

Perbaikan Sistem Joint antara Strut dan Ring pada Eksternal Fiksasi Berbasis Hexapod untuk Meningkatkan Fleksibilitas Rekonstruksi Tulang

Yustine Intan Dwi Wijaya*, Susy Susmartini dan Lobes Herdiman

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36^a Jebres, Surakarta, 57126, Indonesia

DOI: 10.20961/performa.18.1.25134

Abstrak

Fiksasi eksternal merupakan alat bantu medis berbasis hexapod untuk mendukung proses rekonstruksi tulang akibat kelainan bentuk tulang. Di pasar tersedia beberapa fiksasi eksternal berbasis hexapod dengan beragam desain. Produk fiksasi eksternal yang dikenal di lingkungan dokter yaitu Taylor Spatial Frame (TSF) terdiri dari dua ring dan enam strut teleskopik dengan sistem sambungan menggunakan universal joint. Alat bantu TSF telah berhasil dibuat oleh laboratorium Perencanaan dan Perancangan Produk Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta. Desain TSF ini untuk mengkoreksi tulang dengan sudut ekstrim, tetapi jangkauan sudut antara strut-ring belum dapat dicapai sesuai target spesifikasi. Kelemahan lain pada desain TSF ini, adanya backlash di komponen universal joint. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki sistem joint antara strut dan ring, untuk menghilangkan potensi backlash, agar aman bagi pengguna dan jangkauan sudut strut-ring dapat dicapai sebesar sudut 30°. Perbaikan desain dilakukan dengan generic product development process untuk pemilihan konsep alternative perbaikan yang menekankan aman bagi pengguna, kemudian diuji menggunakan finite element untuk menilai safety factor dan displacement. Hasilnya berupa konsep desain terpilih dengan jangkauan sudut pada fiksasi eksternal antara strut-ring mendekati sudut sebesar 30°.

Kata kunci: fiksasi eksternal, hexapod, taylor spatial frame, universal joint, jangkauan sudut

Abstract

An external fixation is a hexapod-based medical aid to support the process of bone reconstruction due to bone deformity. On the market, there are several hexapods based external fixation with various designs. The well-known external fixation product in the doctor's environment is the Taylor Spatial Frame (TSF) consisting of two rings and six telescopic struts with a joint system using a universal joint. TSF tools have been successfully created by the Industrial Engineering Planning and Design laboratory of the Faculty of Engineering, Universitas Sebelas Maret, Surakarta. The design of this TSF is to correct bones with extreme angles, but the angle range between the struts cannot be reached according to the target specifications. Another weakness in this TSF design is the backlash in the universal joint component. This study aims to improve the joint system between strut and ring, to eliminate the potential of backlash, to be safe for the user and the strut-ring angle range can be reached at an angle of 30°. Design improvements are carried out with the generic product development process to select alternative repair concepts that emphasize safe for users, then test using finite elements to assess safety factors and displacements. The result is a chosen design concept with an angle range at the external fixation between the strut rings approaching an angle of 30°.

Keywords: external fixation, hexapod, taylor spatial frame, universal joint, range of motion

1. Pendahuluan

Tulang merupakan bagian dari anggota tubuh yang penting bagi manusia, kerusakan pada tulang akan berpengaruh pada keadaan tubuh manusia. Fraktur adalah terpisahnya kontinuitas tulang akibat tekanan yang berlebihan (Shapiro, 2008). Kejadian fraktur di Indonesia relatif tinggi yang penyebabnya adalah kecelakaan lalu lintas. Data rata-rata kecelakaan lalu lintas di Indonesia pada tahun 2012-2016 sebanyak 103.812 kasus dan 26,48% mengalami luka berat dan kejadian ini lebih banyak pada penduduk di usia produktif (BPS, 2013). Menurut Chandra (2011) bahwa penderita luka berat sebesar 46,2% mengalami fraktur ekstremitas bawah atau deformitas tulang bawah kompleks. Hasil survei sosial dan ekonomi nasional tahun 2012 oleh Badan Pusat Statistik (2017) bahwa penduduk di Indonesia pada usia produktif (15 – 64 tahun) sebanyak 128 juta atau 69%. Jika data ini di proyeksikan terhadap jumlah penduduk Indonesia, maka penduduk yang mengalami fraktur ekstremitas bawah diperkirakan 44 juta orang.

