



PAPER – OPEN ACCESS

Perbaikan Rancangan Sistem Mekanisme Strut Pada Fiksator Eksternal Berbasis Hexapod Untuk Meningkatkan Performansi

Author : Adhe Aji Wirawan, dkk
DOI : 10.32734/ee.v2i3.765
Electronic ISSN : 2654-704X
Print ISSN : 2654-7031

Volume 2 Issue 3 – 2019 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Perbaikan Rancangan Sistem Mekanisme Strut Pada Fiksator Eksternal Berbasis Hexapod Untuk Meningkatkan Performansi

Adhe Aji Wirawan^a, Lobes Herdiman^b, Susy Sumartini^c

Mahasiswa Departemen Teknik Industri¹, Dosen Departemen Teknik Industri^{2,3}
Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

adheajiwirawan@gmail.com^a, lobesh@gmail.com^b, susysus2011@gmail.com^c

Abstract

Gangguan dalam mobilitas adalah gangguan yang sering menjadi penyebab seseorang menjadi disabilitas. Salah satu gangguan mobilitas adalah disebabkan oleh penyakit *blount disease*. *Blount disease* adalah kelainan proses osifikasi pada proksimal tulang tibialis yang menyebabkan deformitas progresif pada anggota gerak bawah. Taylor Spatial Frame (TSF) merupakan perangkat fiksasi eksternal yang dapat menangani deformitas multiplanar. TSF memiliki harga yang relatif mahal bagi masyarakat Indonesia. Replika TSF dengan harga yang jauh lebih murah telah dibuat. Namun replika TSF ini memiliki kendala penurunan performansi jika dibandingkan dengan aslinya terutama pada akurasi dalam proses rekonstruksi tulang. Kurangnya akurasi dalam proses rekonstruksi dipengaruhi oleh akurasi pergerakan strut. *Strut* merupakan komponen TSF yang terdiri dari silinder dengan *threaded rod* dapat dinaikkan atau diturunkan terhadap silinder dengan memutar kepala *strut* yang memiliki interval 1 mm per 360°. Perbaikan dilakukan dengan metode *Value Engineering*. Terdapat dua alternatif perbaikan yang diberikan yang kemudian dilakukan evaluasi terkait performansi menggunakan pendekatan *Analytical Hierarchy Process*. Hasil yang didapatkan adalah alternatif rancangan yang memiliki nilai performansi yang lebih baik dari sebelumnya. *Value* dari alternatif terpilih jauh meningkat dari yang sebelumnya pada rancangan awal dengan 1.06763E-08 menjadi 2.02079E-08 pada alternatif rancangan terpilih.

Kata Kunci : *fiksasi eksternal, hexapod, strut, rekonstruksi tulang, value engineering, analytical hierarchy process*

Abstract

Disorders in mobility are disorders that often cause a person to become a disability. One mobility disorder is caused by a blount disease. Blount disease is an abnormality of the process of ossification in the proximal tibial bone which causes progressive deformity in the lower limbs. Taylor Spatial Frame (TSF) is an external fixation device that can handle multiplanar deformities. TSF has a relatively expensive price for the people of Indonesia. TSF replicas at much cheaper prices have been made. However, this TSF replica has a decreased performance problem when compared to the original, especially in accuracy in the bone reconstruction process. The lack of accuracy in the reconstruction process is influenced by the accuracy of strut movements. Strut is a TSF component consisting of a cylinder with a threaded rod that can be raised or lowered against the cylinder by turning the strut head which has an interval of 1 mm per 360°. Improvements were made using the Value Engineering method. There are two alternative improvements given which are then evaluated related to performance using the Analytical Hierarchy Process approach. The results obtained are design alternatives that have better performance values than before. The value of the selected alternative is much increased from the previous one in the initial design with 1.06763E-08 to 2.02079E-08 on the chosen alternative design.

Keywords: external fixation, hexapod, strut, bone reconstruction, value engineering, analytical hierarchy process

1. Pendahuluan

Penanganan disabilitas merupakan topik yang saat ini telah menjadi perhatian global, terutama setelah dikeluarkannya Resolusi PBB No. 61 Tahun 2006 tentang *Convention on the Right of Persons with Disabilities* (CRPD). Indonesia merupakan salah satu negara yang ikut menandatangani CRPD, dan pada tahun 2011 telah diratifikasi dan diatur dalam peraturan nasional. Menurut CRPD, disabilitas merupakan hasil interaksi antara keterbatasan fungsi individu dengan kondisi lingkungan sekitar yang menghambat partisipasi aktif dan efektif dalam masyarakat [1]. Berdasarkan Survei Angkatan Kerja Nasional (Sakernas) 2016, keterbatasan fungsi individu tersebut dapat dikelompokkan menjadi 5 jenis, yaitu kesulitan di dalam penglihatan, kesulitan di dalam pendengaran, gangguan dalam mobilitas, kesulitan di dalam mengingat, dan kesulitan di dalam menjaga diri/*self care* [2].

Gangguan mobilitas mengacu pada ketidakmampuan seseorang untuk menggunakan satu atau lebih anggota gerakannya. Gangguan mobilitas dapat disebabkan oleh sejumlah faktor, seperti penyakit, kecelakaan, dan atau kelainan bawaan yang berpengaruh langsung pada tulang maupun otot dan saraf [3]. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan deformitas pada tulang. *Blount disease* adalah kelainan proses osifikasi pada proksimal tulang tibialis ditangani dengan tindakan koreksi yang disebut rekonstruksi tulang.

