

PROTEKSI KOROSI PIPA BAJA KARBON PENYALUR MIGAS DI LINGKUNGAN GARAM MENGGUNAKAN POLIMER HIBRID BERBASIS MONOMER GLYMO

Melati, H.A.,¹ Suratno, W.,² Hidayat, R.,³ Syakir, N.,⁴ Fitrilawati, F.⁴
¹Prodi Pendidikan Kimia, Jurusan Pendidikan MIPA, Universitas Tanjungpura
²Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Padjadjaran
³Kelompok Keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik, Fakultas MIPA,
Institut Teknologi Bandung
⁴Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Padjadjaran
E-mail: melati_annida@yahoo.com

ABSTRAK

Dalam artikel ini dilaporkan hasil uji proteksi korosi baja karbon API 5L X65 dengan menggunakan polimer hibrid anorganik-organik. Bahan prekursor polimer hibrid disintesis dari monomer (3-Glisidiloksipropil) trimetoksisilan (GLYMO) dengan menggunakan teknik sol-gel. Prekursor polimer hibrid tersebut dilapisi pada permukaan baja karbon, lalu dipolimerisasi secara termal. Uji korosi dilakukan dalam lingkungan garam (3,5% natrium klorida) dengan menggunakan metoda polarisasi potensiodinamik dan pemeriksaan morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Hasil yang didapatkan menunjukkan laju korosi baja karbon tanpa pelapis pada kondisi kritis adalah 1,60 mm/tahun. Setelah dilapisi polimer hibrid dengan konsentrasi 40% w/w, laju korosi baja karbon menjadi 1,08 mm/tahun. Laju korosi tersebut berkurang menjadi 0,65 mm/tahun apabila konsentrasi larutan pelapis diturunkan menjadi 18% w/w. Laju korosi tersebut berkaitan dengan efisiensi proteksi sebesar 59%. Hasil tersebut didukung oleh data morfologi permukaan yang menunjukkan korosi merata pada permukaan baja karbon berkurang setelah dilapisi dengan polimer hibrid..

Kata kunci: polimer hibrid, baja karbon, korosi, polarisasi potensiodinamik

CORROSION PROTECTION ON CARBON STEEL OF OIL AND GAS DISTRIBUTION PIPELINE IN SALINE ENVIRONMENT USING HYBRID POLYMERS BASED ON GLYMO MONOMERS

ABSTRACT

We report results of corrosion protection test of API 5L X65 carbon steel using inorganic-organic hybrid polymers. Precursor of hybrid polymer was synthesized from monomer of (3-glycidylpropyl) trimethoxysilane (GLYMO) using sol-gel technique. The precursor of hybrid polymers were coated on the carbon steel surfaces and then thermally polymerized. The corrosion tests were conducted on 3.5% sodium chloride saline environment using a potentiodynamic polarization method and surface morphology inspection using Scanning Electron Microscope. The results showed that a corrosion rate of the bared carbon steel in critical condition was 1.60 mm/year. When carbon steel was coated with 40% w/w hybrid polymer, the corrosion rate became 1.08 mm/year. The corrosion rate further decreased to be 0.65 mm/year when the concentration of the coating layer was reduced to 18% w/w. This value was related to protection efficiency of 59%. This result was supported by the surface morphology feature that showed corrosion on the carbon steel surface decreased after it was covered with the hybrid polymers.

Key words: hybrid polymers, carbon steel, corrosion, potentiodynamic polarization

PENDAHULUAN

Korosi merupakan salah satu permasalahan penting dalam industri minyak dan gas bumi (migas). Bocornya pipa penyalur migas akibat korosi berdampak pada berkurangnya jumlah

produksi, meningkatnya ongkos produksi, dan pencemaran lingkungan.

Pada saat ini, industri migas masih banyak menggunakan pipa baja karbon dalam penyaluran migas. Hal ini berkaitan dengan harga yang jauh lebih murah dibanding dengan baja yang sudah dimodifikasi sehingga tahan karat. Ber-

kaitan dengan hal tersebut, korosi merupakan masalah yang sangat penting karena biaya penanggulangan akibat korosi pada pipa baja karbon tersebut cukup besar. Korosi tersebut disebabkan oleh garam klorida, asam organik, dan gas CO₂ pada suhu tinggi. Zat-zat korosif tersebut dapat menyebabkan korosi merata dan/atau korosi setempat. Sebagai contoh, pada Gambar 1 diperlihatkan skema proses korosi baja karbon dalam larutan natrium klorida.

