konsep dan penilaian konsep. Prototipe fisik telah dibuat menggunakan printer 3D. Sendi lutut prostetik final menggunakan tipe sendi lutut polisentrik tipe constant friction drive, memiliki bentuk sendi lutut manusia, memiliki dimensi tinggi 188,84 milimeter dan lebar 82,46 milimeter, memiliki sudut lentur maksimum 151,40, massa 598, 62 gram, dapat menopang beban maksimum 272 kilogram (menurut model CAD), terbuat dari nilon, memiliki biaya produksi sekitar satu juta rupiah (kurang dari USD100), memiliki kecepatan tunggal dan dampak ambulasi tingkat tinggi, dan memiliki rotator dan kunci fungsi. Evaluasi dilakukan dengan simulasi dan penilaian kualitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 68,42% kebutuhan terpenuhi dengan baik dan 31,58% terpenuhi secara memadai oleh usulan desain sendi lutut prostetik ini.

Kata kunci: amputasi transfemoral, desain sendi lutut prostetik, CAD, printer 3D

Pendahuluan

Tubuh manusia modern memiliki berbagai macam mekanisme yang sangat kompleks. Salah satu mekanisme yang sangat penting bagi manusia adalah pergerakan atau movement, terutama pada bagian kaki. Mekanisme pergerakan mencakup tulang, sendi, otot serta interaksi ketiga elemen tersebut melalui sistem syaraf dan otak. Mekanisme pergerakan pada kaki manusia digunakan oleh untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya, baik dengan cara berjalan ataupun berlari. Selain itu, mekanisme pergerakan kaki memungkinkan manusia untuk melakukan sikap tubuh lain, seperti jongkok, melompat, berlutut dan bahkan duduk bersila.

Menurut Singh terdapat beberapa macam gerakan yang dapat dilakukan oleh sendi lutut manusia seperti gerakan fleksi, ekstensi, rotasi medial, dan rotasi lateral (Singh, 2015). Akan tetapi tidak semua orang memiliki fungsi tubuh yang normal, dengan kata lain orang dapat mengalami keadaan difabel (atau mengalami "disabilitas"). Menurut Survei Sosial Ekonomi Nasional tahun 2012 (Badan Pusat Statistik, 2022), disabilitas berarti ketidakmampuan melaksanakan suatu aktivitas sebagaimana layaknya manusia normal yang disebabkan oleh kondisi *impairment* yang berhubungan dengan usia dan masyarakat.

Difabilitas merupakan masalah yang banyak terjadi secara global, termasuk di Indonesia. Berdasarkan data hasil Susenas tahun 2022 (Badan Pusat Statistik, 2022), penduduk difabel hampir mencapai 17 juta jiwa. Data dari Pusdatin dan Direktorat Orang dengan Kecacatan tahun 2012 menunjukkan bahwa jumlah jenis difabilitas yang paling banyak adalah Tuna Daksa/ketunaan fisik sebesar 33,74% (Kementerian Sosial Republik Indonesia, 2012). Bagi mereka yang memiliki kekurangan pada bagian kaki, dapat dipastikan bahwa mereka mengalami masalah mobilisasi.

Mayoritas tuna daksa pada bagian kaki di Indonesia menggunakan alat bantu jalan konvensional seperti tongkat atau kruk yang memiliki tingkat fleksibilitas dan kenyamanan rendah. Salah satu alat bantu mobilisasi yang dapat meningkatkan fleksibilitas dan kenyamanan tuna daksa *lower extremities* adalah prostetik atau bagian tubuh palsu.

Menurut editorial Healthline (Healthline, 2015) kaki manusia terdiri dari lima bagian yang terpisah yaitu kaki bagian atas (*upper leg*), lutut (*knee*), kaki bagian bawah (*lower leg*), mata kaki (*ankle*) dan telapak kaki (*foot*) dan ke semuanya bekerja sama dalam menunjang mobilitas manusia.

Bila salah satu bagian tersebut rusak atau hilang karena penyakit atau kecelakaan maka dibutuhkan bagian tubuh prostetik. Menurut Norton, amputasi sudah dipraktikkan sejak tahun 424 sebelum Masehi (Norton, 2007). Amputasi adalah suatu jenis operasi untuk membuang sebagian atau seluruh bagian tangan atau kaki. (Johns Hopkins, 2016).

Jenis amputasi pada kaki yang diberikan untuk setiap pasien bisa berbeda, tergantung dari penyebab kerusakan pada bagian tubuh dan lokasi luka yang dialami oleh pasien. Terdapat 7 jenis-jenis amputasi pada kaki yaitu partial foot amputation, *ankle disarticulation*, *below knee amputation*, *through the knee amputation*, *above knee amputation*, *hip disarticulation*, dan *hemipelvectomy* (Limbless Association, 2012).

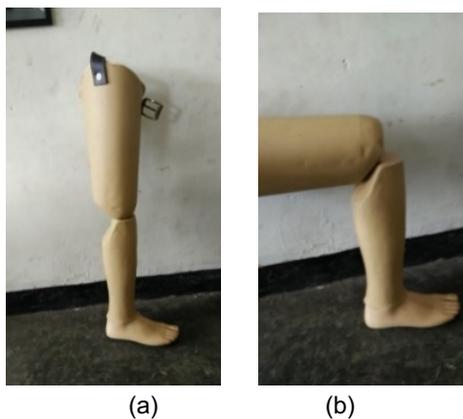
Di Indonesia, penderita amputasi yang membutuhkan bagian tubuh prostetik, akan membeli produk tersebut secara *import* atau melalui industri produksi bagian tubuh prostetik lokal di Indonesia. Salah satu industri kecil yang memproduksi bagian tubuh prostetik adalah Kelompok Kreativitas Difabel (KKD).

Penelitian sebelumnya (Hajon, 2016) difokuskan pada kaki palsu betis ke bawah dan menghasilkan sebuah rancangan kaki palsu *transtibial*. Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang ditujukan untuk mengembangkan rancangan tersebut sampai batas paha ke bawah (*transfemoral*), karena kaki palsu *transfemoral* merupakan salah satu produk yang paling banyak diproduksi di bengkel KKD. Menurut Berke, Buell, Ferguson, Gailey, Hafner, & Hubbard (2008), lutut prostetik dibuat sedemikian rupa agar dapat meniru fungsi lutut asli manusia

Fokus penelitian ini adalah bagian lutut karena dibutuhkan mekanisme sendi lutut agar dapat membentuk kaki palsu jenis *transfemoral* yang fungsinya menyerupai kaki normal. Objek penelitian yang dipilih adalah sendi lutut prostetik yang terintegrasi pada *transfemoral* prostetik KKD. Objek penelitian yang diamati dapat dilihat pada Gambar 1. Bagi kaum difabel, desain yang ergonomis diharapkan

dapat membantu mereka untuk mencapai tingkat kemandirian dan kemampuan fungsional sehari-hari yang setinggi-tingginya (Kroemer, 2001). Sedangkan menurut Schrott dalam majalah World Intellectual Property Organization (WIPO), terdapat tren difabel untuk mendapatkan akses terhadap produk dan informasi (Schrott, 2009).

Kebutuhan penerima amputasi *transfemoral* dan kendala yang terdapat pada *transfemoral* prostetik KKD dicari dengan cara observasi langsung dan wawancara dengan dua orang anggota KKD yang membuat kaki palsu tersebut serta penggunaannya. Dari hasil wawancara, diketahui bahwa masih terdapat beberapa permasalahan pada bagian lutut *transfemoral* prostetik KKD, yaitu ketidakmampuan engsel lutut untuk menekuk lebih dari 90° , tidak adanya pengunci, dan terbentuknya "coak" pada saat duduk.



Gambar 1. *Transfemoral* Prostetik KKD
(a) Posisi Lurus (b) Posisi Menekuk 90°

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi kebutuhan konsumen lanjutan untuk mengetahui apa saja kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik yang belum terpenuhi, membuat perbaikan rancangan sendi lutut prostetik dari segi *design* dan mekanisme, serta mengevaluasi rancangan tersebut.