Kejadian deformitas tersebut tergolong dalam deformitas kompleks dan untuk melakukan tindakan koreksi membutuhkan rekonstruksi tulang dalam 3 dimensi [4]. *Taylor Spatial Frame* (TSF) merupakan perangkat fiksasi eksternal yang dapat menangani deformitas multiplanar/ multiaksial (deformitas yang melibatkan lebih dari satu bidang) (Paloski, 2012). *Taylor Spatial Frame* merupakan perangkat rekonstruksi tulang dengan sistem *hexapod stewart platform* hasil modifikasi sistem fiksator Ilizarov. Komponen *Taylor Spatial Frame* secara umum terdiri dari dua buah *ring* yang dihubungkan dengan enam buah *strut* teleskopis yang dapat berputar secara bebas dari titik sambung *strut* tersebut terhadap *ring* [5].

Strut merupakan komponen yang terdiri dari silinder dengan *threaded rod* di dalamnya, *rod* tersebut dapat dinaikkan atau diturunkan terhadap silinder dengan memutar kepala *strut*. *Threaded rod* yang digunakan pada fiksator ini memiliki diameter mayor 6 mm dengan *pitch* 1 mm sehingga satu kali pemutaran kepala *strut* dapat mengubah panjang *strut* sepanjang 1 mm. Hal ini untuk menyesuaikan rasio pertumbuhan jaringan tulang baru, yaitu 1 mm per hari [6]. Panjang *strut* dapat diubah dengan interval tertentu supaya posisi *ring* satu dapat berubah terhadap *ring* yang lain [7], sehingga terjadi proses pembentukan jaringan tulang dalam enam derajat kebebasan. Pemasangan fiksator pada tulang dilakukan dengan *key wire* (kawat) atau *half pin* [8].

Replika *Taylor Spatial Frame* telah dibuat oleh Apriani pada tahun 2016. Penelitian yang dilakukan Apriani menghasilkan alternatif desain dengan *spherical plain bearing* untuk mengatasi permasalahan kebutuhan *clearance* (kelonggaran) pada ujung *joint* terhadap *ring*, dengan demikian kekocakan dapat direduksi. Pada penelitian tersebut jenis *strut* yang digunakan merupakan *standard strut* dari TSF. Penggunaan replika *standard strut* dari TSF dinilai memiliki kekurangan dalam hal tingkat ketelitian pemutaran *strut*. Hal ini disebabkan karena “klik” yang dirancang sebagai penanda saat kepala *strut* telah berotasi satu putaran penuh tidak bekerja sesuai dengan fungsinya, lain halnya dengan *standard strut* dari TSF yang “klik”-nya dapat dirasakan oleh pengguna saat memutar kepala *strut*.

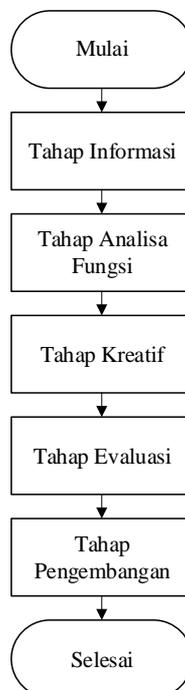
Sistem *standard strut* pada TSF merupakan sistem yang paling sederhana jika dibandingkan dengan produk-produk fiksator eksternal berbasis *hexapod* lain seperti, Ortho-SUV, dan TL-Hex. *Strut* pada produk-produk tersebut untuk saat ini belum ada informasi yang aktual mengenai *direction lock*, yaitu kondisi saat *strut* dioperasikan masih dapat difungsikan untuk pemanjangan atau pemendekan *strut* tanpa ada mekanisme untuk mengatur sebagai satu fungsi saja. Sedangkan menurut ahli dalam bidang ortopedi dan perancangan fiksator eksternal, satu *strut* dalam proses rekonstruksi tulang hanya memungkinkan untuk dioperasikan sebagai fungsi pemanjangan saja atau pemendekan saja. Masalah yang timbul selain fungsionalitas yang belum mampu mengakomodasi kebutuhan pengguna, adalah masalah harga yang ditawarkan oleh vendor dari produk-produk tersebut yang relatif mahal bagi masyarakat Indonesia. Sebagai contoh adalah satu set *Taylor Spatial Frame* (dua buah full ring dan enam buah *standard strut*) memiliki harga berkisar £9500 atau Rp 153.784.072,00. Harga frame tersebut belum termasuk biaya software, biaya pemasangan, dan biaya operasional secara berkala [9].