*Korespondensi : yustineintan10@gmail.com

Deformitas tulang bawah kompleks dapat ditangani dengan cara tindakan operasi koreksi. Langkah operasi rekonstruksi tulang dilakukan dengan cara penarikan jaringan tulang dalam kondisi terkontrol menggunakan eksternal fiksasi untuk diperoleh rencana ketinggian dan kesejajaran tulang (Rozbruch, 2006; Solomin, 2012). Pasien fraktur ekstrimitas bawah mem-butuhkan masa rehabilitasi cukup lama sekitar 3 sampai 6 bulan pasca operasi (Muttaqin dan Sari, 2009). Lamanya waktu rehabilitasi membuat pasien tidak dapat beraktivitas secara normal sehingga menurunnya produktivitas. Profesi kedokteran ortopedi berupaya mengurangi lamanya rehabilitasi, yaitu memasang ring Illizarov (Bare dan Smeltzer, 2002). Desain alat ini memiliki kelemahan yaitu kurang fleksibel untuk rekonstruksi tulang yang kompleks atau koreksi 3 dimensi. Pengguna Illizarov dapat berjalan dengan beban penuh tubuh (*full weight bearing*) dalam fase 2 minggu pasca pemasangan alat (Konieczny, Morasiewicz, dan Kuciel, 2017).

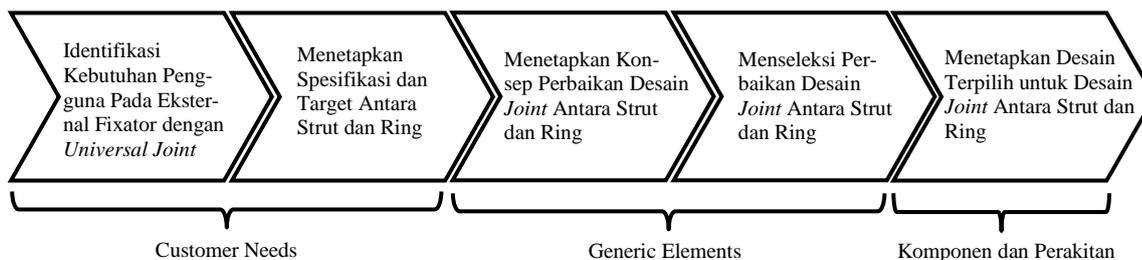
Pada tahun 2018 rancangan Taylor Spatial Frame (TSF) dengan sistem *hexapod Stewart Platform* telah berhasil dibuat oleh Lab. Perencanaan dan Perancangan Produk Teknik Industri Universitas Sebelas Maret untuk mengkoreksi tulang pasien dengan penyakit *blount*. Akan tetapi, observasi dari pemakaian untuk proses koreksi menunjukkan *frame* mengalami *backlash* (kekocakan). TSF dengan Paten No. 6030386A produk dari Smith & Nephew menunjukkan pemberian *clearance* antara ujung *shoulder bolt* dan ujung *universal joint* pada setiap komponen *universal joint*. *Clearance* ini diperlukan agar *frame* mampu bergerak dalam tiga sumbu, akan tetapi *universal joint* merupakan sistem *joint* dua sumbu (Taghirad, 2013). Pemberian *clearance* memungkinkan pemasangan *strut* 1 sd. 3 pada kondisi ketat (kencang) akan tetapi masih dapat diputar. Namun, *clearance* yang tidak terkontrol akan menimbulkan *backlash* dan membuat pemutaran *strut* menjadi kurang akurat. Kejadian ini akan menimbulkan pergeseran tulang yang tidak direncanakan, meskipun proses rekonstruksi tulang pasien berhasil dikoreksi tetapi kurang akurat (Apriani, 2017). Tahun 2018 perbaikan pada sistem *joint* dengan mengganti *universal joint* dengan *ball joint* (*spherical plain bearing*) pada ring fiksasi (SKF, 2011). Pengembangan alat rekonstruksi tulang dengan memperhatikan pada sistem *joint* produk TL-HEX TrueLok Hexapod System melalui beberapa studi literatur (Pesenti, Iobst, dan Launay, 2017).