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa batasan antara lain sebagai berikut:

1. Rancangan lutut prostetik difokuskan pada aspek fungsional dan finansial.
2. Perancangan *prototipe* lutut prostetik berupa *analytical prototype* dan *physical prototype*.
3. Lutut prostetik yang dirancang diperuntukkan untuk orang yang menggunakan satu *transfemoral* prostetik.

Selain batasan yang telah dijabarkan, terdapat satu buah asumsi yang digunakan yaitu kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik tidak berubah selama penelitian berlangsung.

Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang diterapkan dalam penelitian ini dicantumkan pada Gambar 2. Penelitian awal dilakukan dengan cara observasi langsung ke bengkel Kelompok Kreativitas Difabel (KKD), wawancara, dan studi literatur. Kemudian dilakukan identifikasi masalah untuk menggali dan menganalisis permasalahan yang ada pada kondisi nyata. Ditentukan pula pembatasan masalah dan asumsi untuk memfokuskan lingkup penelitian.

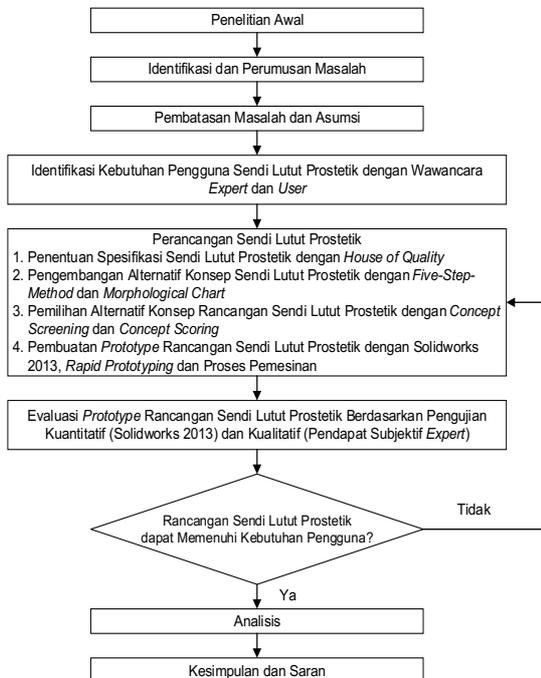
Identifikasi kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik dilakukan dengan cara wawancara. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan proses perancangan ulang sendi lutut prostetik yang terdiri dari empat tahap.

Tahap pertama adalah penentuan spesifikasi sendi lutut prostetik dengan menggunakan *House of Quality*. Kemudian dilakukan pengembangan alternatif konsep dengan *five-step-method* (Ulrich & Eppinger, 2012) dan *morphological table* (Cross, 2000). Tahap ketiga adalah pemilihan alternatif konsep rancangan berdasarkan proses *concept screening* dan *concept scoring* (Ulrich & Eppinger, 2012). Kemudian dilakukan pembuatan *analytical prototype* dan *physical prototype*.

Setelah memperoleh rancangan akhir sendi lutut prostetik usulan, dilakukan evaluasi berdasarkan daftar kebutuhan pengguna. Pengujian *prototype* yang telah dibuat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara kuantitatif dan kualitatif. Pengujian kuantitatif dilakukan dengan simulasi *analytical prototype* pada *software* Solidworks 2013. Sedangkan pengujian kualitatif dilakukan dengan cara penilaian subjektif oleh para pembuat bagian tubuh palsu di bengkel KKD (*expert*). Apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa semua kebutuhan telah terpenuhi, maka penelitian dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya. Jika tidak, alur penelitian kembali ke tahap perancangan sendi lutut prostetik usulan.

Tahap setelah proses evaluasi adalah analisis. Pada bagian analisis dijabarkan pertimbangan-pertimbangan yang diambil pada setiap tahap perancangan, mulai dari

tahap identifikasi kebutuhan pengguna hingga evaluasi rancangan sendi lutut prostetik usulan. Tahap terakhir yang dilakukan adalah penarikan kesimpulan dan saran untuk penelitian serupa di kemudian hari.



Gambar 2. Metodologi penelitian perancangan ulang sendi lutut prostetik KKD

Hasil dan Pembahasan

Sebelum rangkaian proses perancangan sendi lutut prostetik dilakukan, dibuat *mission statement* yang berfungsi sebagai panduan atau *guideline* bagi peneliti dalam proses perancangan. *Mission statement* sendi lutut prostetik dapat dilihat pada Tabel 1.

Identifikasi Kebutuhan Pengguna

Identifikasi kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik dilakukan untuk memperbaharui daftar kebutuhan pengguna dan mencari kebutuhan pengguna yang belum terpenuhi oleh rancangan awal sendi lutut *transfemoral* prostetik KKD (Tabel 2).

Pengumpulan data pada Tabel 2 ini dilakukan dengan cara mewawancarai empat orang pengrajin kaki palsu di bengkel KKD (*expert*) dan tiga orang pengguna sendi lutut prostetik KKD (*user*). Proses pengambilan data dilakukan berdasarkan pengalaman dari *expert* dan *user*. Sebagai informasi, *expert* juga merupakan pengguna kaki palsu yang menjadi pengrajin kaki palsu lebih dari 10 tahun. Skala

yang digunakan dalam menilai tingkat kepentingan dari kebutuhan ini adalah skala 1-10.

Tabel 1. *Mission statement* sendi lutut prostetik

Pernyataan Misi: Sendi Lutut Prostetik	
<i>Product Description</i>	Sendi lutut prostetik yang membantu mobilisasi dan pergerakan tuna daksa <i>transfemoral</i> Sendi lutut prostetik yang membantu tuna daksa <i>transfemoral</i> melakukan kegiatan sehari-hari Sendi lutut prostetik yang aman dan nyaman untuk digunakan
<i>Benefit Proposition</i>	Sendi lutut prostetik yang dapat digunakan untuk sikap kaki yang umum dilakukan oleh kaki normal Mekanisme sendi lutut prostetik memberikan keamanan dan kenyamanan ketika penggunaannya melakukan kegiatan sehari-hari Sendi lutut prostetik ekonomis
<i>Key Business Goals</i>	Sendi lutut prostetik dapat memenuhi kebutuhan tuna daksa <i>transfemoral</i> Sendi lutut prostetik diminati oleh pengguna <i>transfemoral</i> prostetik Sendi lutut prostetik dapat digunakan oleh industri bagian tubuh prostetik lokal
<i>Primary Market</i>	Tuna daksa penerima amputasi <i>transfemoral</i> yang menggunakan <i>transfemoral</i> prostetik KKD
<i>Secondary Market</i>	Tuna daksa penerima amputasi <i>transfemoral</i> dengan satu kaki palsu Tuna daksa penerima amputasi <i>transfemoral</i> dengan dua kaki palsu
<i>Assumptions and Constraints</i>	Kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik tidak berubah selama penelitian berlangsung Tuna daksa pengguna <i>transfemoral</i> prostetik
<i>Stakeholders</i>	Industri pembuat bagian tubuh prostetik lokal

Needs statement dikelompokkan berdasarkan kemiripannya menjadi 19 buah kelompok kebutuhan. Dicari pula nilai *relative importance* kebutuhan dengan cara meminta penilaian tersebut kepada para narasumber *expert* dan *user*. *Output* tahap ini adalah daftar kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Penentuan Spesifikasi

Proses penentuan spesifikasi sendi lutut prostetik usulan dilakukan dengan membuat *House of Quality* (HOQ) karena membentuk ringkasan yang jelas mengenai spesifikasi produk dan data pendukung serta perbandingan produk serupa, nilai target dan

kesulitan teknis yang perlu diantisipasi (Otto & Wood, 2001).

