

Fenomena Korosi Antarmuka Sekrup pada *Dynamic Compression Plate* dan *Locking Compression Plate* untuk Restrukturisasi Tulang

Yudo Kaneshiro¹, Pritadewi Basoeki^{1*}, Monica Adisuhanto¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
BSD City, Jalan Raya Cisauk, Desa Sampora, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang, Banten, 15435
Email: pdbasoeki@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Sekrup yang dipasangkan pada pelat implan, baik *Dynamic Compression Plate* (DCP) dan *Locking Compression Plate* (LCP) berfungsi untuk menyambungkan bagian tulang yang patah dalam tubuh manusia. Implan terbuat dari material *Stainless Steel* 316L yang ditanamkan pada tubuh manusia dalam jangka waktu yang cukup panjang, yang berpotensi akan terkorosi baik pada sekrup maupun pelat. Pengujian korosi dilakukan dengan metode polarisasi menggunakan media korosif berupa larutan NaCl 0,9%. Metalografi dilakukan untuk mengetahui fenomena korosi yang terjadi pada permukaan spesimen dan uji keras mikro *Vickers* dilakukan dalam penelitian ini untuk menguji kekerasan spesimen sebelum dan sesudah terkorosi. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa sekrup LCP yang dipasangkan pada pelat LCP mempunyai nilai laju korosi dan luas daerah yang lebih kecil dibandingkan dengan sekrup DCP yang dipasangkan pelat DCP. Hasil pengujian kekerasan pada pelat DCP sebelum dan sesudah terkorosi mempunyai nilai kekerasan yang berbeda cukup signifikan sedangkan pelat LCP nilai kekerasan sebelum dan sesudah terkorosi relatif sama. Pada sekrup DCP yang dipasangkan pelat DCP terjadi *Pitting Corrosion*, *Crevice Corrosion*, dan SCC (*Stress Corrosion Cracking*) yang menimbulkan retak mikro, sedangkan sekrup LCP yang dipasangkan pelat LCP terjadi *Pitting Corrosion*, dan *Crevice Corrosion* namun tidak menimbulkan retak mikro.

Kata kunci: sekrup DCP/LCP, pelat DCP/LCP, *Stainless Steel* 316L, laju korosi, fenomena korosi.

ABSTRACT

The screws that are joined to the implant plate, both the Dynamic Compression Plate and the Locking Compression Plate, are used to join the broken parts of the bone in the human body. Implants are made of 316L Stainless Steel, which is implanted in the human body for an extended period, which can be corroded both on the screw and plate. Corrosion testing was carried out by the polarization method using a corrosive medium of 0.9% NaCl solution. Metallography was conducted to determine the corrosion phenomenon that occurred on the specimen surface. The Vickers microhardness test was carried out to test the hardness of the specimen before and after corrosion. The study results showed that the LCP screws joined to the LCP plate had a lower corrosion rate and area than the DCP screws joined to the DCP plate. The hardness on the DCP plate before and after being corroded had a significantly different value, while the LCP plate's hardness values were relatively the same. The corrosion that occurs in DCP screws joined to DCP plates are pitting corrosion, crevice corrosion, and SCC (Stress Corrosion Cracking), which causes micro cracking. The corrosion on LCP screws joined to LCP plates is pitting corrosion and crevice corrosion and does not cause micro-cracks.

Keywords: DCP/LCP screws, DCP/LCP plates, 316L stainless steel, corrosion rate, corrosion phenomenon.

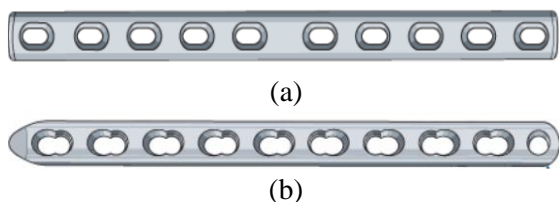
1. PENDAHULUAN

Dalam bidang kedokteran, khususnya bidang ortopedi, patah tulang menjadi kasus

utama yang membutuhkan penanganan khusus. Implan merupakan komponen yang dapat menggantikan struktur dan fungsi dari bagian

tubuh yang mengalami patah tulang. Salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh material implan yaitu mempunyai sifat biokompatibilitas yang tinggi, di samping ketahanan korosinya yang tinggi pula. Adapun yang dimaksud dengan biokompatibilitas yaitu kemampuan material untuk dapat bekerja dengan baik (selaras) dalam tubuh manusia tanpa menimbulkan efek lain yang berbahaya. *Stainless Steel* AISI 316L merupakan salah satu bahan dasar yang digunakan sebagai material implan untuk dapat menggantikan struktur dan fungsi dari bagian tubuh yang mengalami patah tulang. *Stainless Steel* AISI 316L digunakan dalam bidang ortopedi di samping karena biokompatibilitasnya namun juga karena kuat, mempunyai tingkat ketahanan korosi yang relatif cukup tinggi, dan relatif murah. *Stainless Steel* AISI 316L mengandung nikel yang bersifat toksik, yang dapat menimbulkan alergi [1].

Tulang membentuk rangka pelindung bagi tubuh manusia dan tempat untuk melekatnya otot yang menggerakkan kerangka tubuh, serta merupakan bagian tubuh yang paling sering mengalami patah akibat dari benturan keras yang diterima oleh tubuh manusia. Berdasarkan ilmu kedokteran dengan spesialisasi ortopedi, mengatasi kondisi tersebut dilakukan dengan proses penyambungan menggunakan sebuah pelat. Tujuan utamanya agar tulang yang patah tersebut dapat tersambung dengan baik. Komponen yang digunakan untuk keperluan tersebut yaitu *Dynamic Compression Plate* (DCP) dan *Locking Compression Plate* (LCP), seperti tertera pada Gambar 1. DCP dan LCP yang terbuat dari material *Stainless Steel* masih banyak digunakan karena pertimbangan dari sisi harga yang lebih murah, meskipun ketahanan korosinya tidak setinggi *Titanium Alloy*.