Perbaikan dilakukan pada prototipe TSF generasi ke satu menggunakan mekanisme *universal joint* menjadi prototipe TSF generasi ke dua menggunakan mekanisme *spherical plain bearing* (Apriani, 2017). Hasilnya ini menunjukkan gerakan *strut* dapat bergerak lebih halus (*smooth*). Kelebihan penggantian sistem *joint* menggunakan *joint* standar menjadikan komponen lebih sedikit dan kebutuhan *clearance* dapat direduksi. Penggunaan *spherical plain bearing* ini masih timbulnya masalah, terutama pada saat pembentukan sudut antara *strut* dan ring ketika proses rekonstruksi tulang. Hasil jangkauan sudut antara *strut* dan ring terbentuk sebesar $42,98^\circ$, jangkauan sudut yang dianjurkan sebesar 30° . *Strut* semakin mendekati ring maka semakin flek-sibel pada desain eksternal fiksasi tersebut. Terbatasnya sudut yang dibentuk oleh *strut* dan ring membuat *strut* mudah terantuk, sehingga perlu dilakukan pergantian *strut* dengan mengganti *strut* lebih panjang agar proses koreksi tulang dapat dilakukan sesuai arahan dokter.

Berdasarkan masalah ini maka penggantian sistem *joint* pada mekanisme *spherical plain bearing* dengan perbaikan antara *strut* dan ring yang bertujuan untuk meningkatkan kemampuan komponen *bearing* sebagai komponen standar pada prototipe TSF generasi ke dua.

2. Metode Penelitian

Penyelesaian dalam menjawab ini diadaptasi dari *generic product development process* (Ulrich dan Eppinger, 2016) untuk pengembangan produk, yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahap Pemilihan Konsep Rancangan Sistem *Joint* antara *Strut* dan Ring

2.1 Identifikasi Kebutuhan Desain

Identifikasi kebutuhan pengguna untuk mengetahui mekanisme apa yang diperlukan untuk memperbaiki desain eksternal fiksasi sebelumnya. Hasil identifikasi kebutuhan diharapkan dapat menjadi kebutuhan teknis pada saat merancang perbaikan sistem *joint* dari eksternal fiksasi berbasis hexapod. Beberapa tahapan dalam melakukan identifikasi kebutuhan, yaitu tahap melakukan observasi dan wawancara. Setelah kebutuhan pengguna diperoleh, kemudian hasilnya dianalisis menggunakan diagram tulang ikan (*fishbone diagram*).

2.2 Menetapkan Spesifikasi dan Target

Tahap spesifikasi dan target dilakukan dekomposisi kebutuhan pengguna menjadi ke-butuhan teknis dalam menentukan spesifikasi produk yang diperlukan pengguna sesuai target perbaikan rancangan.

2.3 Menetapkan Konsep Perbaikan Desain

Konsep perbaikan desain eksternal fiksasi pada mekanisme *spherical plain bearing* sesuai spesifikasi dan target yang sudah ditetapkan dari tahap sebelumnya. Tahap ini adalah untuk menggali konsep dan membangkitkan alternatif konsep desain yang sesuai kebutuhan, agar memenuhi spesifikasi target dengan mengubahnya menjadi kebutuhan teknis. Pembang-kitan alternatif konsep desain dilakukan dengan menggunakan *morphological chart*.

2.4 Menseleksi Perbaikan Desain

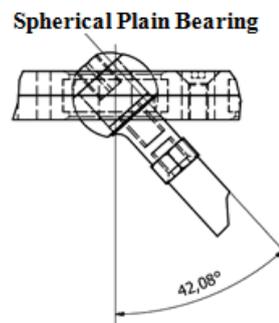
Hasil analisis *morphological chart* dilanjutkan dengan pemilihan konsep produk melalui beberapa tahap yaitu penyaringan konsep desain berdasarkan *reliable*, evaluasi konsep desain menggunakan *software autodesk inventor 2016*, penilaian konsep desain dengan menggunakan matrik *Pugh*, dan meranking konsep desain.