Tabel 2. Daftar kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik

No	Kebutuhan	Relative Importance
1	Sendi lutut prostetik ekonomis	8,57
2	Sendi lutut prostetik memungkinkan kaki palsu ditumpangkan ke kaki yang bersebelahan	8,57
3	Mekanisme sendi lutut prostetik mempertahankan posisi kaki dengan mantap	8,57
4	Sendi lutut prostetik tahan lama	8,43
5	Sendi lutut prostetik mudah dirawat	8,43
6	Bentuk sendi lutut prostetik estetik	8,29
7	Mekanisme sendi lutut prostetik modern	8,29
8	Suara yang dihasilkan oleh pergerakan sendi lutut prostetik minimal	8,29
9	Sendi lutut prostetik ringan	8,14
10	Ukuran sendi lutut prostetik sama dengan lutut kaki yang normal	8,14
11	Sendi lutut prostetik adaptable	8,00
12	Hubungan antar komponen sendi lutut prostetik kencang	7,86
13	Engsel Sendi lutut prostetik dapat dikunci	7,14
14	Sendi lutut prostetik memiliki derajat penekukan yang besar	9,00
15	Sendi lutut prostetik multifungsi (versatile)	9,00
16	Mekanisme sendi lutut prostetik menghasilkan pergerakan kaki yang menyerupai kaki normal	9,00
17	Sendi lutut prostetik kuat menahan beban berat	8,86
18	Usaha untuk menggerakkan sendi lutut prostetik minimal	8,71
19	Sendi lutut prostetik cepat tanggap (practical)	8,57

Pembuatan HOQ terdiri dari tujuh tahap, dimulai dari penentuan daftar *metric*. *Metric* diperoleh dari analisa katalog produk serupa dan hasil konsultasi dengan pembuat bagian tubuh palsu di bengkel KKD. Daftar *metrics* sendi lutut prostetik beserta nomor kebutuhan yang dipenuhi oleh *metric* tersebut dicantumkan pada Tabel 3.

Setelah itu, dilakukan penentuan hubungan kebutuhan pengguna yang telah ditentukan

nilai *relative importance*-nya dan *metrics*. Dilakukan juga penentuan hubungan antar-*metric* serta korelasinya. Hubungan kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik dan *metrics* dicantumkan pada Gambar 3, sedangkan hubungan antar-*metrics* dapat dilihat pada Gambar 4

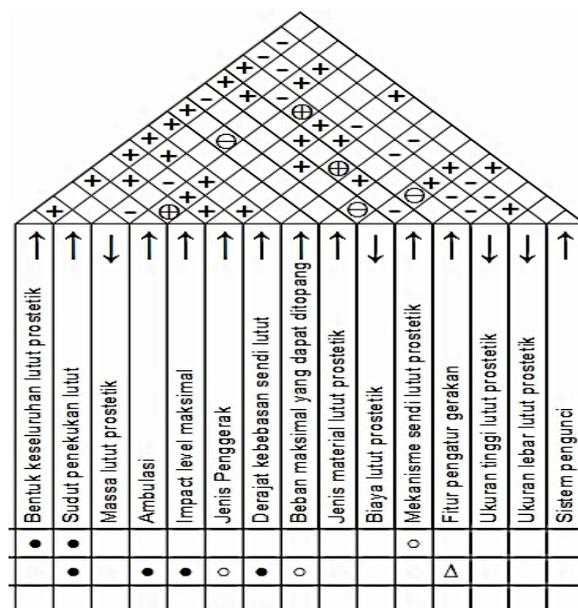
Tabel 3. Daftar *metrics* sendi lutut prostetik

No	Metric	Satuan
1	Mekanisme sendi lutut prostetik	List
2	Jenis penggerak	List
3	Derajat kebebasan sendi lutut	List
4	Sudut penekukan lutut	Derajat
5	Beban maksimal yang dapat ditopang	kg
6	Biaya sendi lutut prostetik	Rp
7	Massa sendi lutut prostetik	gr
8	Jenis material sendi lutut prostetik	List
9	Ukuran tinggi sendi lutut prostetik	mm
10	Ukuran lebar sendi lutut prostetik	mm
11	Bentuk keseluruhan sendi lutut prostetik	Kualitatif
12	Ambulasi	List
13	Impact level Maksimal	List
14	Sistem pengunci	Biner
15	Fitur pengatur gerakan	List

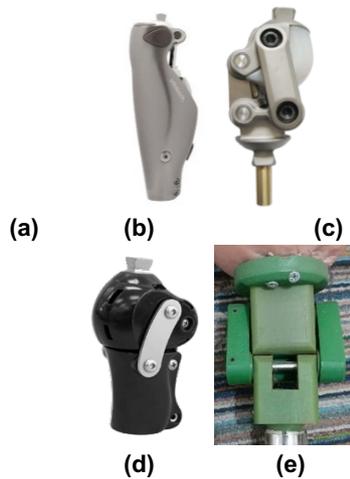
Pembuatan HOQ dilanjutkan dengan proses *competitive benchmarking*. Pada proses ini dipilih lima buah produk yang digunakan sebagai pembandingan dalam penelitian ini, yaitu (a) C-Leg 3C98-3 merk Ottobock (diatas 30 juta rupiah), (b) *four bar linkage stainless steel knee import* yang dijual oleh PT Kuspito, (c) sendi lutut prostetik produksi CV Japro Medika (sekitar 9 juta rupiah) (Japro Medika, 2017), (d) ReMotion Knee v3 dari D-Rev (USD80-100) (Engineering For Change, 2022), dan (e) Stanford Knee (USD20) (Bhagwan Mahaveer Viklang Sahayata Samiti, 2022). Kelima produk *competitive benchmarking* dapat dilihat pada Gambar 5. Ke lima produk *benchmarking* merupakan produk yang paling banyak dipakai di dunia, akan tetapi produk tersebut memiliki harga yang relatif cukup mahal di atas USD100 dan belum memenuhi kebutuhan spesifik dari pengguna di Indonesia. Sebagai informasi, nilai tingkat pemenuhan kebutuhan produk-produk tersebut dicantumkan pada bagian kanan HOQ.

		Bentuk keseluruhan lutut prostetik	Sudut penekukan lutut	Massa lutut prostetik	Ambulasi	Impact level maksimal	Jenis Penggerak	Derajat kebebasan sendi lutut	Beban maksimal yang dapat ditopang	Jenis material lutut prostetik	Biaya lutut prostetik	Mekanisme sendi lutut prostetik	Fitur pengatur gerakan	Ukuran tinggi lutut prostetik	Ukuran lebar lutut prostetik	Sistem pengunci
Sendi lutut prostetik memiliki derajat penekukan yang besar	9,00	●	●									○				
Sendi lutut prostetik multifungsi (versatile)	9,00	●	●	●	●	○	●	○					△			
Mekanisme sendi lutut prostetik menghasilkan pergerakan kaki yang menyerupai sendi kaki normal	9,00			●	●	●	●				○					
Sendi lutut prostetik kuat menahan beban berat	8,86							●	●					○	○	
Usaha untuk menggerakkan sendi lutut prostetik minimal	8,71		●			○					○	△	○			
Sendi lutut prostetik cepat tanggap (practical)	8,57			○	●	●										
Sendi lutut prostetik ekonomis	8,57					●			●	●				△	△	
Sendi lutut prostetik memungkinkan kaki palsu ditumpangkan ke kaki yang bersebelahan	8,57	○	●				●									
Mekanisme lutut prostetik mempertahankan posisi kaki dengan mantap	8,57						○		△		○		○	○		
Sendi lutut prostetik tahan lama	8,43									○						
Sendi lutut prostetik mudah dirawat	8,43							△		○						
Bentuk sendi lutut prostetik estesis	8,29	●								○	●		○	○		
Mekanisme sendi lutut prostetik modern	8,29			○	○	●						●			△	
Suara yang dihasilkan oleh pergerakan sendi lutut prostetik minimal	8,29	●				○				○						
Sendi lutut prostetik ringan	8,14		●						●				△	○	○	
Ukuran sendi lutut prostetik sama dengan lutut kaki yang normal	8,14	●											△	●	●	
Sendi lutut prostetik adaptable	8,00						●					△			○	
Hubungan antarkomponen sendi lutut prostetik kencang	7,86	○								●	●					
Engsel sendi lutut prostetik dapat dikunci	7,14						○	○								●

Gambar 3. Hubungan kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik dan Metrics



Gambar 4. Hubungan antar-metric sendi lutut prostetik



Gambar 5. Produk Competitive Benchmarking

Spesifikasi produk-produk ini akan dijadikan sebagai acuan untuk menentukan *object target values* pada langkah berikutnya.