Berdasarkan kedua permasalahan tersebut, maka salah satu solusi yang dapat diberikan adalah dengan merancang sistem mekanisme *strut* yang mampu mengatasi kendala teknis dan operasional dengan biaya yang dapat dijangkau oleh masyarakat Indonesia. Oleh karena itu diperlukan penanganan sistematis yang mempertimbangkan biaya tanpa mengurangi, bahkan dapat meningkatkan mutu desain. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan pendekatan *value engineering*. *Value engineering* (rekayasa nilai) merupakan salah satu pendekatan

yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah-masalah yang telah disebutkan sebelumnya. Menurut U.S. Army Corps Of Engineers, value engineering didefinisikan sebagai teknik yang digunakan untuk mengevaluasi proyek, produk, dan proses dengan tujuan mencapai keseimbangan optimal antara kinerja, kualitas, keamanan, dan biaya. Value Engineering dapat mengidentifikasi fungsi dari produk atau jasa, membangun nilai dari fungsi tersebut, menghasilkan alternatif melalui penggunaan pemikiran kreatif, dan menyediakan yang dibutuhkan oleh fungsi tersebut, dengan andal, dengan biaya yang rendah. Teknik ini dapat digunakan untuk mengevaluasi indeks nilai terbaik untuk mengatasi kendala teknis dan operasional pada sistem mekanisme strut fiksator eksternal berbasis hexapod.

2. Metode Penelitian

Metode *value engineering* digunakan sebagai solusi untuk mengatasi kendala pada kasus perancangan fiksator eksternal. *Value engineering* adalah suatu teknik dan manajemen yang menggunakan pendekatan sistematis untuk mencapai keseimbangan fungsional terbaik antara biaya dan peformansi dari produk. [10,3,4] menyatakan *value engineering* sebagai penerapan sistematis dari sejumlah teknik untuk mengidentifikasi fungsi-fungsi suatu benda dan jasa dengan memberi nilai terhadap masing-masing fungsi yang ada serta mengembangkan sejumlah alternatif yang memungkinkan tercapainya fungsi tersebut dengan biaya total minim.



Gambar 1. Flowchart Metode Value Engineering

A. Tahap Informasi

Tahap ini bertujuan untuk memahami seluruh aspek yang berkaitan dengan kasus yang akan di bahas dengan jalan mengumpulkan informasi sebanyak mungkin. Pendeskripsian produk serta penguraian spesifikasi produk dilakukan. Pada tahap ini juga menjawab permasalahan tentang siapa yang melakukan, apa yang dapat dilakukan, dan apa yang seharusnya tidak dilakukan. Tujuan dilakukan tahap ini adalah untuk memudahkan dalam melakukan tahap selanjutnya baik dari segi desain, manufaktur, maupun finansialnya.

B. Tahap Analisis Fungsi

Tahap analisis fungsi merupakan basis utama dalam *value engineering*. Pada tahap ini dilakukan pendefinisian fungsi, mengevaluasi hubungan antar fungsi (dengan diagram FAST), dan mengidentifikasi biaya tiap fungsi tersebut. Analisis ini membantu dalam menentukan biaya terendah yang diperlukan untuk melaksanakan fungsi-fungsi utama dan fungsi-fungsi pendukung dan mengidentifikasi biaya-biaya yang dapat dikurangi atau dihilangkan tanpa mempengaruhi kinerja atau kendala produk. Tujuan pada fase ini adalah untuk mengembangkan/menentukan

daerah yang menguntungkan untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

C. Tahap Kreatif

Tahap ini bertujuan untuk mengembangkan sebanyak mungkin alternatif-alternatif yang memenuhi fungsi yang diperlukan. Kreatifitas sangat berperan dalam mendapatkan alternatif-alternatif yang dibutuhkan. Suatu ide kreatif bisa dapat membawa ide-ide baru lainnya. Ide-ide yang diajukan tidak dibatasi oleh suatu aturan tertentu. Dalam tahap kreatif jumlah serta ragam gagasan diusahakan sebanyak mungkin. Semakin banyak gagasan yang diajukan maka tahapan ini akan semakin berhasil.

D. Tahap Evaluasi

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap alternatif-alternatif yang dihasilkan dari tahap kreatif dan dilakukan pemilihan alternatif dengan nilai terbesar. Pada tahap ini akan diteliti kelebihan dan kekurangan ide-ide untuk menghasilkan alternatif. Selama tahap analisis, jumlah ide yang dikembangkan dan diteliti akan berkurang. Prioritas terhadap suatu ide dapat didasarkan atas biaya yang diperlukan untuk melaksanakan ide yang bersangkutan. Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan dalam mengevaluasi, tahapan tersebut sebagai berikut :

1. Membangkitkan Kriteria Performansi. Pembangkitan kriteria performansi dilakukan dengan pendekatan Delphi.
2. Menghitung Bobot tiap Kriteria. Pembobotan kriteria dilakukan dengan pendekatan *Analytical Hierarchy Process*.
3. Menghitung Bobot tiap Alternatif. Pembobotan alternatif dilakukan dengan pendekatan *Analytical Hierarchy Process*.
4. Menentukan Nilai Performansi tiap Alternatif
5. Menentukan Rancangan Biaya tiap Alternatif
6. Menghitung *Value* tiap Alternatif

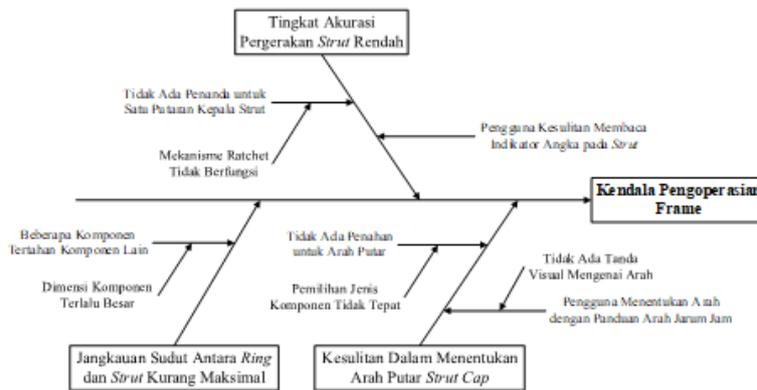
E. Tahap Pengembangan

Pada tahap ini dilakukan penyempurnaan dan penyesuaian terhadap alternatif yang telah dipilih. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mempersiapkan rekomendasi akhir yang tertulis bagi alternatif yang terpilih untuk diimplementasikan termasuk pertimbangan faktor-faktor teknis dan ekonomis yang secara lengkap dikembangkan untuk memungkinkan diimplementasikan.