Gambar 1. Jenis Pelat (a) DCP, (b) LCP [2]

DCP umumnya digunakan pada pasien yang masih muda, dengan patahan yang relatif lurus, sedangkan LCP umumnya

digunakan untuk patahan bersudut, Gambar 2.

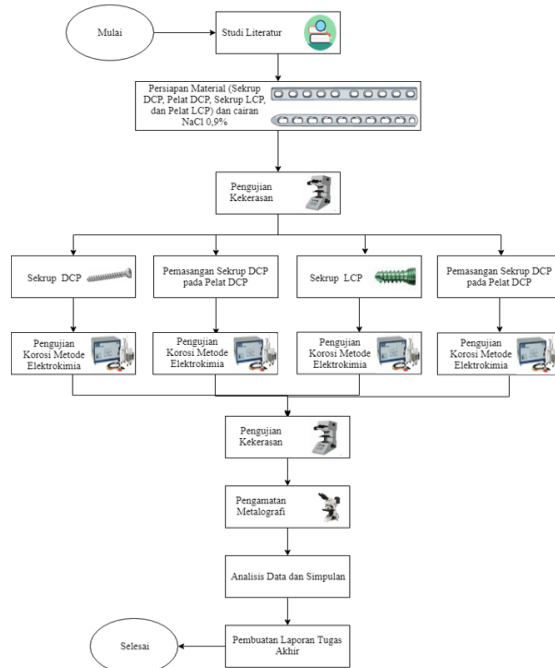


Gambar 2. Aplikasi Pelat (a) DCP, (b) LCP [2]

Proses pemasangan pelat baik DCP maupun LCP pada tulang yang patah dilakukan dengan cara memberikan gaya tekan melalui pemasangan sekrup pada lubang pelat. Setelah pasien dinyatakan sembuh, artinya tulang telah tersambung, maka pelat yang dipasangkan pada tulang akan dilepaskan dengan terlebih dahulu melepaskan sekrupnya. Saat pelepasan sekrup dari pelat, sering terjadi bahwa sekrup mengalami patah di bagian kepala sekrup. Patahan sekrup saat pelepasan pelat akan sangat membahayakan kondisi pasien, patahan tersebut dapat jatuh ke dalam sela-sela lemak atau otot tubuh manusia. Faktor utama penyebab sekrup patah saat dilepaskan adalah korosi yang terjadi di radius kepala sekrup [3,4]. Korosi dapat terjadi karena terdapat fluida berupa darah dalam tubuh manusia yang berkontak langsung dengan pelat dan sekrup. Oleh karena itu, hal ini menjadi satu kajian menarik yang akan dilakukan pada eksperimen ini, yaitu fenomena korosi yang terjadi pada kepala sekrup *Dynamic Compression Plate* dan *Locking Compression Plate* dikaitkan dengan laju korosi di daerah tersebut.

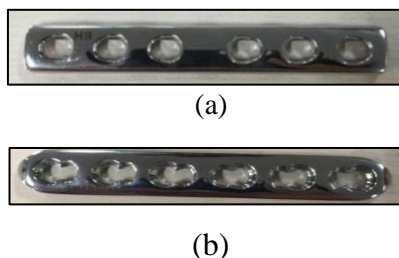
2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dimulai dengan pemilihan material benda kerja dan cairan sebagai media korosi. Tahap berikutnya akan dilakukan dengan karakterisasi pengujian keras, pengujian korosi, dan pengamatan metalografi dari hasil uji korosi, seperti tertera dalam diagram alir pada Gambar 3.

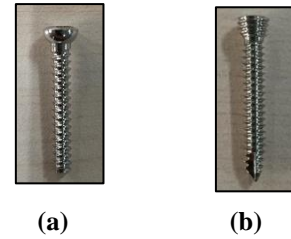


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Material benda kerja yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah *Stainless Steel 316L* dalam bentuk *Ulna & Radius Compression Plate (Small DCP) 6 holes* dan *Ulna & Radius Compression Locking Plates 6 holes*, Gambar 4. Pelat dilengkapi dengan sekrup 3,5 mm *Cortical Screw Full Thread L 24 mm* dan sekrup 2,7 mm *Self Tapping Locking Screw L 24 mm*, Gambar 5.



Gambar 4. (a) DCP 6 holes, (b) LCP 6 holes



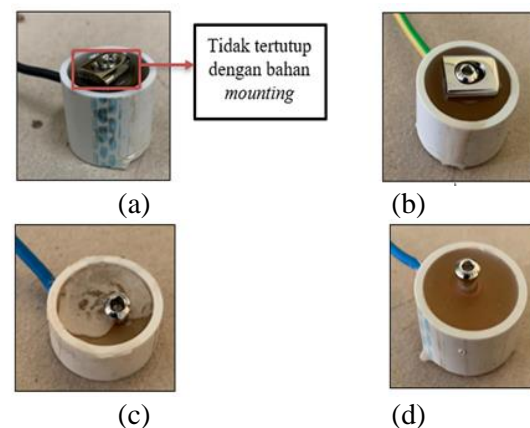
Gambar 5. (a) 3,5 mm *Cortical Screw Full Thread*, (b) 2,7 mm *Self Tapping Locking Screw*

Pengujian kekerasan yang dilakukan dengan metode *Vickers*, menggunakan pembebanan sebesar 1000 gf atau 1 HV. Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen sebanyak 5 titik sebelum dan sesudah dilakukan pengujian korosi. Hal ini untuk dapat mengetahui apakah ada terjadi perubahan nilai kekerasan setelah dilakukan pengujian korosi.