Bagian terakhir dari pembuatan *House of Quality* adalah penentuan nilai *technical difficulty*, penentuan *object target values*, dan perhitungan nilai *technical importance* yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Object Target Value, Technical Importance, dan Technical Difficulty Metric Sendi Lutut Prostetik

Metric	Object Target Value	Satuan	Technical Importance		Technical Difficulty
			Absolute	Relative	
Jenis Penggerak	Constant Friction Knee	List	615,71	1	2
Jenis material sendi lutut prostetik	Polimer, Stainless Steel	List	397,29	2	1
Bentuk keseluruhan sendi lutut prostetik	Menyerupai lutut asli	Subj	385,57	3	2
Ukuran tinggi Sendi lutut prostetik	$154 < X < 214$	mm	311,86	4	1
Derajat kebebasan sendi lutut	X+, X-	List	274,86	5	3
Fitur pengatur gerakan	Adjustable constant friction	List	271,29	6	3
Ukuran lebar Sendi lutut	$67 < X < 85$	mm	268,29	7	1

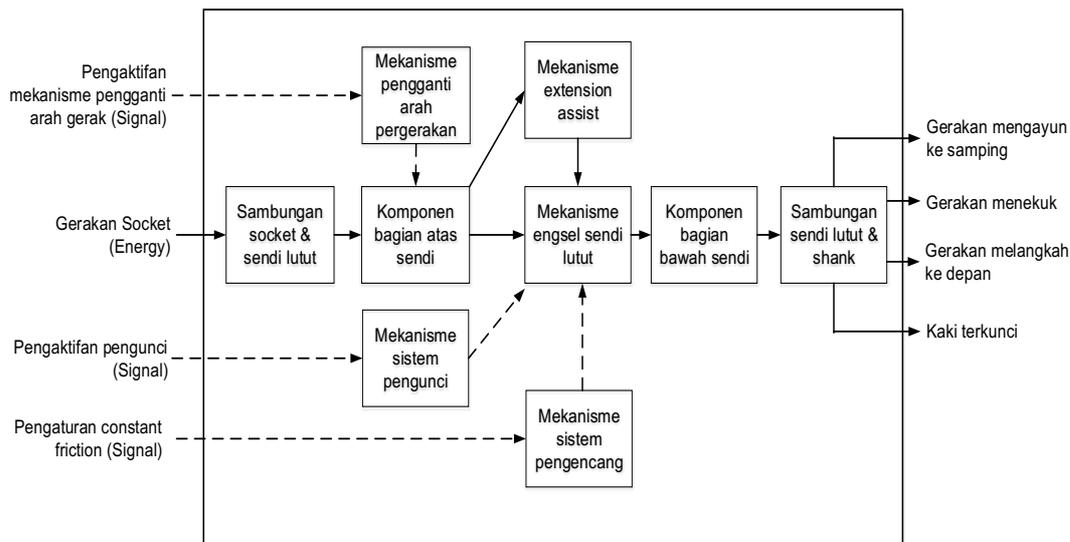
Metric	Object Target Value	Satuan	Technical Importance		Technical Difficulty
			Absolute	Relative	
prostetik					
Mekanisme sendi lutut prostetik	Polycentric	List	247,14	8	3
Ambulasi	Multi Speed	List	246,29	9	1
Sudut penekukan lutut	$130 < X < 165$	Derajat	239,14	10	2
Impact Level Maksimal	High	List	199,57	11	1
Biaya Sendi lutut prostetik	$1.066.640 < x < 3.800.000$	Rp	151,71	12	2
Massa Sendi lutut prostetik	$400 < X < 1235$	gr	151,71	13	1
Beban maksimal yang dapat ditopang	$80 < x < 136$	kg	150,43	14	1
Sistem pengunci	Ya	Bin	129,14	15	4

Technical difficulty diberikan oleh para pembuat bagian tubuh palsu di bengkel KKD (*expert*) dan menunjukkan tingkat kesulitan untuk mewujudkan *metric* yang bersangkutan. *Object target values* merupakan nilai yang dipilih untuk membuat rancangan sendi lutut prostetik usulan. Sedangkan nilai *technical importance* menunjukkan prioritas pemenuhan masing-masing *metrics*.

Pengembangan Alternatif Konsep

Proses pengembangan alternatif konsep rancangan sendi lutut prostetik usulan dilakukan menggunakan *five-step-method* (Ulrich dan Eppinger, 2012).

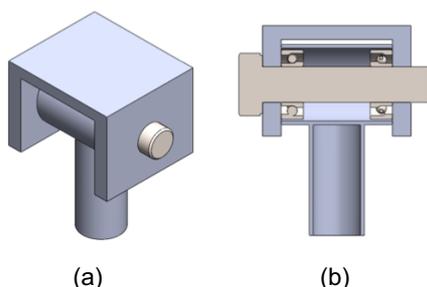
Langkah pertama yang dilakukan dalam proses tersebut adalah tahap klarifikasi masalah atau *problem decomposition*. Langkah ini dilakukan untuk membagi masalah yang hendak diselesaikan menjadi sub-masalah yang lebih sederhana, sehingga peneliti dapat lebih memahami cara kerja sendi lutut prostetik. *Problem decomposition* dilakukan dengan cara membuat *function diagram* sendi lutut prostetik yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Function diagram sendi lutut prostetik

Tahap berikutnya adalah *internal search* dan *external search* yang dilakukan untuk mencari alternatif solusi pemenuhan setiap fungsi.

External search dilakukan dengan cara mempelajari katalog produk serupa dan produk *competitive benchmarking*, serta melakukan pembelajaran terhadap mekanisme sendi lutut prostetik KKD yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 7.

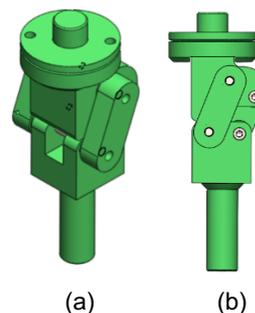


Gambar 7. Ilustrasi cad sendi lutut prostetik KKD (a) proyeksi ortogonal (b) potongan tengah

Berdasarkan hasil pembelajaran, diketahui bahwa sendi lutut prostetik KKD merupakan *single-axis knee* yang memiliki mekanisme menyerupai engsel pintu.

Terdapat salah satu produk *competitive benchmarking* yang dapat diakses selama penelitian ini, yaitu Stanford Knee. Stanford Knee memiliki spesifikasi yang menyerupai *object target values* yang telah ditetapkan, diduga bahwa Stanford Knee dapat mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh sendi lutut prostetik KKD. Oleh karena itu, sehingga dilakukan pembelajaran lebih lanjut terhadap mekanisme dan ukuran komponen-komponen

Stanford Knee. Hal ini dilakukan dengan cara *reverse engineering*, sehingga ukuran dan bentuk komponen dapat diamati. Ilustrasi CAD Stanford Knee dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Ilustrasi CAD stanford knee (a) proyeksi ortogonal (b) tampak samping

Agar dapat memastikan bahwa Stanford Knee memiliki tingkat pemenuhan kebutuhan yang lebih tinggi dibandingkan sendi lutut prostetik KKD, dilakukan perbandingan langsung yang dicantumkan pada Tabel 5.

Tingkat pemenuhan kebutuhan dinilai secara subjektif oleh para pembuat bagian tubuh palsu di KKD (*expert*). Terdapat tiga macam penilaian, yaitu “ya”, “cukup”, dan “tidak”. Berdasarkan hasil perbandingan tingkat pemenuhan kebutuhan sendi lutut prostetik KKD dan Stanford Knee, dapat dilihat bahwa Stanford Knee memiliki jumlah respon positif (“ya” dan “cukup”) yang lebih banyak dibandingkan sendi lutut prostetik KKD. Oleh karena itu, Stanford Knee dijadikan salah satu acuan utama dalam proses perancangan sendi lutut prostetik usulan.