3. Pembahasan

a) Tahap Informasi

Pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah mengenai penggunaan TSF tipe replika (fiksator eksternal dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut*). Deskripsi permasalahan didapat melalui observasi dan wawancara mengenai penggunaan fiksator eksternal berbasis *hexapod* menggunakan *spherical plain bearing*. Hasil wawancara menunjukkan terdapat kendala pada saat mengoperasikan *frame*. Selanjutnya dilakukan observasi lebih lanjut untuk mengetahui penyebab kendala tersebut menggunakan diagram sebab akibat (Gambar 2.)



Gambar 2. Diagram Sebab Akibat Kendala Pengoperasian *Frame*

Diketahui bahwa terdapat tiga kendala yang teridentifikasi yaitu, kendala tingkat akurasi pergerakan strut rendah, kesalahan dalam menentukan arah putaran kepala *strut* oleh pengguna, dan sudut antara ring dan *strut* kurang maksimal, Setelah dilakukan observasi lebih lanjut, diidentifikasi bahwa kendala tingkat akurasi pergerakan strut rendah dan kesalahan dalam menentukan arah putaran kepala *strut* bersumber dari komponen *strut*. Seperti yang dijelaskan sebelumnya fungsi *strut* merupakan bagian yang sangat penting dalam proses rekonstruksi tulang menggunakan fiksator eksternal berbasis *hexapod*. Maka dari itu, pada penelitian ini perbaikan rancangan akan

diprioritaskan pada *strut*. Secara ringkas informasi penyebab kendala penggunaan fiksator eksternal dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut* dapat dilihat pada Tabel 1.

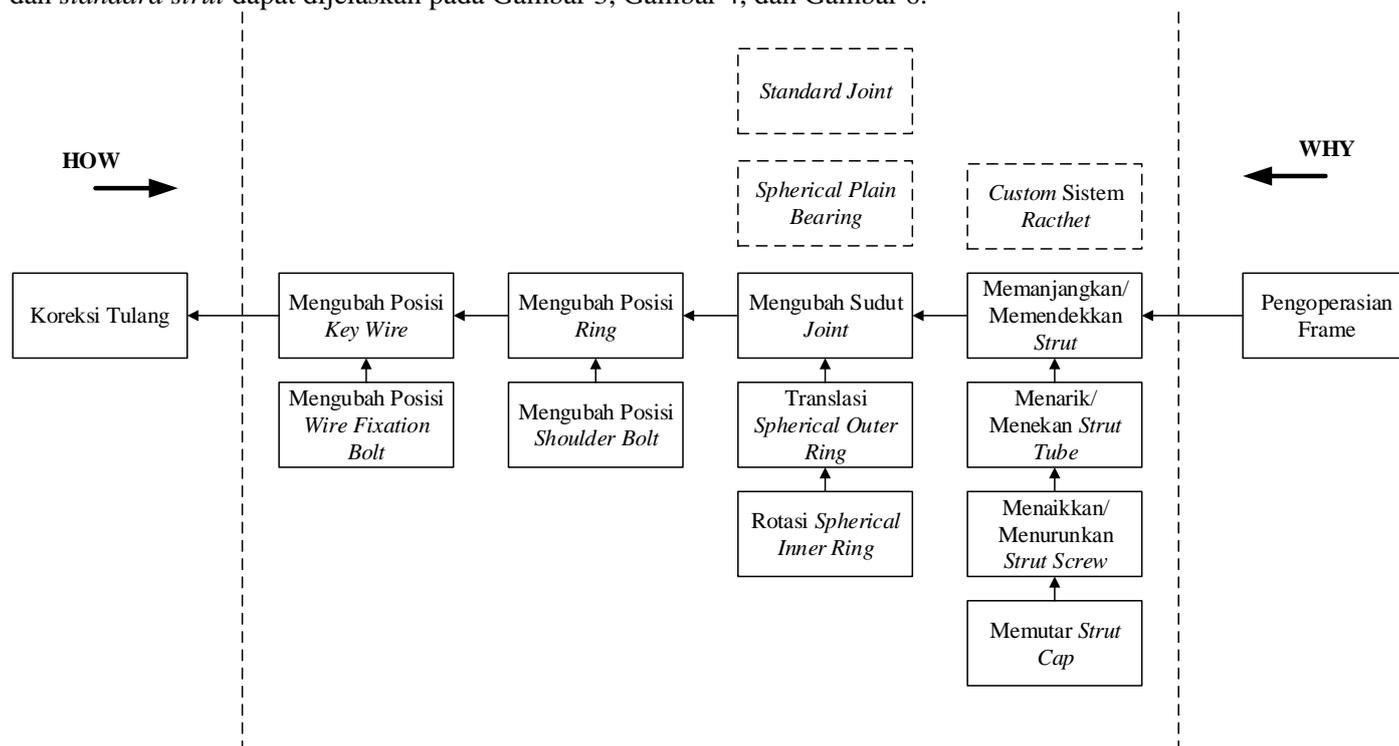
Tabel 1. Informasi Penyebab Kendala Penggunaan Fiksator Eksternal dengan *Spherical Plain Bearing* dan *Standard Strut*