Pengujian korosi dilakukan dengan metode polarisasi (elektrokimia), sebelum dilakukan pengujian korosi harus dipersiapkan terlebih dahulu spesimen yang sesuai dengan standar. Persiapan material dilakukan dengan beberapa tahap sebagai berikut:

1. Pemotongan (*Cutting*)
2. Pembungkaihan (*Mounting*)

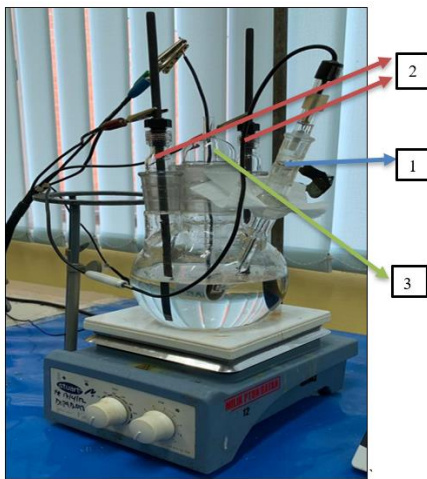
Proses *mounting* dilakukan untuk mempermudah pada pengujian korosi. Sekrup dan pelat DCP maupun LCP tidak sepenuhnya tertutup dengan bahan *mounting*, agar saat pengujian korosi berlangsung diharapkan ada cairan NaCl yang masuk ke bagian tersebut, Gambar 6.



Gambar 6. Hasil *Mounting* (a) Sekrup dipasangkan LCP, (b) Sekrup Dipasangkan DCP, (c) Sekrup LCP, (d) Sekrup DCP

3. Pengujian Korosi dengan metode Polarisation (elektrokimia).

Pengujian korosi menggunakan alat potensiostat yang dapat dilihat pada Gambar 7. Pengujian ini berlangsung pada suhu ruangan dengan menggunakan 3 elektroda, yaitu elektroda kerja, elektroda bantu berupa karbon, dan elektroda acuan berupa standar kalomel. Ketiga elektroda tersebut dialiri tegangan dan akan terbaca (terekam) oleh *Camry Instruments Reference 600 Potentiostat/Galvanostat/ZRA*. Jenis fluida sebagai media korosi yang digunakan untuk pengujian korosi adalah NaCl 0,9% sebanyak 500 ml. Parameter pengujian tertera pada Tabel 1.



Gambar 7. Alat Uji Korosi Potentiostat
(1) Elektroda Kerja, (2) Elektroda Bantu,
(3) Elektroda Acuan

Tabel 1. Parameter Spesimen Pengujian Korosi

Spesimen	Luas (cm ²)	ρ (gr/cm ³)	E _w
Sekrup dipasangkan Pelat LCP	1,454	7,99	10,045
Sekrup LCP	0,057	7,99	10,045
Sekrup dipasangkan Pelat DCP	1,2038	7,99	10,045
Sekrup DCP	0,0962	7,99	10,045

Laju korosi dihitung dengan menentukan terlebih dahulu nilai rapat arus (*I_{corr}*) menggunakan polarisasi Tafel. Perhitungan laju korosi (*Corrosion Rate*) dilakukan dengan persamaan sebagai berikut [5,6]:

$$\text{Corrosion Rate (CR)} = \frac{0,13 \times I_{corr} \times EW}{A \times d} \quad (1)$$

Keterangan:

E_w = Berat ekuivalen (g/ekuivalen)

A = Luas penampang (cm²)

d = densitas (g/cm³)

4. Metalografi.

Pengamatan metalografi bertujuan untuk mengamati bentuk dan luasan korosi yang terjadi pada permukaan pelat dan kepala sekrup.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi kimia DCP dan LCP hasil uji dengan OES tertera pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Komposisi Kimia DCP *Stainless Steel* 316L dari Hasil Pengujian OES

Unsur / Material	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Mn (%)	C (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
	ASTM A240	10 – 14	16–18	2–3	≤ 2	≤ 0,03	≤ 0,75	≤ 0,045
Hasil Pengujian	12,3	17,5	2,67	0,915	0,0203	0,644	0,0020	0,0010

Tabel 3. Komposisi Kimia LCP *Stainless Steel* 316L dari Hasil Pengujian OES

Unsur / Material	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Mn (%)	C (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
	ASTM A240	10 – 14	16–18	2–3	≤ 2	≤ 0,03	≤ 0,75	≤ 0,045
Hasil Pengujian	13,1	17,7	2,82	0,896	0,0259	0,585	0,0028	0,0031

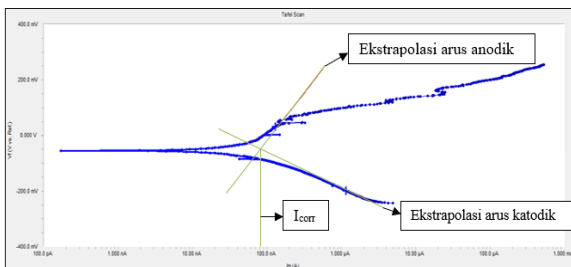
Hasil pengujian korosi menggunakan potensiostat didapatkan kurva polarisasi anodik-katodik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8 – 11. Dari keempat kurva diketahui bahwa pada rentang tegangan di bawah *E_{ocp}* mulai dari -250 mV sampai potensial korosi bebasnya (*E_{ocp}*) akan terjadi reaksi reduksi dengan adanya penurunan rapat arus. Adapun pada *E_{ocp}* sampai 250 mV terjadi reaksi oksidasi yang ditandai dengan kenaikan rapat arus korosi. Rapat arus korosi (*I_{corr}*) didapatkan dari hasil kurva potensial vs logaritma intensitas arus, dengan cara menentukan titik perpotongan dari garis Tafel reaksi reduksi (*β_b*) dan garis Tafel reaksi oksidasi (*β_a*) pada garis potensial korosi.