Tabel 5. Perbandingan tingkat pemenuhan kebutuhan sendi lutut prostetik KKD dan stanford knee

No	Kebutuhan	Sendi Lutut KKD	Stanford Knee
1	Sendi lutut prostetik memiliki derajat penekukan yang besar	Tidak	Ya
2	Sendi lutut prostetik multifungsi (<i>versatile</i>)	Ya	Ya
3	Mekanisme sendi lutut prostetik menghasilkan pergerakan kaki yang menyerupai kaki normal	Cukup	Ya
4	Sendi lutut prostetik kuat menahan beban berat	Ya	Ya
5	Usaha untuk menggerakkan sendi lutut prostetik minimal	Ya	Ya
6	Sendi lutut prostetik cepat tanggap (<i>practical</i>)	Cukup	Cukup
7	Sendi lutut prostetik ekonomis	Ya	Ya
8	Sendi lutut prostetik memungkinkan kaki palsu ditumpangkan ke kaki yang bersebelahan	Tidak	Tidak
9	Mekanisme sendi lutut prostetik mempertahankan posisi kaki dengan mantap	Cukup	Ya
10	Sendi lutut prostetik tahan lama	Tidak	Ya
11	Sendi lutut prostetik mudah dirawat	Ya	Ya
12	Bentuk sendi lutut prostetik estetis	Tidak	Cukup
13	Mekanisme sendi lutut prostetik modern	Tidak	Ya
14	Suara yang dihasilkan oleh pergerakan sendi lutut prostetik minimal	Ya	Tidak
15	Sendi lutut prostetik ringan	Ya	Ya
16	Ukuran sendi lutut prostetik sama dengan lutut kaki yang normal	Tidak	Ya
17	Sendi lutut prostetik <i>adaptable</i>	Ya	Ya
18	Hubungan antarkomponen sendi lutut prostetik kencang	Ya	Ya
19	Engsel Sendi lutut prostetik dapat dikunci	Tidak	Tidak

Pengembangan konsep rancangan sendi lutut prostetik usulan dilanjutkan dengan langkah keempat, yaitu *systematic exploration*. Metode yang digunakan dalam proses ini adalah *morphological table* (Cross, 2000) yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 9. Metode ini dipilih karena *range* alternatif konsep yang dapat dihasilkan sangat luas. *Morphological*

table dibuat berdasarkan fungsi-fungsi yang ada pada *function diagram* sendi lutut prostetik. Setiap fungsi, yang merupakan suatu komponen atau mekanisme, ditentukan alternatif pemenuhannya dari hasil *internal* dan *external search*. Kombinasi alternatif fungsi pada setiap konsep ditentukan secara intuitif. *Output* dari proses ini adalah enam buah konsep awal sendi lutut prostetik usulan (A-F) yang dicantumkan pada Gambar 10.

Penilaian dan Pemilihan Alternatif Konsep

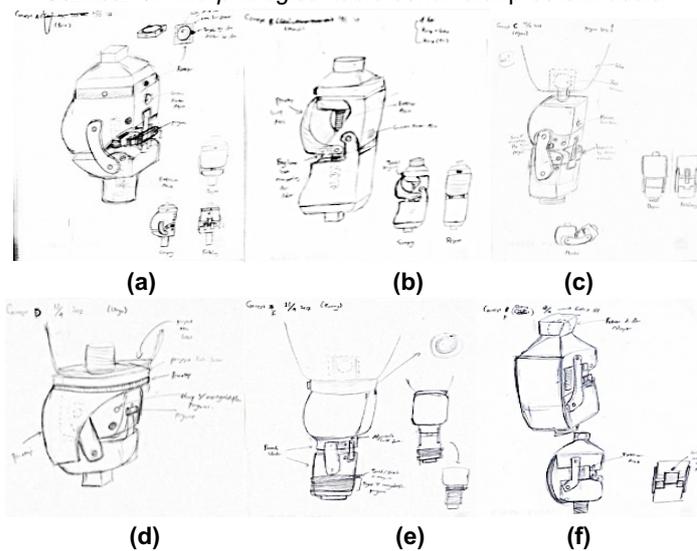
Cara penilaian dan pemilihan konsep rancangan sendi lutut prostetik mengacu pada *concept screening* dan *concept scoring* menurut Ulrich dan Eppinger (2012). Penilaian dan pemilihan konsep dilakukan oleh peneliti bersama dengan *expert* sendi lutut prostetik di bengkel KKD.

Concept screening dilakukan untuk memperkecil *scope* pemilihan konsep akhir dengan cara menyeleksi konsep-konsep produk yang paling memungkinkan untuk diwujudkan. Kriteria penilaian yang digunakan adalah daftar kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik. Dalam proses *concept screening*, Stanford Knee digunakan sebagai referensi pembandingan. Konsep-konsep yang memiliki *net score* tertinggi pada proses *concept screening* adalah konsep B, C, dan D. Sebelum dilanjutkan ke proses *concept scoring*, ketiga konsep tersebut disempurnakan dan direvisi berdasarkan masukan yang diperoleh dari para *expert*. Selain itu, dilakukan juga kombinasi antara konsep A dan D karena terdapat beberapa fungsi pada konsep A yang dinilai baik dan dapat memperbaiki fungsi pada konsep D.

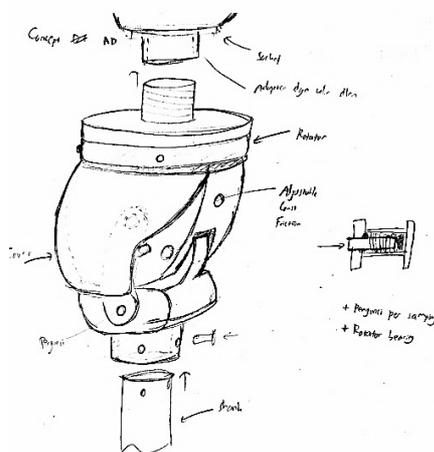
Tujuan pelaksanaan *concept scoring* adalah untuk memilih satu diantara konsep-konsep yang telah terpilih dari tahap *concept screening*. Kriteria yang digunakan untuk menilai setiap konsep sama dengan kriteria pada proses *concept screening*. Perbedaannya adalah adanya *weight* atau bobot yang diperoleh dari nilai *relative importance* masing-masing kebutuhan. Berdasarkan hasil *concept scoring* dan rekomendasi para *expert*, konsep AD yang dapat dilihat pada Gambar 11 terpilih sebagai konsep yang akan diwujudkan sebagai rancangan sendi lutut prostetik akhir.

Functions	Alternatives			
	1	2	3	4
Sambungan Socket & Sendi Lutut		Pyramid Adapter	Screw Adapter (Ulir) / Rod	
Mekanisme Pengganti Arah Pergerakan	Engsel Putar dan Tombol Rotator	Engsel Putar + Pin Penahan	Ball Joint	N/A
Bentuk Komponen Bagian Atas Sendi Lutut	Komponen Padat, Membulat	Komponen Berongga, Penutup		
Mekanisme Extension Assist	Spring / Per	Natural Swing		
Mekanisme Pengatur Constant Friction	Screw / Baut	Adjustable Discrete Screw	N/A	
Mekanisme Sistem Pengunci	Spring / Pegas Luar	Bearing Slide	Adjustable Screw	N/A
Mekanisme Sambungan Sendi Lutut	Four-Bar	Five-Bar		
Bentuk Komponen Bagian Bawah Sendi Lutut	Komponen Membulat	Komponen Tidak Membulat		
Sambungan Sendi Lutut & Shank	Pyramid Adapter	Round Connector	Ulir	

Gambar 9. Morphological table sendi lutut prostetik usulan



Gambar 10. Alternatif konsep awal sendi lutut prostetik (a) konsep A (b) konsep B (c) konsep C (d) konsep D (e) konsep E (f) konsep F