2.5 Menetapkan Desain Terpilih

Setelah seleksi desain bergerak ke tahap desain akhir. Di sinilah desain di analisis dengan membandingkan fleksibilitas dalam rekonstruksi tulang agar diperoleh desain terpilih.

3. Hasil dan Pembahasan

Prototipe TSF generasi ke dua yaitu eksternal fiksasi berbasis hexapod menggunakan mekanisme *spherical plain bearing*. Deskripsi ini didapat melalui observasi dan wawancara mengenai penggunaan prototipe generasi ke dua. Hasil wawancara menunjukkan masalah di sistem *joint* antara strut dan ring. Sistem ini memiliki sudut jangkauan yang belum mendekati sudut 30° , seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Capaian Sudut antara Strut dan Garis Tegak Lurus terhadap Ring

Jangkauan sudut strut dapat dirasakan ketika strut terpasang tegak lurus pada ring hingga strut bergerak mendekati ring. Sudut antara strut dan ring terbentuk antara strut dan garis yang paralel terhadap ring yang bersambungan dengan strut tersebut (Henderson dkk., 2008). Menurut Henderson menyatakan jangkauan sudut antara strut dan ring yang direkomendasikan tidak kurang dari 30° untuk menghindari deformasi fiksasi, sehingga jangkauan sudut antara strut dan ring terkecil dengan sudut minimal 30° dan maksimal yang terbentuk 60° .

Identifikasi kebutuhan desain untuk mendapatkan penjabaran dari hasil evaluasi pengguna yang telah diketahui permasalahannya. Selanjutnya dilakukan dekomposisi menjadi ke-butuhan teknis rancangan untuk mengetahui spesifikasi sesuai target perbaikan rancangan.

Tabel 1. Kebutuhan Teknis Perbaikan Eksternal Fiksasi

Evaluasi Pengguna	Root Cause	Kebutuhan Teknis Pengguna
Terbatasnya jangkauan sudut pada sistem sambungan <i>strut</i> dan <i>ring</i> . Hal tersebut berdampak pada strut yang menjadi mudah terantuk (<i>mentok</i>) sehingga perlu melakukan	<i>Strut</i> hanya dapat berotasi sebesar luas lubang <i>ring</i>	Modifikasi pada bagian <i>ring</i> : <i>single ring</i> & membesarkan diameter <i>ring</i> menjadi 180 mm
	<i>Shoulder bolt</i> terantuk <i>outer bearing</i>	Menempatkan bearing sejajar dengan bagian bawah <i>ring</i>
		Melakukan penipisan (pengurangan ketebalan) pada bagian kepala dari <i>shoulder bolt</i> (<i>fit in</i>)

pergantian strut yang lebih panjang.	Strut lock screw terantuk bearing	Memodifikasi pada bagian bearing: mengganti bearing dengan yang lebih besar (10 GE) & inner cut. Melakukan penipisan (pengurangan ketebalan) pada bagian strut lock screw
--------------------------------------	-----------------------------------	---

Pada tahap konsep desain produk dengan tujuan membangkitkan alternatif-alternatif desain dalam merancang perbaikan sesuai spesifikasi target. Diagram *morphological* menunjukkan hasil konsep desain berdasarkan pembagian dari solusi dan sub fungsi, yang dapat dijelaskan pada Tabel 2. Konsep desain diperoleh sebanyak 12 desain yang dibagi menurut warna dan jenis garis. Warna biru dengan garis penuh untuk konsep desain I. Warna orange dengan garis penuh untuk konsep desain II. Warna hijau dengan garis penuh untuk konsep desain III. Warna merah terang dengan garis penuh untuk konsep desain IV. Warna hitam dengan garis penuh untuk konsep desain V. Warna merah maroon dengan garis penuh untuk konsep desain VI. Warna biru dengan garis putus-putus untuk konsep desain VII. Warna orange dengan garis putus-putus untuk konsep desain VIII. Warna hijau dengan garis putus-putus untuk konsep desain IX. Warna merah terang dengan garis putus-putus untuk konsep desain X. Warna hitam dengan garis putus-putus untuk konsep desain XI, dan warna merah maroon dengan garis putus-putus untuk konsep desain XII. Pemilihan konsep untuk menentukan desain terbaik dan sesuai kebutuhan. Di tahap ini dilakukan evaluasi pada alternatif-alternatif untuk mendapatkan alternatif terbaik. Evaluasi dilakukan dengan cara menilai alternatif menurut dari hasil jangkauan sudut antara strut dan ring menggunakan *software Inventor 2016*.