Dari keempat kurva yang ditunjukkan pada Gambar 8 – 11, dimulai dari rentang tegangan bawah sebesar -250 mV ke kiri sampai *E_{ocp}* terjadi reaksi reduksi pada larutan NaCl 0,9%, yang tereduksi adalah unsur Na

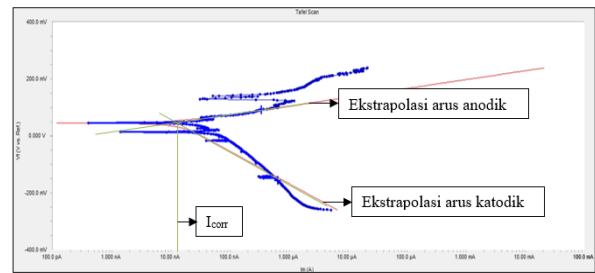
(Natrium) dan yang tidak tereduksi adalah Cl (Klorida). Dari nilai E_{ocp} sampai 250 mV terjadi reaksi oksidasi pada material SS 316L, artinya material implan terkorosi. Pada Gambar 8 dan Gambar 9, cenderung reaksi reduksi larutan NaCl 0,9% dan oksidasi material SS 316L sama. Perbedaannya pada Gambar 8 korosi yang terjadi pada material dari kenaikan nilai I_{corr} sebesar $8,44 \times 10^{-8}$ A dengan tegangan sebesar -50 mV sampai 250 mV, sedangkan Gambar 9 korosi pada material dimulai dari kenaikan pada nilai I_{corr} sebesar $1,33 \times 10^{-8}$ A pada tegangan sebesar 50 mV sampai 250 mV.

Peningkatan secara bertahap sampai pada tegangan 250 mV yang ditunjukkan pada Gambar 8, menyebabkan material mengalami *pitting corrosion* yang lebih besar dibandingkan peningkatan secara pesat yang ditunjukkan pada Gambar 9. Kenaikan kurva polarisasi bergeser semakin ke arah kanan menunjukkan bahwa rapat arus (I_{corr}) yang tinggi berbanding lurus dengan laju korosi yang tinggi.

Pada kedua kurva Tafel yang ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9, terdapat penyimpangan saat reaksi reduksi fluida kerja disebabkan tidak sepenuhnya unsur Natrium yang tereduksi demikian juga dengan reaksi oksidasi pada *Stainless Steel* 316L. Hal ini disebabkan permukaan spesimen yang tidak sepenuhnya rata. Daerah yang mengalami *pitting corrosion* yang lebih besar terjadi pada sekrup yang aplikasikan pada LCP. Hal ini disebabkan terjadi gesekan antara sekrup dan pelat yang cukup besar karena pada kepala sekrup dan lubang pelat terdapat ulir. Tidak demikian halnya pada sekrup LCP yang juga mengalami *pitting corrosion* tetapi tidak terlalu besar.



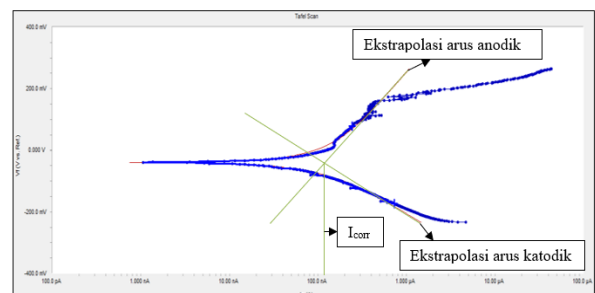
Gambar 8. Kurva Tafel Sekrup Dipasangkan LCP



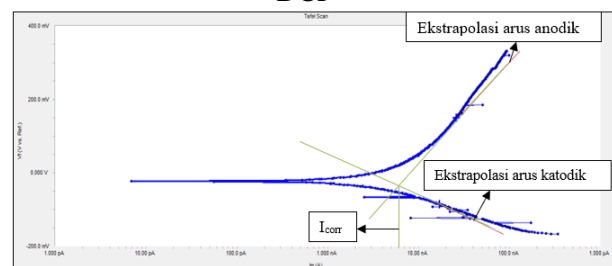
Gambar 9. Kurva Tafel Sekrup LCP

Pada Gambar 10 dan Gambar 11, proses korosi mempunyai kecenderungan yang sama. Perbedaannya pada Gambar 10, korosi pada material dimulai dari kenaikan pada nilai I_{corr} sebesar $1,28 \times 10^{-7}$ A pada tegangan sebesar -50 mV sampai 250 mV sedangkan pada Gambar 11, korosi pada material dimulai dari kenaikan pada nilai I_{corr} sebesar $6,15 \times 10^{-9}$ A pada tegangan sebesar -25 mV sampai 250 mV.

Peningkatan secara bertahap sampai pada tegangan 250 mV yang ditunjukkan pada Gambar 10, menyebabkan spesimen mengalami *pitting corrosion* yang lebih besar dibandingkan peningkatan secara pesat yang ditunjukkan pada Gambar 11. Pada kedua kurva Tafel yang ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11 terdapat juga terjadi penyimpangan seperti pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 10. Kurva Tafel Sekrup Dipasangkan DCP



Gambar 11. Kurva Tafel Sekrup DCP

Rangkuman data Tafel dari Gambar 8 – 11 tertera pada Tabel 4. Dari hasil pengujian ini akan mendapatkan nilai I_{corr} dan *corrosion rate*. Nilai I_{corr} (rapat arus korosi) berbanding lurus dengan *corrosion rate*. Pada sekrup LCP dipasangkan dengan LCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $8,44 \times 10^{-8}$ A sedangkan sekrup LCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $1,33 \times 10^{-8}$ A. Sekrup DCP dipasangkan dengan DCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $1,28 \times 10^{-7}$ A sedangkan sekrup DCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $6,15 \times 10^{-9}$ A. Hal ini menunjukkan bahwa sekrup yang sudah diaplikasikan pada pelat akan terjadi korosi yang lebih kecil dibandingkan pada sekrup itu sendiri. Nilai I_{corr} yang semakin kecil menunjukkan bahwa spesimen semakin tidak tahan terhadap korosi, dan juga sebaliknya. Artinya korosi akan diawali pada sekrup dan menuju ke arah sambungan. Laju korosi yang diperoleh memang sangat kecil namun tetap harus menjadi perhatian, karena pada dasarnya tubuh manusia tidak dapat menerima benda asing dalam tubuhnya. Dengan kata lain: I_{corr} (sekrup + pelat) > I_{corr} (sekrup); Korosi (sekrup + plat) < Korosi (sekrup); artinya makin tinggi I_{corr} maka ketahanan korosi akan makin tinggi pula.