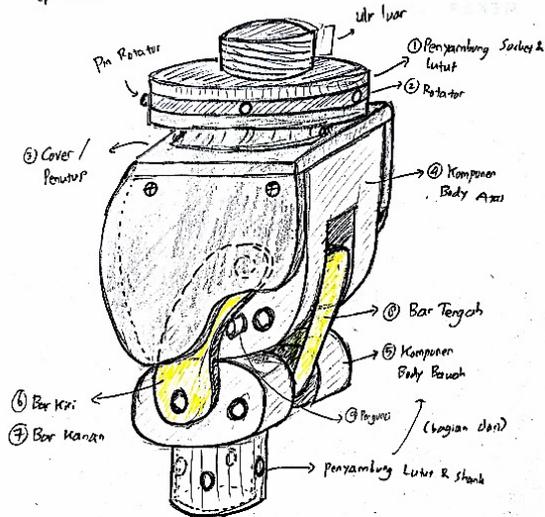


Gambar 11. Konsep rancangan sendi lutut prostetik usulan terpilih (AD)

Penyempurnaan Konsep Akhir dan Pembuatan Prototipe

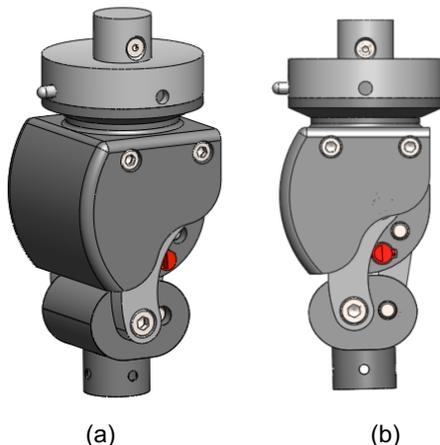
Rancangan akhir sendi lutut prostetik dibuat dalam bentuk gambar 3D CAD (*Computer Aided Design*) dengan menggunakan aplikasi Solidworks 2013. Gambar tersebut kemudian menjadi *analytical prototype* dari rancangan sendi lutut prostetik usulan. Selama proses pembuatan gambar CAD dilakukan perbaikan, modifikasi, dan penyesuaian bentuk komponen agar mekanisme rancangan dapat berfungsi semaksimal mungkin, sehingga konsep akhir yang telah disempurnakan diberi nama konsep AD+. Sketsa konsep AD+ dicantumkan pada Gambar 12.

Konsep AD+



Gambar 12. Konsep rancangan sendi lutut prostetik usulan yang telah disempurnakan (AD+)

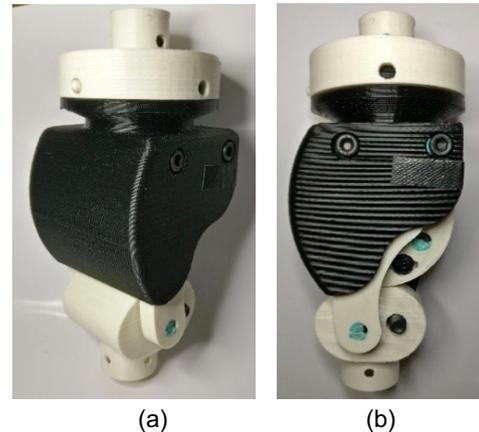
Setelah membuat *analytical prototype* yang dapat dilihat pada Gambar 13, dibuat *physical prototype* sendi lutut prostetik usulan. Jenis prototipe fisik yang dibuat dalam penelitian ini adalah prototipe *alpha* yang komprehensif. Prototipe fisik akan digunakan untuk keperluan komunikasi yang berkaitan dengan produk dan evaluasi. *Physical prototype* dibuat dengan cara *rapid prototyping* (3D Printer Da Vinci 1.0) dan proses pemesinan konvensional (bubut, *drilling*, gergaji). Prototipe fisik sendi lutut prostetik usulan dicantumkan pada Gambar 14.



Gambar 13. *Analytical prototype* sendi lutut prostetik usulan (a) proyeksi Ortogonal (b) Tampak Samping

Sendi lutut prostetik usulan merupakan *polycentric knee* yang digerakkan dengan *constant friction*. Pada rancangan akhir sendi lutut prostetik terdapat sepuluh buah komponen utama, sedangkan material yang

dipilih untuk semua komponen tersebut adalah *nylon*.



Gambar 14. *Physical prototype* sendi lutut prostetik usulan (a) proyeksi ortogonal (b) tampak samping

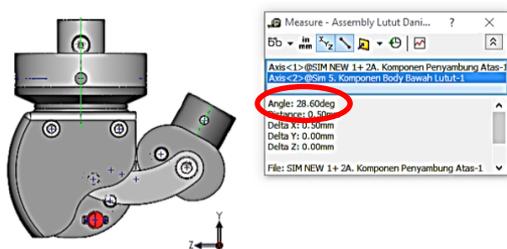
Komponen *assembly* yang digunakan meliputi sembilan buah sekrup dan tiga per. Ukuran komponen yang dirancang disesuaikan dengan *objective target values* dimensi tinggi dan lebar yang ditentukan pada HOQ, serta ukuran komponen serupa pada Stanford Knee.

Pada sendi lutut prostetik usulan terdapat dua buah mekanisme tambahan, yaitu mekanisme *rotator* yang digunakan untuk memutar sendi lutut pada porosnya ketika penggunaanya hendak menumpangkan kaki palsu ke kaki yang bersebelahan, dan mekanisme pengunci yang berguna bagi pengguna yang berada pada fase adaptasi.

Evaluasi Prototipe

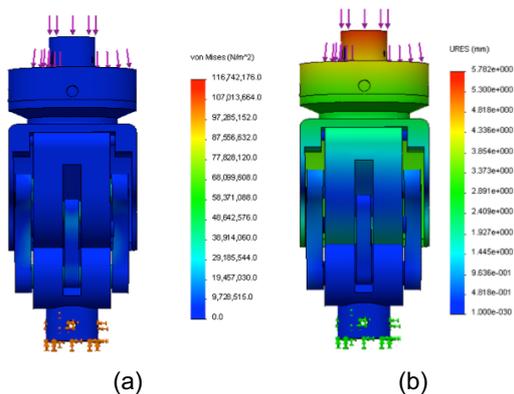
Agar rancangan sendi lutut prostetik dipastikan dapat memenuhi kebutuhan penggunaanya, dilakukan evaluasi berdasarkan daftar kebutuhan pengguna. Proses evaluasi dilakukan dengan dua cara, yaitu secara kuantitatif dan kualitatif. Evaluasi kuantitatif dilakukan terhadap prototipe analitis (gambar CAD) dengan cara simulasi pada *software Solidworks 2013*. Sedangkan evaluasi kualitatif dilakukan untuk semua kebutuhan pengguna dengan cara meminta penilaian subjektif *physical prototype* kepada para pembuat bagian tubuh palsu di bengkel KKD (*expert*). Evaluasi kuantitatif dilakukan untuk kebutuhan yang berkaitan dengan besaran yang terkuantifikasi, seperti besar derajat penekukan, kekuatan, biaya, massa, dan dimensi. Pengujian besar derajat penekukan maksimal dilakukan dengan cara mengukur

besar sudut yang dibentuk antara poros komponen *body* atas dan poros komponen *body* bawah sendi lutut prostetik pada keadaan fleksi dan ekstensi maksimal. Ilustrasi pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 15. Hasil pengujian besar derajat penekukan maksimal menunjukkan bahwa sendi lutut prostetik usulan memiliki derajat penekukan maksimal sebesar $151,4^{\circ}$ dan dapat melakukan sedikit *hyperextension* (menekuk ke depan melebihi garis netral) sebesar $0,9^{\circ}$.



Gambar 15. Pengukuran besar sudut penekukan maksimal sendi lutut prostetik usulan

Kemudian dilakukan pengujian kekuatan sendi lutut prostetik dengan beban sebesar 272 kilogram (setara dengan 2.665,6 Newton), atau dua kali beban maksimal pada *object target value* beban maksimal yang dapat ditopang. Hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa sendi lutut prostetik aman digunakan apabila beban yang diterima sendi lutut prostetik lebih tinggi dari beban yang dianjurkan, yaitu 136 kilogram. Hasil kedua pengujian dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Pengukuran kekuatan sendi lutut prostetik usulan (a) uji *stress* von mises (b) uji *displacement*

Kebutuhan akan sendi lutut prostetik yang kuat menahan beban berat dievaluasi dengan pengujian *stress* Von Mises dan *displacement*. Pada uji *stress* Von Mises, hasil simulasi

berupa pemetaan warna pada gambar rancangan yang menunjukkan besar *stress* yang dialami oleh bagian yang bersangkutan. Apabila *stress* Von Mises yang lebih besar dibandingkan *yield strength* bahan komponen yang bersangkutan (*yield strength* nylon = $60.000.000 \text{ N/m}^2$), maka bagian tersebut mengalami deformasi plastis.