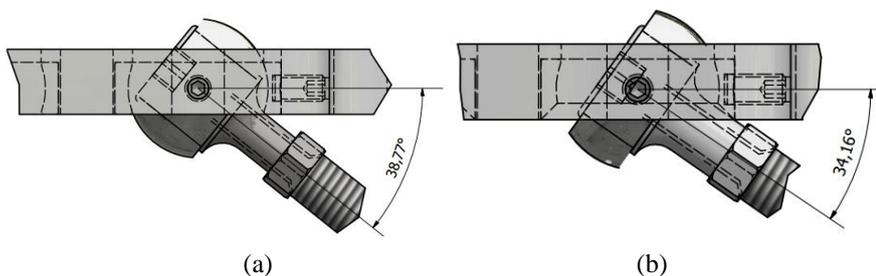
Tabel 2. *Morphological Chart* untuk Sistem Joint antara Strut dan Ring pada Eksternal Fiksasi

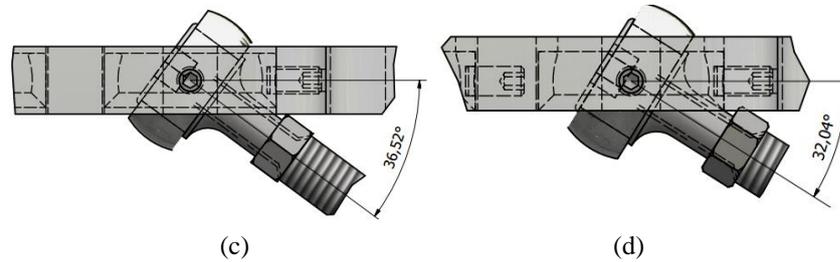
Fungsi	Menggerakkan Sistem Sambungan Ring-Strut	Mengubah Sudut Joint		Menahan Ball Joint (Bearing) Agar Stabil
		Ball Joint	Position of Ball Joint	Ring
Alternatif 16				
1	Standard strut lock screw	Standard Spherical Plain Bearing	Mounted in the middle of the ring	Single Ring
2	Modified strut lock screw	Modified Spherical Plain Bearing	Mounted parallel in the bottom or top of the ring	Double Ring

Hasil penyaringan konsep dari keduabelas desain dikerucutkan menjadi empat alternatif yaitu konsep desain VI, konsep desain IX, konsep X, dan konsep desain XII. Selanjutnya penilaian untuk jangkauan sudut didapatkan dengan melakukan percobaan untuk menghasilkan sudut antara ring dan strut. Jangkauan sudut strut dievaluasi ketika strut terpasang tegak lurus pada ring hingga strut bergerak mendekati ring, dapat dijelaskan pada Tabel 3 dan Gambar 3.

Tabel 3. Jangkauan Sudut antara Strut dan Ring antar Alternatif Konsep Desain pada Eksternal Fiksasi

Alternatif Konsep Desain	Jangkauan Ring-Strut Screw (°)
Konsep Desain VI	34,16
Konsep Desain IX	38,77
Konsep Desain X	36,52
Konsep Desain XII	32,04





Gambar 3. a. Konsep Desain VI, b. Konsep Desain IX, c. Konsep Desain X, d. Konsep Desain XII