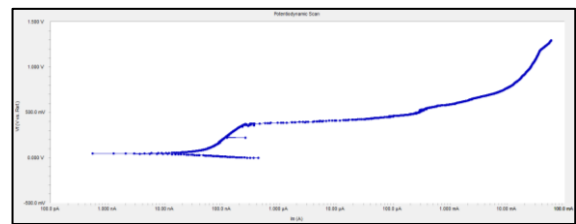
Pengujian potensiodinamik bertujuan untuk mengetahui fenomena lain yang terjadi pada spesimen. Kurva potensiodinamik dapat dilihat pada Gambar 12 – 15. Tegangan yang diberikan pada keempat spesimen sampai sebesar 1300 mV. Awalnya terjadi proses reduksi pada fluida kerja (NaCl 0,9%) tetapi tidak sepanjang pengujian Tafel dan dilanjutkan dengan proses oksidasi pada spesimen.

Tabel 4. Rangkuman Hasil Pengujian Tafel

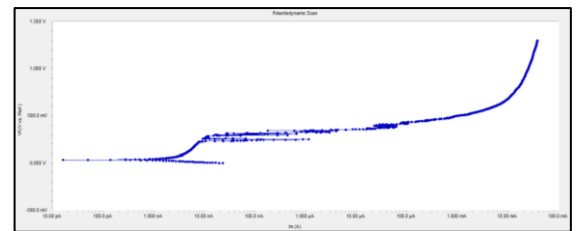
Nama Sampel	Metode Tafel			Corrosion Rate (mpy)
	β_a (V/decade)	β_b (V/decade)	I_{corr} (A)	
Sekrup dipasangkan LCP	0,3582	0,1235	$8,44 \times 10^{-8}$	0,0094
Sekrup LCP	0,0312	0,1135	$1,33 \times 10^{-8}$	0,0377
Sekrup dipasangkan DCP	0,3287	0,1821	$1,28 \times 10^{-7}$	0,0104
Sekrup DCP	0,2674	0,1250	$6,15 \times 10^{-9}$	0,0172

Pada Gambar 12 dapat dilihat kenaikan rapat arus secara bertahap, sedangkan dan Gambar 13 kenaikan rapat arus secara pesat sampai pada tegangan 1300 mV. Rapat arus tinggi ditandai dengan kenaikan kurva secara bertahap (semakin ke arah kanan) artinya spesimen akan semakin terkorosi. Pada kurva potensiodinamik sekrup LCP terdapat penyimpangan pada kenaikan kurva yang disebabkan luas permukaan spesimen yang tidak rata. Kenaikan yang terjadi pada kedua kurva dari tegangan 500 mV sampai 1300 mV menunjukkan bahwa material mulai terkorosi, yang menyebabkan fluida kerja berupa NaCl 0,9% menjadi sedikit jenuh.

Rapat arus korosi maksimal sampai pada tegangan 1300 mV pada Gambar 12 sebesar $5,97 \times 10^{-2}$ A sedangkan rapat arus korosi maksimal pada Gambar 13 sebesar $4,05 \times 10^{-2}$ A. Perbedaan nilai rapat arus maksimal yang kecil sebesar $1,92 \times 10^{-2}$ mA akan membuktikan bahwa luas daerah korosi pada kedua spesimen tidak terlalu berbeda jauh.



Gambar 12. Kurva Potensiodinamik Sekrup Dipasangkan LCP

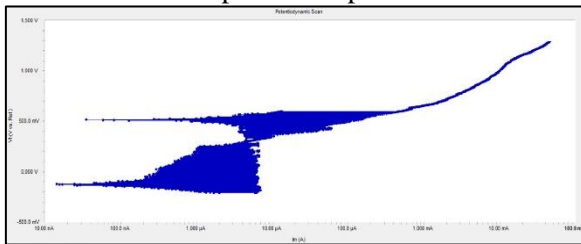


Gambar 13. Kurva Potensiodinamik Sekrup LCP

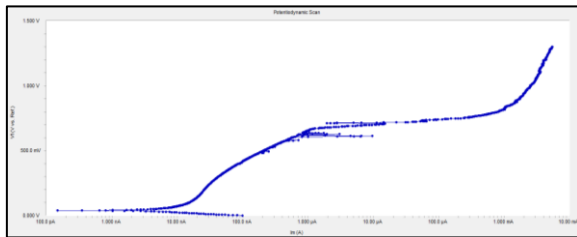
Pada Gambar 14, dapat dilihat kenaikan rapat arus secara bertahap dan Gambar 15 kenaikan rapat arus secara pesat sampai pada tegangan 1300 mV. Pada kondisi ini pun terjadi penyimpangan seperti pada spesimen yang lain karena luas permukaan spesimen yang tidak rata.

Antar muka sekrup yang dipasangkan pada pelat dengan tidak rata akan menghasilkan kurva yang tidak beraturan karena tidak dapat mencapai keadaan stabil. Pengujian OCP yang tidak stabil akan memengaruhi reaksi antara permukaan

elektroda dan larutan uji. Kurva potensiodinamik sekrup DCP dipasang pelat, kenaikan terjadi antara tegangan 600 mV sampai 1300 mV yang menunjukkan spesimen mulai terkorosi. Akibatnya fluida kerja (NaCl 0,9%) menjadi jenuh, Gambar 14. Hal yang sama terjadi pada sekrup DCP, kenaikan tegangan terjadi dari 700 mV sampai 1300 mV, Gambar 15. Perbedaan nilai rapat arus pada Gambar 14 dan 15, yang besarnya maksimal $6,25 \times 10^{-2}$ A membuktikan bahwa luas daerah korosi pada sekrup yang dipasangkan DCP lebih besar daripada sekrup DCP.