No	Penyebab Kendala
1	Mekanisme <i>ratchet</i> tidak berfungsi
2	Pemilihan jenis mekanisme dan komponen tidak tepat

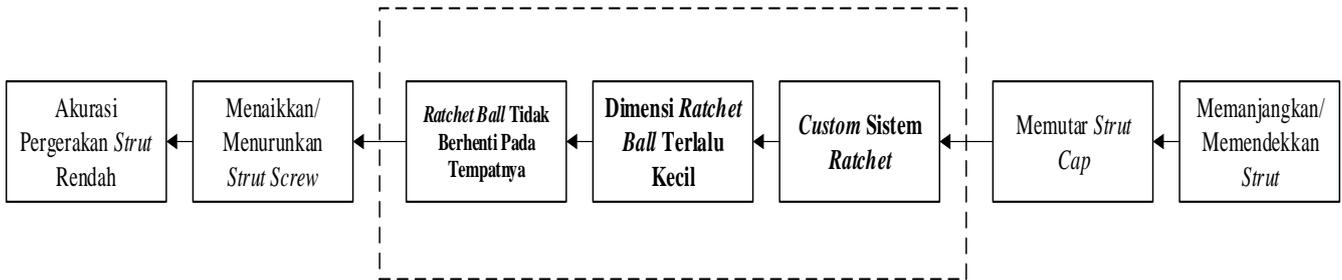
A. Tahap Analisis Fungsi

Pada tahap ini dilakukan identifikasi fungsi-fungsi fiksator eksternal dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut*. Identifikasi fungsi dilakukan dengan menggambarkan tahapan yang terjadi ketika mengoperasikan fiksator eksternal dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut*. Langkah selanjutnya adalah menyusun fungsi tersebut kedalam diagram *Function Analysis System Technique* (FAST). *Function Analysis System Technique* (FAST diagram) merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis fungsi produk dalam *value analysis*. FAST berguna untuk mengetahui fungsi apakah yang diperlukan untuk memenuhi fungsi utama, sehingga akan membantu dalam melakukan *value engineering* dan mengeliminasi fungsi yang tidak diperlukan [10].

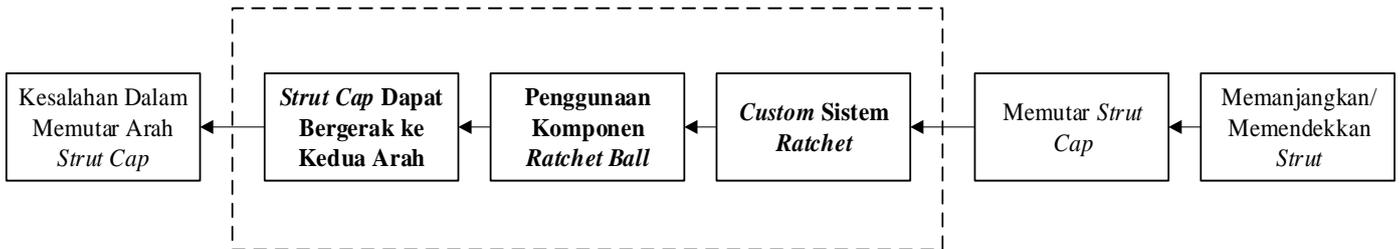
Diagram FAST fiksator external dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut* digunakan untuk mengevaluasi informasi penyebab kendala penggunaan *strut* yang bertujuan untuk mengidentifikasi akar masalah. Identifikasi akar masalah dari tiap penyebab kendala penggunaan fiksator eksternal dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut* dapat dijelaskan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 6.



Gambar 3. Diagram FAST Fiksator Eksternal dengan *Spherical Plain Bearing* dan *Standard Strut*



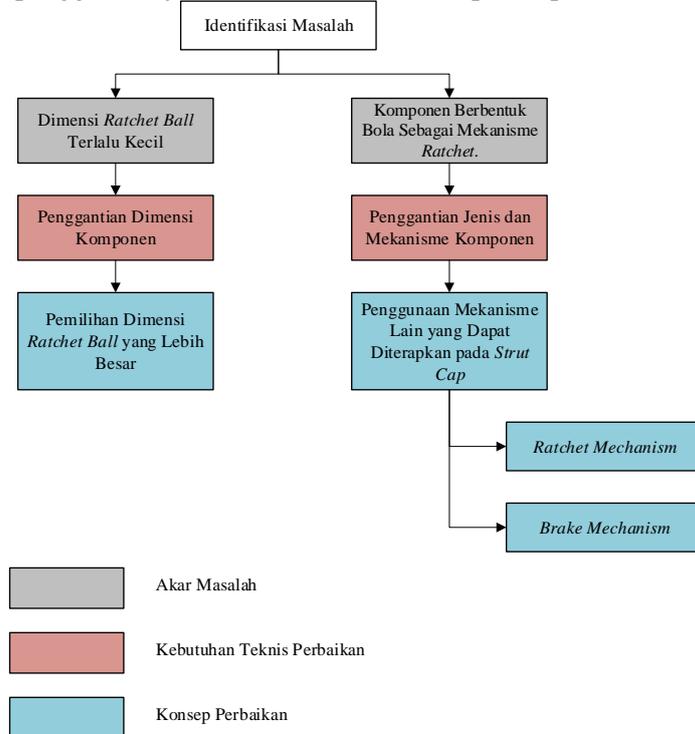
Gambar 4. Identifikasi Akar Masalah Mekanisme Ratchet Tidak Berfungsi