Uji *displacement* dilakukan untuk melihat besar pergeseran yang terjadi pada komponen-komponen sendi lutut prostetik ketika menopang beban yang diberikan. Hasil yang diperoleh dari simulasi ini adalah gambar CAD dengan pemetaan warna yang menunjukkan nilai *displacement* (dalam millimeter) yang terjadi pada setiap bagian.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak terdapat bagian yang mengalami *stress* lebih tinggi dibandingkan *yield strength* nylon. Sedangkan pada pengujian kekuatan dengan uji *displacement*, diketahui bahwa *displacement* maksimal hanya mencapai 5 milimeter. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kekuatan akan sendi lutut prostetik yang kuat terpenuhi.

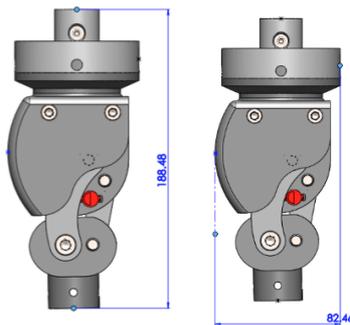
Kebutuhan akan sendi lutut prostetik yang ekonomis dievaluasi dengan cara membuat skenario estimasi biaya pembuatan sederhana yang dicantumkan pada Tabel 6. Estimasi biaya pembuatan sendi lutut prostetik dilakukan untuk memastikan bahwa rancangan sendi lutut prostetik usulan *feasible* untuk diterapkan dan ekonomis. Diasumsikan bahwa sendi lutut prostetik dapat dijual dengan keuntungan sebesar 100% agar harga jual sesuai dengan *object target value* harga dan terjangkau bagi pengguna dengan kemampuan ekonomi menengah ke bawah.

Tabel 6. Hasil perhitungan estimasi biaya pembuatan dan harga sendi lutut prostetik usulan

Jenis Biaya	Nominal
Total Biaya Bahan Baku per Unit	Rp467.515,15
Total Biaya Komponen Assembly per Unit	Rp11.500,00
Total Biaya Alat dan Bahan Produksi per Unit	Rp10.000,00
Total Biaya Sewa Mesin per Unit	Rp444.000,00
Total Biaya Tenaga Kerja per Unit	Rp142.183,1
Total Biaya Pembuatan 1 Unit	Rp1.075.198,25
Harga Jual 1 Unit (Keuntungan 50%)	Rp1.612.797,38

Kebutuhan akan sendi lutut prostetik yang ringan dievaluasi dengan cara melihat massa rancangan sendi lutut prostetik usulan pada simulasi gambar CAD *assembly*. Dari hasil pengujian ini diketahui bahwa satu unit sendi lutut prostetik bermassa 598,62 gram.

Evaluasi kuantitatif berikutnya yang dilakukan adalah pengukuran dimensi sendi lutut prostetik usulan, yang dilakukan dengan cara melakukan pengukuran tinggi dan lebar keseluruhan sendi lutut prostetik usulan. Pengukuran dilakukan pada *analytical prototype* sendi lutut prostetik usulan dalam keadaan lurus (netral), dan dibantu menggunakan *sketch* untuk menentukan titik-titik pengukuran yang dibutuhkan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa secara keseluruhan tinggi sendi lutut prostetik usulan adalah 188,84 milimeter, sedangkan ukuran lebar keseluruhan sendi lutut prostetik usulan adalah 82,46 milimeter.



Gambar 17. Pengukuran dimensi sendi lutut prostetik usulan

Evaluasi kuantitatif terakhir yang dilakukan adalah pengukuran jarak antara poros dengan lubang pada rancangan sendi lutut prostetik. Dalam proses perancangan komponen-komponen dengan lubang untuk sekrup, ditentukan toleransi sebesar 0,5 milimeter sebagai dasar penentuan ukuran lubang. Oleh karena itu, ukuran lubang disesuaikan dengan ukuran sekrup yang ada secara umum. Hal ini dibuktikan oleh pengecekan jarak antara diameter luar sekrup (poros) dan diameter lubang. Karena jarak antara lubang dan poros berkisar antara 0,3 – 0,4 milimeter, maka dapat diyakini bahwa hubungan antara sekrup dan lubang yang dibuat kencang.

Berdasarkan hasil evaluasi secara kualitatif, diketahui bahwa bentuk keseluruhan sendi lutut prostetik usulan dinilai menyerupai bentuk sendi lutut asli manusia. Hal ini disebabkan

oleh adanya *cover* yang berbentuk membulat pada komponen *body* bagian atas. Hasil evaluasi kualitatif juga menunjukkan bahwa sendi lutut prostetik dinilai dapat digunakan untuk berjalan cepat dan naik tangga dengan mantap. Oleh karena itu, sendi lutut prostetik usulan dinilai dapat memiliki ambulasi *single speed* dan *impact level* yang cukup tinggi (*high*), sehingga penggunaan sendi lutut prostetik tersebut cukup luas atau *versatile*. Selain itu, para *expert* menyatakan bahwa sendi lutut prostetik usulan menimbulkan suara yang tidak mengganggu, cukup *adaptable*, akan tahan lama, cukup mudah dirawat, cukup praktis, *modern*, mudah digerakkan dan menghasilkan pergerakan ayunan kaki yang *natural*.

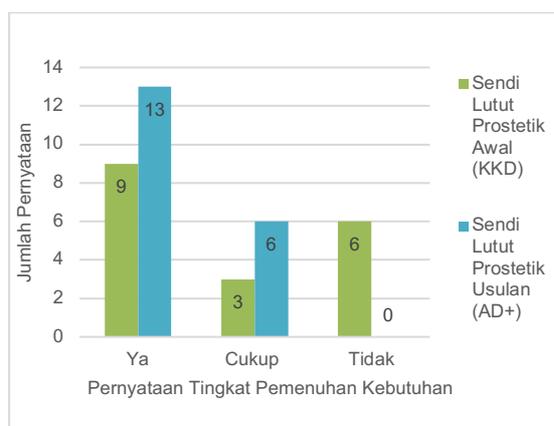
Produk yang sudah dibuat menggunakan 3D printing kemudian dievaluasi. Hasil evaluasi akhir pemenuhan kebutuhan pengguna (*user*) dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Penyimpulan hasil evaluasi akhir dinyatakan dalam bentuk pernyataan “ya”, “cukup”, dan “tidak”. Pernyataan “ya” berarti bahwa kebutuhan yang bersangkutan benar-benar terpenuhi dengan baik. Pernyataan “cukup” berarti kebutuhan terpenuhi, namun tidak secara baik sehingga dapat dilakukan penyempurnaan rancangan lebih lanjut. Pernyataan “tidak” berarti kebutuhan sama sekali tidak terpenuhi sehingga rancangan harus segera diperbaiki (lihat Tabel 7).