Gambar 14. Kurva Potensiodinamik Sekrup Dipasangkan DCP.



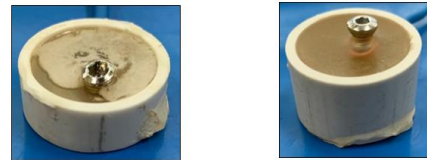
Gambar 15. Kurva Potensiodinamik Sekrup DCP.

Kondisi spesimen setelah pengujian Tafel dan potensiodinamik pada sekrup dipasangkan LCP, sekrup LCP, sekrup dipasangkan DCP, dan sekrup DCP dapat dilihat pada Gambar 16. Terlihat jelas secara visual pada sekrup yang dipasangkan DCP mengalami korosi paling besar dibandingkan spesimen yang lain. Hal ini dipengaruhi nilai I_{corr} sebesar $1,28 \times 10^{-7}$ A pada pengujian Tafel, dan rapat arus maksimal sebesar $6,82 \times 10^{-2}$ A pada pengujian potensiodinamik. Kondisi ini membuat fluida kerja menjadi jenuh dan spesimen terkorosi lebih besar dibandingkan terhadap spesimen yang lain.



(a)

(b)

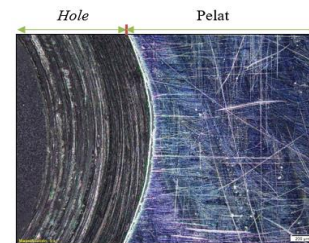


(c)

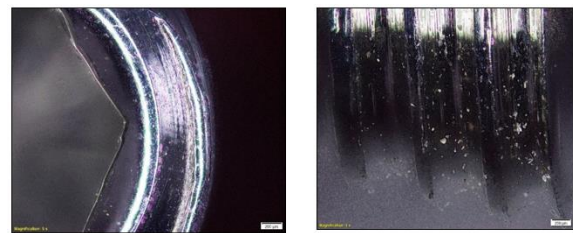
(d)

Gambar 16. Hasil Sesudah Pengujian Korosi (a) Sekrup dipasangkan LCP, (b) Sekrup Dipasangkan DCP, (c) Sekrup LCP, (d) Sekrup DCP

Berdasarkan data Polarisasi Tafel baik untuk sekrup maupun sekrup yang dipasangkan pada DCP atau LCP, fenomena korosi yang terjadi cenderung sama. Dengan demikian seharusnya jenis korosi yang terjadi pun sama, untuk memvalidasi fenomena korosi polarisasi Tafel perlu dilakukan pengamatan struktur mikro. Pengamatan struktur mikro pada pelat LCP yang belum dilakukan pengujian korosi dapat dilihat pada Gambar 17 dan sekrup LCP dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 17. Struktur Mikro LCP Sebelum Pengujian Korosi.



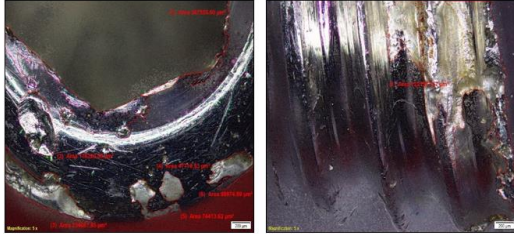
(a)

(b)

Gambar 18. Struktur Mikro Sekrup LCP Sebelum Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

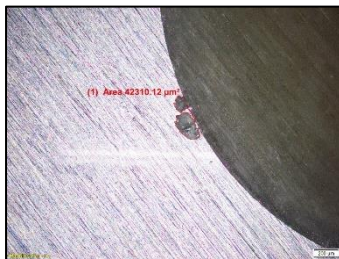
Sekrup yang dipasangkan LCP mempunyai luas daerah korosi pada bagian atas kepala sekrup sebesar $102,1 \times 10^{-4}$ cm² dan bagian samping kepala sekrup sebesar $122,2 \times 10^{-4}$ cm², Gambar 19. Adapun pelat LCP mempunyai luas daerah korosi sebesar $4,2 \times 10^{-4}$ cm², Gambar 20. Spesimen mengalami retak akibat proses korosi, retakan antar partikel akan mengakibatkan pori-pori semakin melebar dan mudah diterobos oleh atom dari

larutan korosif, terlihat bagian samping kepala sekrup berwarna kuning cokelat. Apabila dibiarkan dalam jangka waktu yang lebih lama maka spesimen akan mengalami pengeroposan dan akhirnya patah.



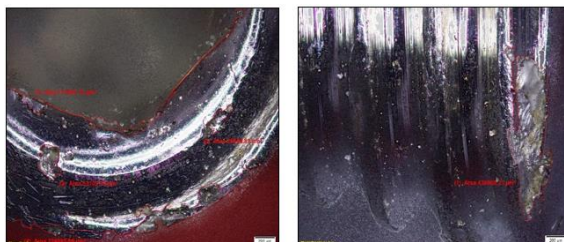
(a) (b)

Gambar 19. Struktur Mikro Sekrup yang dipasangkan LCP Sesudah Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping



Gambar 20. Struktur Mikro LCP Sesudah Pengujian Korosi

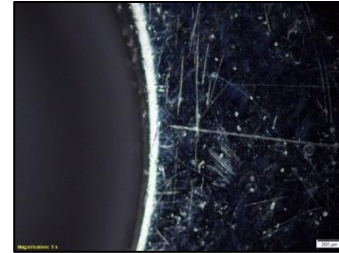
Sekrup LCP mempunyai luas daerah korosi pada bagian atas kepala sekrup sebesar $41,8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ dan bagian samping kepala sekrup sebesar $43,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, Gambar 21. Pada bagian atas kepala dan samping sekrup yang dipasangkan LCP memiliki luas daerah korosi yang lebih besar dibandingkan sekrup LCP. Hal ini terjadi akibat pengaruh adanya ulir pada kepala sekrup yang kontak langsung dengan lubang pelat, mengakibatkan pelat LCP mengalami *pitting corrosion* dan sekrup mengalami dua jenis korosi yaitu *pitting corrosion* dan korosi celah (*crevice corrosion*). Adapun pada Sekrup LCP tanpa aplikasi pada pelat hanya mengalami *pitting corrosion*.