Untuk mencegah dan mengurangi efek korosi tersebut, perlu dicari bahan pelapis yang dapat memproteksi baja karbon dari korosi. Selama ini bahan yang banyak dipakai untuk proteksi korosi adalah kromat (Buchheit, 1995). Bahan tersebut dapat menghambat korosi dengan sangat baik dan memiliki adhesi yang baik terhadap logam. Namun, bahan tersebut merupakan senyawa karsinogenik yang sangat berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Selain itu, senyawa kromat tersebut mudah terkikis oleh arus fluida sehingga umur pakainya tidak lama.

Selain kromat, bahan lain yang banyak dipakai untuk proteksi korosi pada pipa baja karbon adalah bahan organik seperti polietilen, alkanethiol, dan lainnya (Grundmeier, *et. al.*, 2000). Berbeda dengan kromat, bahan organik dikenal ramah lingkungan dan mudah disintesis. Namun, umumnya bahan organik seperti polietilen memiliki stabilitas termal dan kekuatan mekanik yang kurang.

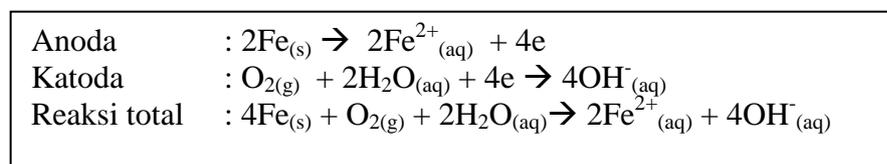
Agar diperoleh proteksi yang optimal, untuk pelapis baja karbon diperlukan bahan yang selain dapat menghambat korosi, juga memiliki adhesi yang baik pada permukaannya, memiliki kekuatan mekanik, stabilitas kimia dan stabilitas termal yang tinggi serta ramah lingkungan. Polimer hibrid anorganik-organik dapat menjadi alternatif karena memiliki kombinasi dari sifat-sifat tersebut (Kicklebick, 2007).

Polimer hibrid merupakan perpaduan antara polimer organik dan anorganik yang terbentuk dari jejaring anorganik (-Si-O-Si) dan jejaring

organik (seperti akrilat, epoksi, dan lainnya). Polimer organik memiliki beberapa keunggulan seperti kemudahan pembuatan, kemudahan pemrosesan, fleksibilitas dan sifat fungsional (Cowie, 1991). Di lain pihak, polimer anorganik memiliki kestabilan dalam suhu tinggi, transparan dan kestabilan mekanik yang tinggi (Haas, 2000). Oleh karena itu, polimer hibrid dapat memiliki stabilitas termal, resistansi kimia dan ketahanan terhadap cuaca yang lebih baik dibanding polimer organik (Kicklebick, 2007).

Polimer hibrid biasa dipakai sebagai bahan pelapis (*coating*) dalam industri otomotif (Schottner, 2001). Selanjutnya, bahan polimer hibrid yang terbuat dari monomer TEOS (*tetraethylorthosilicate*) dan MPS (*3-methacryloxypropyl trimethoxysilane*) pernah dilaporkan untuk proteksi baja (Chou, *at. al.*, 2001). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahan polimer hibrid tersebut memiliki adhesi yang baik pada permukaan baja dan memiliki proteksi korosi yang baik. Selain itu, polimer hibrid yang terbuat dari TEOS dan PDMS (*polydimethylsiloxane*) juga telah digunakan untuk proteksi baja dan Zn-Fe (Pires de Souza, *et. al.* 2006). Penelitian dalam bidang ini masih berada dalam tahap awal yang terfokus pada hubungan struktur sifat, walaupun ada aplikasi yang dikomersialkan (Schottner, 2001). Aspek komersial dari penelitian proteksi korosi tersebut telah membuat penelitian dalam bidang ini memperoleh banyak perhatian.

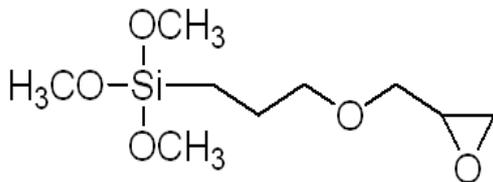
Penggunaan polimer hibrid untuk proteksi logam mempunyai keunggulan karena bahan ini memiliki kombinasi dari beberapa fungsi yang tidak dimiliki oleh bahan organik atau bahan anorganik. Selain transparan dan mudah disintesis, bahan polimer hibrid memiliki ketahanan abrasif. Tujuan penelitian ini untuk menguji korosi pada baja karbon API 5L X65 yang dilapisi dengan bahan polimer hibrid yang berbasis monomer GLYMO (3-Glisidiloksi-propil trimetoksisilan).