Gambar 5. Identifikasi Akar Masalah Pemilihan Jenis Mekanisme dan Komponen Tidak Tepat

A. Tahap Kreatif

Pada tahap kreatif dilakukan penentuan konsep perbaikan berdasarkan akar masalah dari penggunaan fiksator external dengan *spherical plain bearing* dan *standard strut*. Kebutuhan mengenai akar masalah dimensi *ratchet ball* terlalu kecil secara teknis dapat dinyatakan bahwa dibutuhkan penggantian dimensi *ratchet ball*, yang sebelumnya 2 mm menjadi 3 mm. Penggantian *ratchet ball* menjadi 3 mm diharapkan *ratchet ball* dapat berhenti berada pada titik yang sudah ditentukan saat proses pemutaran *strut cap* sehingga “klik” pada saat pemutaran juga dapat dirasakan oleh pengguna. Sedangkan untuk akar masalah komponen berbentuk bola sebagai mekanisme *ratchet* secara teknis dapat dinyatakan dibutuhkan penggantian jenis dan mekanisme komponen pada sistem pemutaran *strut cap*.



Gambar 6. Konsep Perbaikan Alat

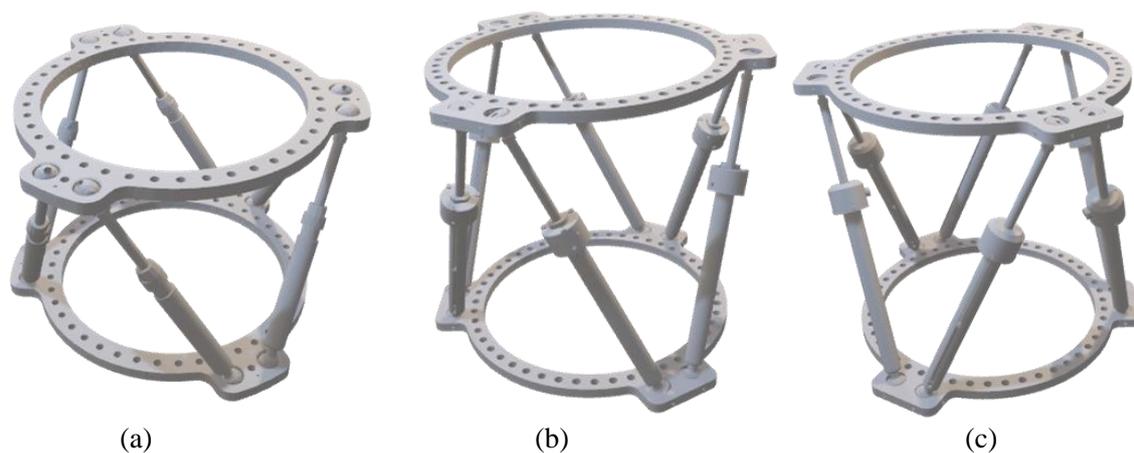
Dari konsep perbaikan alat maka tahap selanjutnya adalah pembangkitan alternatif rancangan. Alternatif rancangan didapat dari kombinasi kedua konsep perbaikan.

1. Alternatif 1

Inti dari mekanisme ini adalah komponen berupa *pin ratchet* yang berfungsi sebagai *pawl*, dan *coil spring* yang diintegrasikan dengan *rotary ring* sebagai penghubung antara fungsi ratchet dan *lower cap*. Fungsi gerigi diimplementasikan pada *strut tube* dengan membuat takik yang memiliki bentuk sesuai dengan *pin ratchet*. Karena sistem ratchet yang dibutuhkan hanya untuk berhenti pada satu titik saja maka takik juga dibuat pada satu titik, ini juga sebagai penanda ketika *pawl* berhenti maka *strut cap* telah mengalami satu putaran penuh. Bentuk dari *pin ratchet* juga di desain agar tidak memungkinkan terjadinya pergerakan ke arah yang berlawanan. Karena tidak memungkinkan adanya pergerakan berlawanan arah maka dibuat dua buah *rotary ring* yang berfungsi sebagai pengubah arah putaran. Ketika diperlukan untuk pemanjangan strut maka *rotary ring* atas dikunci agar terkait pada *lower cap* menggunakan *set screw* M2 x 3, dan *rotary ring* bawah dibiarkan bebas.