Stabilitas diketahui dari *displacement* desain ketika diberi beban (*load*). *Displacement* merupakan perubahan bentuk pada suatu benda yang diberi beban (Timoshenko, 1990). *Displacement* dihasilkan dari evaluasi analisis *finite element* menggunakan *software Autodesk Inventor 2016*. Adapun *displacement* dari tiap alternatif desain, dapat dijelaskan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai *Displacement* antar Alternatif Konsep Desain Eksternal Fiksasi

Alternatif Konsep Desain	<i>Displacement (mm)</i>
Konsep Desain VI	0,09081
Konsep Desain IX	0,10470
Konsep Desain X	0,10590
Konsep Desain XII	0.08097

Tan dkk. (2014) menyatakan bahwa rata-rata orang dewasa pengguna eksternal fiksasi memiliki berat 70 kg, sehingga beban yang diterima fiksasi dari berat badan diperkirakan sebesar 700 N. Selain itu, fiksasi juga menerima IV - 33 beban dari *k-wire* yang dipasang pada ring, di mana *k-wire* dikencangkan dengan tegangan sebesar 900 sd.1100 N (Solomin, 2012). Desain fiksasi dapat dibuat minimal dengan syarat harus mampu menahan beban normal yang diberikan pada fiksasi dalam mendukung koreksi tulang secara baik.

Kemampuan fiksasi dalam menerima beban diketahui dari *safety factor*, analisis *finite element* dilakukan pada setiap desain menggunakan *software Autodesk Inventor 2016*. *Safety factor* (SF) merupakan perbandingan antara gaya yang diperlukan agar terjadi pecah (beban *ultimate*) dengan tegangan ijin suatu batang (Juvinall, 2012). Adapun *safety factor* dari tiap alternatif desain, dapat dijelaskan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai *Safety Factor* antar Alternatif Konsep Desain Eksternal Fiksasi

Alternatif Konsep Desain	<i>Safety Factor (ul)</i>
Konsep Desain VI	1,53
Konsep Desain IX	1,93
Konsep Desain X	2,88
Konsep Desain XII	2,16

Penilaian konsep dilakukan dengan metode *Pugh*, menurut Garvin tahun 1998 di mana kriteria seleksi berdasarkan dimensi kualitas. Garvin (1998) menyatakan ada delapan dimensi untuk kualitas produk yaitu *performance*, *features*, *reliability*, *conformance*, *durability*, *service-ability*, *aesthetics*, dan *preceived quality*. Namun, menentukan kriteria seleksi hanya menggunakan empat dimensi. Dimensi yang digunakan harus direfleksikan sesuai kebutuhan dalam desain perbaikan sistem *joint* antara strut dan ring pada eksternal fiksasi. Ke empat dimensi meliputi *performance*, *features*, *durability*, dan *serviceability*, dapat dijelaskan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan antara Initial Desain dan Alternatif Konsep Desain Eksternal Fiksasi

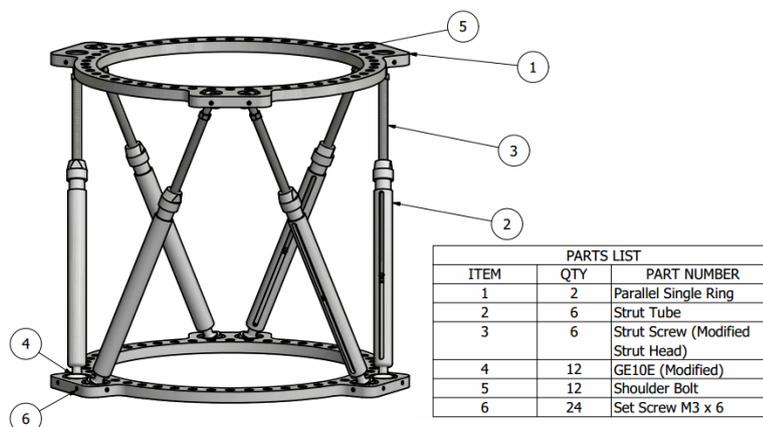
Alternatif Konsep Desain Eksternal Fiksasi	Initial Desain	Konsep Desain VI	Konsep Desain IX	Konsep Desain X	Konsep Desain XII
<i>Range of Motion</i>	47,92°	34,16°	38,77°	36,52°	32,04°
<i>Displacement</i>	0,1156	0,09081	0,1047	0,1059	0,08097
<i>Safety Factor</i>	4,21	1,53	1,93	2,88	2,16