Tabel 7. Hasil evaluasi rancangan sendi lutut prostetik usulan

No	Kebutuhan	Kebutuhan Terpenuhi?
1	Sendi lutut prostetik memiliki derajat penekukan yang besar	Ya
2	Sendi lutut prostetik multifungsi (<i>versatile</i>)	Cukup
3	Mekanisme sendi lutut prostetik menghasilkan pergerakan kaki yang menyerupai kaki normal	Ya
4	Sendi lutut prostetik kuat menahan beban berat	Ya
5	Usaha untuk menggerakkan sendi lutut prostetik minimal	Ya
6	Sendi lutut prostetik cepat tanggap (<i>practical</i>)	Cukup
7	Sendi lutut prostetik ekonomis	Ya
8	Sendi lutut prostetik memungkinkan kaki palsu ditumpangkan ke kaki yang bersebelahan	Cukup
9	Mekanisme sendi lutut prostetik mempertahankan	Ya

No	Kebutuhan	Kebutuhan Terpenuhi?
	posisi kaki dengan mantap	
10	Sendi lutut prostetik tahan lama	Ya
11	Sendi lutut prostetik mudah dirawat	Cukup
12	Bentuk sendi lutut prostetik estetik	Ya
13	Mekanisme sendi lutut prostetik modern	Ya
14	Suara yang dihasilkan oleh pergerakan sendi lutut prostetik minimal	Cukup
15	Sendi lutut prostetik ringan	Ya
16	Ukuran sendi lutut prostetik sama dengan lutut kaki yang normal	Ya
17	Sendi lutut prostetik <i>adaptable</i>	Ya
18	Hubungan antarkomponen sendi lutut prostetik kencang	Ya
19	Engsel sendi lutut prostetik dapat dikunci	Cukup

Berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa terdapat 13 buah kebutuhan (68,42% dari total) yang terpenuhi dengan baik dan 6 kebutuhan (31,58% dari total) yang cukup terpenuhi. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa semua kebutuhan pengguna terpenuhi oleh rancangan sendi lutut prostetik usulan. Agar dapat membandingkan tingkat pemenuhan kebutuhan yang dicapai oleh sendi lutut prostetik usulan, dibuat perbandingan antara sendi lutut prostetik awal (KKD) dengan sendi lutut prostetik usulan yang dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Grafik rekapitulasi hasil penilaian tingkat pemenuhan kebutuhan pengguna untuk sendi lutut prostetik awal (KKD) dan sendi lutut prostetik usulan (AD+)

Pada Gambar 18, dapat dilihat bahwa sendi lutut prostetik usulan memiliki jumlah pernyataan “ya” dan “cukup” yang lebih banyak dibandingkan hasil penilaian sendi lutut prostetik KKD. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa sendi lutut prostetik usulan dapat meningkatkan tingkat pemenuhan kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik.

Sendi lutut hasil yang telah melalui pengujian dan penilaian ini akhirnya disambungkan dengan bagian betis dan telapak kaki seperti yang dapat dilihat pada Gambar 189



Gambar 19. Prototipe akhir sendi lutut yang telah digabungkan dengan bagian bawah lutut

Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Terdapat beberapa kebutuhan pengguna yang belum terpenuhi oleh sendi lutut prostetik awal. Kebutuhan-kebutuhan yang belum terpenuhi antara lain kebutuhan akan sendi lutut yang memiliki derajat penekukan yang besar, cepat tanggap (*practical*), memungkinkan kaki palsu ditumpangkan ke kaki yang bersebalahan, tahan lama, berbentuk estetik, memiliki mekanisme modern, berukuran sama dengan sendi lutut kaki yang normal, dan dapat dikunci.
2. Konsep rancangan perbaikan sendi lutut prostetik yang dianggap paling ideal dan dapat meningkatkan tingkat pemenuhan kebutuhan pengguna adalah konsep AD+. Adapun perincian spesifikasi konsep

rancangan sendi lutut prostetik usulan adalah sebagai berikut:

- i. Memiliki mekanisme *polycentric*.
 - ii. Memiliki jenis penggerak *constant friction*.
 - iii. Memiliki dimensi tinggi 188,84 milimeter dan lebar 82,46 milimeter.
 - iv. Memiliki bentuk keseluruhan menyerupai sendi lutut asli manusia karena memiliki *cover* yang berbentuk membulat pada komponen *body* bagian atas.
 - v. Memiliki sudut penekukan maksimal sebesar $151,4^{\circ}$ dan *hyperextension* sebesar $0,9^{\circ}$.
 - vi. Memiliki massa sebesar 598,62 gram.
 - vii. Dapat menopang beban maksimal sebesar 272 kilogram (2 kali beban maksimal yang dianjurkan).
 - viii. Terbuat dari material *nylon* (untuk 10 komponen utama) dan besi (untuk sekrup dan pegas).
 - ix. Memiliki harga jual Rp 1.612.797,38 (keuntungan 50%)
 - x. Memiliki ambulasi *single speed* dan *impact level high*.
 - xi. Memiliki fitur tambahan yaitu *rotator* dan pengunci.
3. Hasil evaluasi rancangan sendi lutut prostetik usulan secara kuantitatif dan kualitatif menunjukkan bahwa semua kebutuhan pengguna sendi lutut prostetik terpenuhi oleh rancangan sendi lutut prostetik usulan. Di antara sejumlah kebutuhan pengguna yang menjadi kriteria evaluasi, 68,42% kebutuhan terpenuhi secara baik dan 31,58% kebutuhan cukup terpenuhi.

Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik. (2022). *Survei Sosial Ekonomi Nasional*. Biro Pusat Statistik. Jakarta: Biro Pusat Statistik.
- Berke, G., Buell, N., Ferguson, J., Gailey, R., Hafner, B., Hubbard, S., et al. (2008). *Transfemoral Amputation: The Basics and Beyond. Prosthetics Research Study*.
- Bhagwan Mahaveer Viklang Sahayata Samiti . (2022, November 12). *Stanford Jaipur Knee*. Retrieved November 12, 2022, from Jaipur Foot: <https://www.jaipurfoot.org/stanford-jaipur-knee/>
- Cross, N. (2000). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design (Third Edition)*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Engineering For Change. (2022, November 12). *Remotion Knee V3*. Retrieved November 12, 2022, from <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/remotion-knee/>
- Hajon, A. M. (2016). *Usulan Perbaikan Rancangan Kaki Palsu di Bengkel Kelompok Kreativitas Difabel*. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan.
- Healthline, E. (2015, April 6). *In Depth: Leg*. Retrieved from [www.healthline.com: http://www.healthline.com/human-body-maps/leg#seoBlock](http://www.healthline.com/human-body-maps/leg#seoBlock)
- Japro Medika. (2017). *Daftar Harga Kaki Palsu, Tangan Palsu, dan Alat Bantu Ortopedi*. Retrieved from japromedika.com.
- Kementerian Sosial Republik Indonesia. (2012). *Kementerian Sosial dalam Angka: Pembangunan Kesejahteraan Sosial*. Jakarta: Badan Pendidikan dan Penelitian Sosial. Pusdatin Kesejahteraan Sosial. .
- Kroemer, K., Kroemer, H., & Kroemer-Elbert, K. (2001). *Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency, Second Edition*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Limbless Association. (2012, November). Retrieved from [www.limbless-association.org: http://www.limbless-association.org/images/Types_of_Amputation.pdf](http://www.limbless-association.org/images/Types_of_Amputation.pdf)
- Norton, K. M. (2007). *A Brief History of Prosthetics*. Manassas: Amputee Coalition.
- Otto, K., & Wood, K. (2001). *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Quigley, C.P.O., M. J. (2002). *Digital Resource Foundation for the Orthotics & Prosthetics Community Virtual Library Project*. Retrieved from Chapter 4 - Atlas of Limb Prosthetics: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles : Prosthetic Management : Overview, Methods, and Materials: <http://www.oandplibrary.org/alp/chap04-01.asp>
- Schrott, H. (2009, September). *Design for the Disabled*. Retrieved from [www.wipo.int: http://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2009/05/article_0009.html](http://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2009/05/article_0009.html)

DOI: <https://doi.org/10.26593/jrsi.v12i1.6207.65-80>

Singh, D. P. (2015, September). *Knee Range of Motion and Movements*. Retrieved from boneandspine.com:
<http://boneandspine.com/knee-range-of-motion/>

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Product Design and Development: Fifth Edition*. New York: McGraw-Hill.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada LPPM Universitas Katolik Parahyangan atas hibah penelitian sehingga penelitian ini berjalan dengan baik.

Juga terima kasih kepada anggota Kelompok Kreativitas Difabel (KKD): Bapak Indra, Bapak Jono, Bapak Anwar, Bapak Iwan, Bapak Didin, dan segenap rekan-rekan di Kelompok Kreativitas Difabel yang bersedia memberikan waktu, menjadi narasumber.