2. Alternatif 2

- Inti dari mekanisme ini adalah dua buah *canvas* sebagai penahan pergerakan rotasi dari *rotary ring*. Gaya tekan didapat dari *upper cap* yang terhubung melalui empat buah pegas. Gaya tekan ini mengakibatkan gesekan pada *rotary ring* sehingga *rotary ring* yang terhubung dengan *strut screw* akan sulit digerakkan. *Pin switch* adalah komponen yang difungsikan sebagai perubah arah putaran sekaligus menjadi poros pemutar yang menghubungkan *lower cap* dan *rotary ring* sehingga pergerakan menaikkan/ menurunkan *strut* dapat terjadi. Untuk fungsi pemanjangan *strut*, *pin switch* di atur dengan posisi sisi datar berada di kiri, dengan demikian *pin switch* akan menahan *rotary ring* sehingga ikut berputar sesuai pergerakan *lower cap*.



Gambar 7. Alternatif Rancangan: (a) Fiksator Eksternal dengan *Spherical Plain Bearing* dan *Standard Strut* (Initial Design), (b) Fiksator Eksternal Menggunakan *Modified Spherical Plain Bearing* dan *Ratchet Mechanism Struts* (Alternatif 1), (c) Fiksator Eksternal Menggunakan *Modified Spherical Plain Bearing* dan *Brake Mechanism Struts*

A. Tahap Evaluasi

Pembangkitan kriteria performansi dilakukan dengan menggunakan pendekatan Delphi. Teknik evaluasi Delphi mengumpulkan pendapat dari sekelompok pakar melalui serangkaian kuesioner. Di dalam rangkaian tersebut terdapat mekanisme *feedback* melalui iterasi pertanyaan yang diadakan hingga *feedback* yang dihasilkan mencapai hasil yang konsensus.

Tahap selanjutnya adalah pembobotan kriteria performansi menggunakan pendekatan AHP. Pembobotan kriteria performansi dilakukan guna mengetahui tingkat kepentingan antar kriteria. Langkah awal dilakukan dengan cara melakukan penyebaran kuesioner perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) mengenai tingkat kepentingan antar kriteria performansi. Responden ditentukan berdasarkan pemahamannya mengenai fiksator eksternal dan dapat ditemui di area Surakarta dan sekitarnya, sehingga ditentukan responden yaitu satu dokter Orthopedi dari RSUP dr. Soeradji Tirtonegoro Klaten, satu ahli dalam bidang fiksator eksternal dari Jurusan Teknik Industri UNS Surakarta, dan satu orang pasien yang pernah menggunakan fiksator eksternal berbasis *hexapod*. Hasil pembangkitan kriteria dan rekapitulasi pembobotan kriteria menggunakan AHP dapat dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria dan Bobot Kriteria Performansi

Kriteria	Subkriteria	Sub Subkriteria
1. Fleksibilitas (0.1986)	Tabel 2. Kriteria dan Bobot Kriteria Performansi	
Kriteria	Subkriteria	Sub Subkriteria
2. Kenyamanan Pasien (0.1194)	a. Massa Fiksator (0.6012) b. Estetika (0.0951) c. Ringkas (0.3037)	a. Tersedianya Ruang Untuk Anggota Tubuh Pasien (0.8305) b. Lebar Fiksator (0.1695)
3. Stabilitas (0.3010)	a. <i>Rigidity</i> (0.7231) b. Kemampuan menerima beban (0.1961) c. <i>Toleransi Joint</i> (0.0807)	
4. Kemudahan Operasional (0.2994)	a. Akurasi Pemutaran <i>Strut</i> (0.6151) b. Gerakan Pemutaran Kepala <i>Strut</i> Halus (0.2045) c. Kemudahan membedakan <i>strut</i> ketika dilakukan <i>x-ray</i> (0.1803)	
5. Kemudahan Pemasangan (0.0817)		

Tabel 3. Bobot Nilai Alternatif

Kriteria	Subkriteria	Sub Subkriteria	Initial Design	Alternatif 1	Alternatif 2
Fleksibilitas			0.076	0.691	0.234
Kenyamanan Pasien	Massa Fiksator Estetika Ringkas	Ketersediaan Ruang Gerak Lebar Fiksator	0.387	0.308	0.305
			0.171	0.545	0.284
			0.188	0.597	0.216
			0.420	0.290	0.290
Stabilitas	Rigidity Kemampuan Menerima Beban Toleransi Joint		0.119	0.177	0.703
			0.586	0.330	0.085
			0.333	0.333	0.333
Kemudahan Operasional	Akurasi Pemutaran <i>Strut</i> Kehalusan Pemutaran <i>Strut</i> Kemudahan membedakan <i>strut</i> saat <i>x-ray</i>		0.052	0.581	0.367
			0.053	0.528	0.419
			0.204	0.438	0.359
Kemudahan Pemasangan			0.177	0.558	0.265

Tahap selanjutnya adalah melakukan perhitungan bobot tiap alternatif berdasarkan kriteria performansi. Perhitungan dilakukan berdasarkan tipe kriteria, apakah kriteria tersebut bersifat subjektif atau objektif. Kriteria yang bersifat subjektif akan dinilai menggunakan hasil kuesioner *pairwise comparison* terhadap responden pada pembobotan kriteria, sedangkan kriteria yang bersifat objektif akan dinilai menggunakan normalisasi. Rekapitulasi hasil pembobotan nilai alternatif dapat dijelaskan pada Tabel 3. Setelah didapat bobot kriteria dan bobot nilai tiap alternatif maka selanjutnya adalah menentukan nilai performansi tiap alternatif desain. Nilai performansi didapatkan dari perhitungan bobot akhir dengan cara menjumlahkan hasil kali nilai eigen (bobot) tiap kriteria dengan score/nilai pembobotan alternatif desain.