Penilaian konsep dengan metode *Pugh*, konsep dinilai menggunakan matrik penyaringan lalu dilanjutkan penilaian tahap ke dua. Pada tahap ke dua akan diranking untuk memilih satu konsep terbaik. Menurut Haris dkk. (2016) menyatakan penilaian konsep di tahap pertama semua konsep dibandingkan dengan konsep referensi. Penyaringan konsep untuk mempermudah pemilihan konsep yang akan dikembangkan dan mempersempit alternatif desain. Nilai dalam perhitungan nilai adalah “sama” (0), “lebih buruk” (-), “lebih baik” (+) diletakkan pada tiap sel matrik yang menunjukkan perbandingan konsep. Penilaian dengan cara meranking konsep dari ke empat alternatif desain. Selanjutnya ke empat alternatif desain dinilai dengan perhitungan yang sama. Hasil keputusannya yaitu lebih baik, atau lebih buruk dibandingkan dengan initial desain. Di akhir penilaian, skor tertinggi menjadi konsep desain yang terpilih.

Tabel 7. Penilaian Konsep Desain Eksternal Fiksasi

Kriteria Seleksi	Alternatif Konsep Desain			
	Konsep VI	Konsep IX	Konsep X	Konsep XII
1. Performance				
a. Jangkauan Sudut <i>Ring-Strut Screw</i>	+	+	+	+
b. Jangkauan Sudut <i>Ring-Strut Tube</i>	+	+	+	+
2. Features				
a. Stabilitas Fiksator Eksternal	+	+	+	+
b. Kemampuan Menerima Beban	-	-	-	-
c. Massa Fiksator Eksternal	0	0	0	0
d. Lebar Fiksator Eksternal	0	0	0	0
e. Tinggi Fiksator Eksternal	0	0	0	0
3. Durability				
a. Material lebih kuat	0	+	+	+
4. Serviceability				
a. Biaya <i>Service</i>	0	+	+	+
Jumlah (+)	3	5	5	5
Jumlah (0)	5	3	3	3
Jumlah (-)	1	1	1	1
Nilai Akhir	2	4	4	4
Ranking	2	1	1	1

Ranking hasil penyaringan konsep diperoleh nilai akhir perhitungan dari jumlah nilai (+) dikurangi dengan jumlah nilai (-) pada setiap kolom desain. Peringkat pertama diperoleh desain IX, X, dan XII dengan nilai akhir 4 dan peringkat ke dua yaitu desain VI dengan skor 2. Hasil dari 3 konsep menjadi peringkat pertama namun tetap harus ditentukan konsep yang terbaik. Ke tiga konsep yang terpilih menjadi peringkat pertama, konsep XII unggul di dalam 2 bagian dari konsep IX dan konsep X, yaitu nilai jangkauan sudut antara ring dan strut dan *displacement*. Konsep XII dipilih sebagai terbaik dari kedua konsep dari peringkat yang sama.



Gambar 4. Desain Konsep XII Sebagai Eksternal Fiksasi Berbasis Hexapod Terpilih

4. Simpulan

Hasil perbaikan pada sistem *joint* dari membangkitkan alternatif konsep desain eksternal fiksasi berbasis hexapod dengan memakai komponen *joint* standar manufaktur. Penggunaan sistem *joint* standar untuk *spherical plain bearing* dapat ditingkatkan kemampuannya dengan cara memodifikasi. Desain eksternal fiksasi dari hasil rancangan dengan jangkauan sudut antara strut dan ring mendekati sudut sebesar 30° sehingga memungkinkan fleksibilitas dalam rekons-truksi tulang. Eksternal fiksasi berbasis hexapod dihasilkan dengan cara *modified spherical plain bearing* dan tetap memperhatikan proses manufaktur dalam memproduksi ring fiksasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan pada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Indonesia atas dukungan finansial melalui PTUPT Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi 2018.