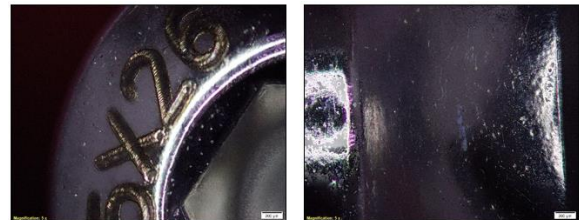
(a) (b)

Gambar 21. Struktur Mikro Sekrup LCP Sesudah Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

Struktur mikro pelat DCP dan sekrup DCP pada kondisi awal dapat dilihat pada Gambar 22 dan 23.



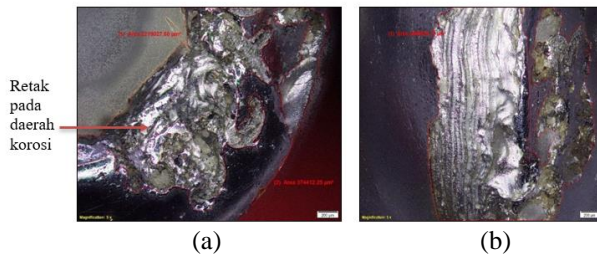
Gambar 22. Struktur Mikro Pelat DCP Sebelum Pengujian Korosi



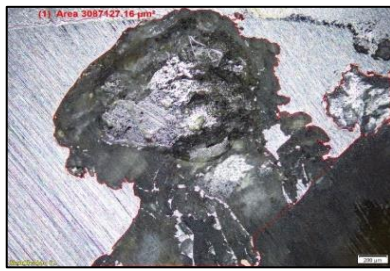
(a) (b)

Gambar 23. Struktur Mikro Sekrup DCP Sebelum Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

Sekrup yang dipasangkan pelat DCP mempunyai luas daerah korosi pada bagian atas kepala sekrup sebesar $259,3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ dan bagian samping kepala sekrup sebesar $345 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, Gambar 24. Adapun untuk pelat DCP mempunyai luas daerah korosi sebesar $308,7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ dapat dilihat pada Gambar 25. Spesimen mengalami retak akibat dari korosi, yang akan semakin melebar dan mudah diterobos oleh atom-atom larutan korosif. Sekrup DCP yang dipasangkan pada pelat mengalami korosi yang paling parah dibandingkan spesimen yang lain. Hal ini dikarenakan pada kepala sekrup DCP tidak mempunyai ulir sedangkan kepala sekrup LCP mempunyai ulir. Kepala sekrup yang tidak mempunyai ulir akan mengakibatkan seluruh permukaannya berkontak langsung dengan pelat dan terjadi gesekan yang akan membuat penipisan spesimen sehingga korosi terjadi lebih parah yang akhirnya akan menyebabkan kegagalan.

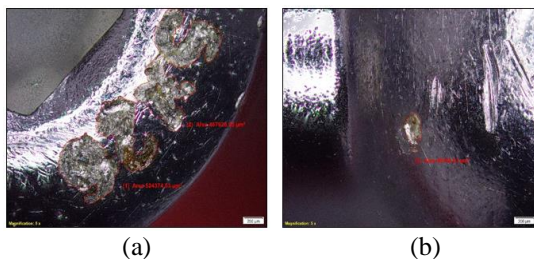


Gambar 24. Struktur Mikro Sekrup yang dipasangkan DCP Sesudah Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping



Gambar 25. Struktur Mikro DCP Sesudah Pengujian Korosi

Sekrup DCP mempunyai luas daerah korosi pada bagian atas kepala sekrup sebesar $101,2 \text{ cm}^2$ dan bagian samping kepala sekrup sebesar $4,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, Gambar 26. Pada bagian atas kepala dan samping sekrup yang dipasangkan DCP memiliki luas daerah korosi yang lebih besar dibandingkan sekrup DCP yang tidak diaplikasikan pada pelat. Hal ini karena kepala sekrup yang mengalami kontak langsung dengan lubang pelat yang mengakibatkan DCP mengalami *pitting corrosion* yang besar dan sekrup DCP mengalami tiga jenis korosi yaitu *pitting corrosion*, korosi celah (*crevice corrosion*), dan SCC (*Stress Corrosion Cracking*) ditandai dengan munculnya retakan di bagian sambungan pelat dan sekrup. SCC terjadi pada DCP namun tidak pada LCP akibat proses pemasangan secara dinamik pada DCP.

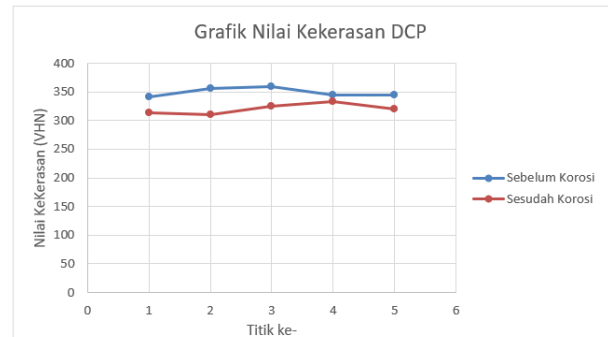


Gambar 26. Struktur Mikro Sekrup DCP Sesudah Pengujian Korosi: (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

Kondisi pengujian korosi Tafel dan potensiodinamik diasumsikan dilakukan pada kondisi tubuh manusia sehat, tanpa dipengaruhi oleh obat. Apabila pasien terlalu banyak penggunaan obat-obatan yang memiliki kadar asam yang cukup tinggi, maka laju korosi yang terjadi pada sekrup dan DCP maupun LCP yang diaplikasikan dalam tubuh manusia tersebut akan semakin cepat.