Gambar 1. Skema proses korosi baja karbon dalam larutan natrium klorida

BAHAN DAN METODE

Eksperimen yang dilakukan terdiri dari tiga bagian yaitu pembuatan prekursor polimer hibrid, pelapisan polimer hibrid pada permukaan baja karbon API 5L X65 dan pengujian korosi dengan menggunakan potensiostat dan pengukuran morfologi dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Prekursor polimer hibrid dibuat dari monomer GLYMO dengan proses sol-gel. Struktur dari monomer GLYMO diperlihatkan pada Gambar 2. Monomer tersebut memiliki tiga gugus fungsional OCH_3 yang terikat pada atom Si. Struktur tersebut memungkinkan monomer berpropagasi ke tiga arah membentuk struktur ikat silang.



Gambar 2. Struktur molekul monomer GLYMO yang terdiri dari gugus anorganik (O-Si-O) dan gugus organik epoksi

Dalam proses sintesisnya, monomer GLYMO dilarutkan ke dalam pelarut isopropanol, air, dan etanol. Lalu kedalam larutan tersebut dimasukkan katalis asam asetat. Campuran tersebut selanjutnya diaduk sampai terbentuk gel bening kental, yang disebut sebagai prekursor polimer hibrid.

Sebelum dilapisi dengan polimer hibrid, substrat baja karbon dipotong dengan ukuran tertentu. Permukaan baja tersebut digosok (*polish*) dengan kertas amplas ukuran tertentu, kemudian dibersihkan dengan aseton dan air. Substrat baja tersebut selanjutnya dipasang pada holder teflon yang akan dipakai sebagai elektroda dalam pengujian korosi yang menggunakan potensiostat.

Lapisan tipis polimer hibrid dideposisi pada permukaan baja karbon dari prekursor polimer hibrid yang telah ditambahkan inisiator termal dan dilarutkan dalam kloro-

form, dengan teknik *solution casting*. Konsentrasi larutan prekursor polimer hibrid yang dipakai adalah 40% w/w, 25% w/w, dan 18% w/w dalam pelarut kloroform. Konversi polimer hibrid dari prekursornya dilakukan secara termal dalam oven vakum dengan suhu 70- 80 °C selama 24 jam. Proses ini disebut termopolimerisasi yang dimaksudkan untuk mempolimerisasi bagian organik (gugus epoksi) dari monomer GLYMO.

Pengujian korosi dilakukan secara elektrokimia dengan teknik polarisasi potensiodinamik menggunakan potensiostat buatan *radiometer®* Copen Hagen tipe *voltalab PGZ 301* yang dikontrol oleh program Voltmaster 4 versi 7.08. Pengukuran tersebut menggunakan sel tiga elektroda yang mana sampel baja karbon yang dilapisi dengan polimer hibrid berfungsi sebagai elektroda kerja (*working electrode*), platina sebagai elektroda bantu (*counter electrode*), dan elektroda kalomel jenuh (SCE, *saturated calomel electrode*) sebagai elektroda pembanding (*reference electrode*) (ASTM G 5-78, 1987). Pengujian dilakukan dalam larutan elektrolit 3,5% natrium klorida yang dibuat dengan cara melarutkan 3,5 g natrium klorida ke dalam 100 mL akuades (ASTM 44-75, 1987).

Pada pengukuran laju korosi baja karbon dalam larutan uji dipergunakan potensial DC sebesar $\pm 50\text{mV}$ relatif terhadap nilai potensial korosi (E_{corr}). Kurva polarisasi potensiodinamik dipindai dengan laju sapuan konstan pada 0,2 mV/s (ASTM G 5-78, 1987). Pada pengukuran yang dilakukan, untuk menentukan kondisi kritis dilakukan variasi suhu larutan uji dan waktu paparan. Kondisi kritis yang dimaksud adalah kondisi dimana laju reaksi korosi tertinggi diperoleh dari kondisi yang diberikan. Variasi suhu larutan uji adalah antara 25 °C dan 85°C dengan paparan selama 4 jam. Variasi waktu paparan dilakukan selama 24 jam secara berkesinambungan pada kondisi suhu kritis. Pengujian laju korosi substrat baja yang dilapisi dengan polimer hibrid dilakukan pada kondisi kritis Pemeriksaan morfologi permukaan baja karbon yang dilapisi polimer hibrid dan blanko (baja karbon yang tidak dilapisi)

dilakukan sebelum dan sesudah uji korosi menggunakan SEM.