Daftar Pustaka

- Apriani, D.H. (2017) *Pengembangan Rancangan Stewart Platform Sebagai Perangkat Orthopedi Rekonstruksi Tulang*, Unpublished Undergraduate Skripsi), Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia.
- Badan Pusat Statistik (2013), *Indonesia - Survei Sosial Ekonomi Nasional 2012 (Gabungan)*, Jakarta, Indonesia: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik (2017), *Perkawinan Usia Anak di Indonesia 2013 dan 2015 (Edisi Revisi)*, Jakarta, Indonesia: Badan Pusat Statistik.
- Bare dan Smeltzer (2002), *Buku Ajar Keperawatan Medikal Bedah Brunner dan Suddart*, (Alih bahasa Agung Waluyo), edisi 8, Vol. 3, Jakarta: EGC.
- Chandra, B. (2011), *Pengantar Kesehatan Lingkungan*, Jakarta: EGC, pp. 40.
- Garvin, D.A., (1998) *Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge*, New York: The Free Press Publisher.
- Haris, A, Motato, E., Mohammadpour, M., Theodossiades, S., Rahnejat, H., Kelly, P., O'Mahony, M. dan Struve, B. (2016), Concept Selection For Clutch Nonlinear Absorber Using PUGH Matrix, *3rd Biennial International Conference on Powertrain Modelling and Control, Testing, Mapping and Calibration 7th-9th September 2016*, UK: Loughborough University.
- Henderson, E. R., Feldman, D. S., Lusk, C., van Bosse, H. J., Sala, D., Kummer, F. J. (2008) Conformational Instability of the Taylor Spatial Frame A Case Report and Biomechanical Study, *J. Pediatric Orthopaedics*, Vol. 28, pp. 471-477.
- Juvinall; R.C. and Marshek, K.M. (2017) *Fundamentals of Machine Component Design*, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Konieczny, G., Morasiewicz, P. dan Kuciel, N. (2017), The Effects of an Early Intrahospital Rehabilitation on Weight Bearing During Lower Extremity Lengthening With Ilizarov Method, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 19(2), pp. 59-64.
- Muttaqin, A. dan Sari, K., (2009), *Asuhan Keperawatan Perioperatif Konsep Proses dan Aplikasi*. Jakarta: Salemba Medika.
- Pesenti, S., Iobst, C.A. dan Launay, F. (2017), Evaluation of The External Fixator Truelok Hexapod System for Tibial Deformity Correction in Children, *Orthop Traumatol Surg Res. Journal*, Vol. 103(5), pp.761-764.
- Rozbruch, S.R., Ilizarov, S. (2007), *Limb Lengthening and Reconstruction Surgery*, New York: Informa Healthcare USA, Inc.
- Shapiro, F. (2008), Bone Development and Its Relation to Fracture Repair. The Role of Mesenchymal Osteoblasts and Surface Osteoblasts, *European Cells and Materials Journal*, Vol. 15, pp 53-76.
- SKF (2011). *Catalogue: Spherical Plain Bearings and Rod Ends*. Swedia: SKF Group.
- Solomin, L.N. (2012), *The Basic Principles of External Skeletal Fixation Using the Ilizarov and Other Devices*, 2nd edition, Italia: Springer.
- Taghirad, H.D. (20017) *Parallel Robots : Mechanics and Control*, CRC Press Publisher, Boca Ratan.
- Tan, B.B., Shanmugam, R., Gunalan, R., Chua, Y.P., Hossain, G., Saw, A.D. (2014). A Biomechanical Comparison between Taylor's Spatial Frame and Ilizarov External Fixator. *Malaysian Orthopedic Journal*, Vol. 2, pp. 35-39.
- Taylor, H.S., Taylor, C.J. (2000). *United States of America No. US 6030386A*. Retrieved from <http://www.freepatentsonline.com/6030386.html>.
- Timoshenko, S.P. (2004) *Strength of Materials. P.1 : Elementary Theory and Problems*, Publisher CBS Publishers & Distributors, New Delhi.
- Ulrich, K.T., Eppinger, S.D. (2016), *Product Design and Development*, 6th edition, McGraw-Hill Publisher, New York.