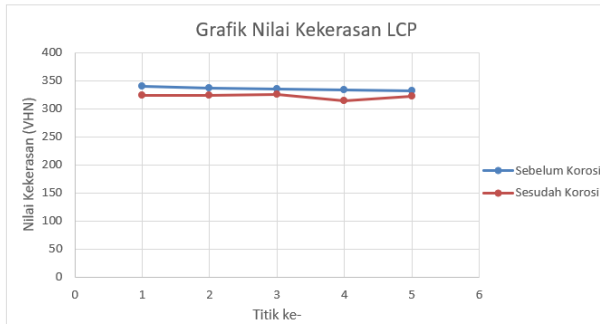
Pengujian korosi pada seluruh spesimen ternyata tidak mengalami kerusakan hingga patah, karena pengujian korosi yang dilakukan belum cukup lama untuk terjadi peningkatan laju korosi. Namun demikian, dari pengujian yang sudah dilakukan dapat diamati jenis korosi yang terjadi pada sekrup, jenis spesimen yang mengalami korosi paling besar, dan pengaruh kekerasan pada material setelah terkorosi.

Hasil pengujian kekerasan mikro untuk DCP ditunjukkan pada Gambar 27. Nilai kekerasan tertinggi untuk DCP sebelum terkorosi sebesar 359,2 HV dan sesudah terkorosi sebesar 334 HV. Pada grafik tersebut terlihat bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan pada 5 titik setelah DCP terkorosi.



Gambar 27. Grafik Nilai Kekerasan DCP

Data hasil pengujian kekerasan mikro untuk LCP ditunjukkan pada Gambar 28. Nilai kekerasan tertinggi untuk LCP sebelum terkorosi sebesar 340 HV dan sesudah terkorosi sebesar 325,9 HV. Kecenderungan kekerasan pada LCP juga sama dengan DCP, terjadi penurunan nilai kekerasan pada 5 titik setelah LCP sudah terkorosi.



Gambar 28. Grafik Nilai Kekerasan LCP

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan DCP sebelum dan sesudah terkorosi terjadi perubahan nilai kekerasan yang cukup signifikan, sedangkan tidak untuk untuk LCP. Dari perubahan kekerasan pada kedua pelat dapat dinyatakan bahwa DCP lebih cepat terkorosi dibandingkan LCP. Ditinjau dari laju korosi dan fenomena korosinya, DCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $1,28 \times 10^{-7}$ A dan luas daerah terkorosi sebesar $3.087.127,16 \mu\text{m}^2$ sedangkan LCP mempunyai nilai I_{corr} sebesar $8,44 \times 10^{-8}$ A dan luas daerah terkorosi sebesar $42.310,12 \mu\text{m}^2$. Hal ini membuktikan bahwa perbedaan nilai kekerasan sebelum dan sesudah korosi yang cukup signifikan akan menghasilkan luas daerah korosi pada permukaan spesimen yang besar dan laju korosi yang terjadi tinggi.

4. SIMPULAN

Analisis terhadap uji korosi, uji keras serta pengamatan metalografi pada sekrup dan pelat baik DCP maupun LCP, dapat ditarik beberapa simpulan sebagai berikut.

- a. Ketahanan korosi sekrup yang terpasang pada LCP lebih tinggi dibandingkan DCP, dikaitkan dengan laju korosinya, kekerasan mikro, dan luas daerah spesimen terkorosi, dengan rangkuman tertera pada Tabel 9, sebagai berikut:
- b. Fenomena korosi yang terjadi pada:
 - Sekrup yang dipasangkan pada DCP mengalami *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, terjadi akibat kombinasi antara tekanan permukaan dan gaya tarik pada batang ulir dengan lingkungan korosif yang akan menimbulkan SCC (*Stress Corrosion Cracking*, ditandai dengan munculnya retakan di daerah sambungan yang terkorosi.

- Sekrup yang dipasangkan pada LCP mengalami *Pitting Corrosion* dan *Crevice Corrosion* yang tidak separah pada sekrup yang dipasangkan pada DCP, dengan demikian kondisi ini tidak menyebabkan munculnya retakan mikro.
- Korosi pada DCP maupun LCP yang dipasangkan pada sekrup diawali di bagian sekrup menuju ke arah sambungan.
- Laju korosi yang diperoleh sangat rendah namun tetap harus menjadi perhatian karena dipasangkan di dalam tubuh manusia.

PENGHARGAAN

Pengujian dalam penelitian ini dilakukan di:

1. Laboratorium Uji dan Kalibrasi Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Kawasan PUSPITEK, Tangerang.
2. Laboratorium Karakterisasi dan Rekayasa Material, Prodi Teknik Mesin, Unika Atma Jaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bombac, D, B., et.al., (2007): Review of Materials in Medical Applications, RMZ Materials and Geoenvironment, Slovenia.
- [2] Perren, S, M., Klaue, K., Pohler, O., (1990): The Limited Contact Dynamic Compression Plate (LC-DCP), Arch Orthop Trauma Surg, Switzerland.
- [3] O'Keefe, R, J., et.al., (2013): Orthopaedic Basic Science Foundations of Clinical Practice Fourth Edition, American Academy of Orthopaedic Surgeons, USA.
- [4] Black, J., (1998): Orthopaedic Biomaterials in Research and Practice, CRC Press, New York.
- [5] Jones, D, A., (1996): Principles and Prevention of Corrosion 2nd Edition, Upper Saddle River NJ, Prentice Hall, USA.
- [6] Fontana, M, G., (1987): Corrosion Engineering Third Edition, Mc Graw Hill, USA.