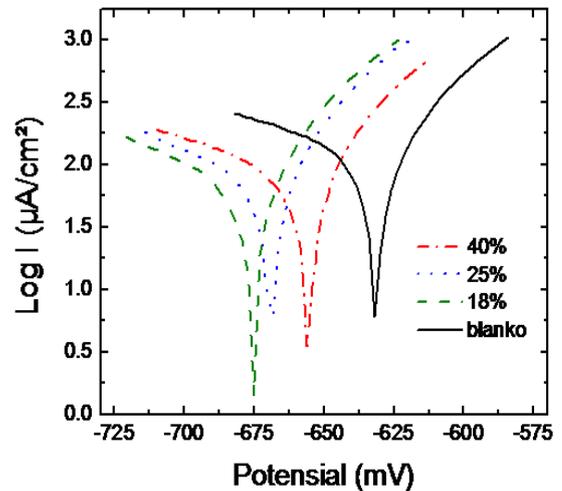
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan prekursor polimer hibrid yang dibuat tampak bening transparan sehingga tidak mengubah tampilan substrat baja karbon setelah bahan tersebut dilapiskan pada permukaannya. Namun, hasil pemeriksaan dengan foto SEM menunjukkan bahwa setelah dikenakan proses termopolimerisasi tampak ada beberapa lubang kecil pada permukaan lapisan polimer hibrid. Belum diketahui penyebab pasti dari timbulnya lubang-lubang tersebut. Kemungkinan hal tersebut diakibatkan terbentuknya gelembung (*bubble*) pada saat proses termopolimerisasi, yang kemudian gelembung tersebut pecah dan membentuk pori. Hal ini memerlukan kajian lebih lanjut, terutama untuk memeriksa kaitannya dengan adhesi antara bahan polimer hibrid ini dengan permukaan baja karbon.

Ada tiga macam konsentrasi polimer hibrid yang dilapisi pada permukaan baja karbon tersebut yaitu 40% w/w, 25% w/w, dan 18% w/w. Perbedaan konsentrasi tersebut berkaitan dengan ketebalan lapisan polimer hibrid yang berbeda. Selanjutnya, sampel baja karbon yang masing-masing dilapisi oleh polimer hibrid dengan konsentrasi 40% w/w, 25% w/w, dan 18% w/w berturut-turut disebut sebagai sampel A, sampel B, dan sampel C. Lapisan yang dibuat dari larutan polimer yang pekat memiliki ketebalan yang lebih besar dibanding dengan lapisan yang dibuat dari larutan polimer yang encer. Hasil pengujian kondisi kritis substrat baja karbon dalam larutan uji didapat hasil bahwa kondisi kritis adalah suhu larutan uji 75°C dengan waktu paparan selama 3 jam.

Evaluasi polimer hibrid GLYMO sebagai bahan pelapis baja karbon dilakukan dengan pengukuran laju korosi substrat baja karbon yang dilapisi polimer hibrid dalam larutan NaCl pada kondisi kritis. Hasil pengukuran yang didapat berupa kurva polarisasi anodik dan katodik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Pada gambar tersebut diperlihatkan juga kurva polarisasi untuk baja karbon yang dilapisi polimer

hibrid dengan konsentrasi yang berbeda. Sebagai pembanding, dalam gambar tersebut diperlihatkan juga kurva polarisasi untuk permukaan baja karbon yang tidak dilapisi polimer hibrid (blanko). Pada gambar tersebut tampak bahwa jika konsentrasi polimer hibrid yang melapisi permukaan baja karbon semakin rendah, maka potensial korosi bergeser ke arah lebih negatif. Hal ini menunjukkan pada sampel terjadi polarisasi katodik.