$$\text{Performansi} = \Sigma \text{Bobot} \times \text{Nilai} \quad (1)$$

Value/nilai dari desain didapatkan dari rasio antara performansi tiap alternatif yang telah diperhitungkan sebelumnya terhadap biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan alternatif tersebut. Setelah diketahui nilai performansi dan biaya produksi dari tiap alternatif, tahap selanjutnya adalah menghitung *value* dari masing-masing alternatif.

$$\text{Value Alternatif} = \frac{\text{Performance}}{\text{Cost}} \quad (2)$$

Hasil perhitungan *value* tiap alternatif menunjukkan bahwa alternatif 1 merupakan alternatif dengan peringkat pertama dan unggul dalam empat dari lima kriteria, yaitu Fleksibilitas, Kenyamanan Pasien, Kemudahan Operasional dan Kemudahan Pemasangan. Oleh karena itu, rancangan “Fiksator Eksternal Berbasis *Hexapod* menggunakan *Modified Spherical Plain Bearing* dan *Ratchet Mechanism Strut*” terpilih sebagai rancangan yang akan dikembangkan pada tahap selanjutnya.

Tabel 4. Nilai Performansi Alternatif Desain

Desain Alternatif	Performansi	Biaya Produksi	Value	Rank
Initial Design	0.1600	Rp 14,982,000.00	1.06763E-08	3
Alternatif 1	0.4599	Rp 22,757,000.00	2.02079E-08	1
Alternatif 2	0.3802	Rp 19,454,000.00	1.95424E-08	2

A. Tahap Pengembangan

Pada tahap ini rancangan fiksator eksternal berbasis *hexapod* menggunakan *modified spherical plain bearing* dan *ratchet mechanism strut* disajikan secara lebih lengkap dan mendetail. Detail desain yang dihasilkan dibuat dengan memperhatikan pertimbangan-pertimbangan manufaktur yang diperlukan dalam memproduksi fiksator eksternal. Pertimbangan manufaktur didapatkan melalui diskusi bersama praktisi di bidang produksi manufaktur dari Bengkel SUCCESS Surakarta. Detail tiap komponen pada desain terpilih dijabarkan dengan gambar teknik dalam bentuk dua dimensi dan tiga dimensi dengan bantuan *software Autodesk Inventor Professional 2019*.

4. Kesimpulan dan Saran

Dihasilkan konsep perbaikan fiksator eksternal berbasis *hexapod* yang mampu mengatasi kendala teknis dan operasional dengan penyelesaian *Value Engineering*. Rancangan alternatif fiksator eksternal berbasis *hexapod* menggunakan *modified spherical plain bearing* dan *ratchet mechanism strut* terpilih berdasarkan *value* terbaik dari alternatif yang ada. *Value* alternatif dihitung berdasarkan rasio antara performansi dan rancangan biaya yang muncul pada tiap alternatif. Rancangan alternatif fiksator eksternal berbasis *hexapod* menggunakan *modified spherical plain bearing* dan *ratchet mechanism strut* unggul dalam empat dari lima kriteria performansi utama, diantaranya fleksibilitas, kenyamanan pasien, kemudahan operasional, dan kemudahan pemasangan. Maka dari itu untuk penelitian selanjutnya perlu perhatian lebih mengenai stabilitas frame. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah mengenai konsistensi bengkel tempat produksi agar komponen-komponen yang dihasilkan tetap seragam.

Referensi

- [1] Apriani, D. H. (2016). *Pengembangan Rancangan Stewart Platform Sebagai Perangkat Orthopedi Rekonstruksi Tulang*. Skripsi S-1 Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
- [2] Badan Pusat Statistik, Keadaan Angkatan Kerja di Indonesia. (2016). <https://www.bps.go.id/publication/2016/11/30/d12d7d2096f263801ae18634/keadaan-angkatan-kerja-di-indonesia-agustus-2016.html>. (Diakses 16 Desember 2018).
- [3] DeMarle, D. (1995). *Value Engineering*. Industrial Engineering Handbook.
- [4] Heller, E. D. (1971). *Value Management: Value Engineering and Cost Reduction*. Addison, Wesley: MA.
- [5] Koren, L., Keren, Y., dan Eidelman, M. (2016). Multiplanar deformities correction using Taylor Spatial Frame in skeletally immature patients. *The Open Orthopaedics Journal*, 10, 71-79.
- [6] Orthofix. (2017). *TL-HEX TrueLok Hexapod System*. Diakses November 2018, dari <http://web.orthofix.com/Products/Pages/TL-HEX.aspx?catid=21>
- [7] Paley, D. (2002). *Principles of Deformity Correction*. New York: Springer.
- [8] Taylor, J. C. (2002). *Correction of General Deformity with The Taylor Spatial Frame Fixator*. Diakses Juni 2016, dari <http://www.jcharlestaylor.com/>
- [9] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, *Convention on the Rights of Persons with Disabilities* (2006).

<https://www.un.org/development/desa/disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities-2.html>. (Diakses 18 Oktober 2018).

- [10] Zimmerman, L. W., dan Hart, G. D. (1982). *Value Engineering a Practical Approach for Owners*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.