Gambar 3. Kurva polarisasi anodik dan katodik baja karbon yang dilapisi berbagai konsentrasi polimer hibrid GLYMO dibandingkan dengan baja karbon tanpa perlindungan pada kondisi kritis dalam larutan 3,5% natrium klorida

Tabel 1. Parameter korosi baja karbon yang dilapisi polimer hibrid GLYMO yang diperoleh melalui ekstrapolasi kurva polarisasi dengan metoda Tafel (ASTM G 5-78, 1987)

Sampel	E_{corr} (mV)	R_p (ohm. cm^2)	I_{corr} ($\mu A. cm^{-2}$)	r (mm/th)
Sampel A (40%)	-656,0	171,5 9	92,48	1,08
Sampel B (25%)	-668,7	177,9 3	75,10	0,88
Sampel C (18%)	-675,3	191,3 9	56,10	0,66
Blanko	-631,0	120,0 5	136,7 0	1,60

Dalam metode polarisasi potensio dinamik, nilai tahanan polarisasi (R_p), potensial korosi (E_{corr}), tetapan Tafel anodik (β_a) dan Tafel katodik (β_b) ditentukan melalui ekstrapolasi kurva polarisasi dengan metoda Tafel (ASTM G 5-78, 1987). Dalam pengukuran yang dilakukan, ekstrapolasi kurva polarisasi dilakukan oleh software kontrol alat potensiostat.

Dari hasil ekstrapolasi dengan menggunakan metoda Tafel didapat nilai E_{corr} dan R_p dari sampel baja karbon yang tidak dilapisi polimer berturut-turut adalah 631 mV dan 120 ohm. cm². Setelah dilapisi dengan polimer hibrid, nilai tersebut berubah. Jika ketebalan lapisan polimer makin tebal, potensial korosi menjadi semakin rendah dan tahanan polarisasi menjadi semakin tinggi. Nilai E_{corr} dan R_p untuk berbagai ketebalan lapisan proteksi polimer diperlihatkan dalam Tabel 1.

Berdasarkan data hasil ekstrapolasi tersebut dapat ditentukan kerapatan arus korosi (I_{corr}) dengan menggunakan persamaan 1. Selanjutnya, dengan menggunakan kerapatan arus korosi dapat ditentukan laju korosi (r) baja karbon seperti yang diperlihatkan oleh persamaan 2. Konstanta A_e dan ρ dalam persamaan tersebut masing-masing adalah massa ekuivalen logam baja karbon (28 gram.mol⁻¹.ekiv⁻¹) dan densitas logam baja karbon (7.86 gram/cm³).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} \frac{1}{R_p} \quad (1)$$

$$r = 3,27.10^{-3} \frac{A_e}{\rho} I_{corr} \quad (2)$$

Pengaruh konsentrasi terhadap laju korosi yang dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) menunjukkan penurunan konsentrasi berkaitan dengan turunnya laju korosi. Hasil perhitungan parameter korosi pada baja karbon yang dilapisi polimer hibrid GLYMO dibandingkan dengan baja karbon tanpa lapisan diperlihatkan pada Tabel 1.

Dari hasil eksperimen pada Tabel 1 tampak bahwa baja karbon yang dilapisi polimer hibrid GLYMO memiliki laju korosi yang lebih rendah dibandingkan

dengan baja karbon yang tidak dilapisi (blanko). Selain itu tampak bahwa laju korosi turun dengan berkurangnya konsentrasi polimer hibrid yang digunakan. Turunnya laju korosi tersebut berkaitan dengan penurunan arus korosi dan peningkatan tahanan polarisasi (R_p). Tampak bahwa dengan berkurangnya konsentrasi larutan polimer hibrid dari 40% menjadi 18%, tahanan polarisasi berubah dari 172 ohm cm² menjadi 191 ohm cm². Hal ini berkaitan dengan turunnya konduktivitas larutan karena ada lapisan (polimer hibrid) yang menghalangi serangan korosi pada baja karbon. Dari eksperimen yang dilakukan tampak bahwa konsentrasi polimer hibrid yang paling baik untuk pelapisan permukaan baja karbon adalah 18% karena memberikan laju korosi terendah.

Morfologi permukaan hasil pengukuran dengan SEM diperlihatkan dalam Gambar 4 Secara visual tampak jelas perbedaan permukaan baja karbon antara sebelum (Gambar 4.a) dan sesudah uji korosi (Gambar 4.c). Terdapat produk korosi yang terbentuk di atas permukaan baja karbon yang tidak dilapisi polimer setelah baja tersebut terpapar di dalam larutan 3,5% natrium klorida pada kondisi kritis. Pada permukaan baja karbon yang dilapisi polimer hibrid GLYMO, terlihat juga ada perbedaan antara keadaan sebelum (Gambar 4.b) dan sesudah uji korosi (Gambar 4.d). Tampak bahwa korosi pada baja karbon yang dilapisi polimer hibrid tidak sebanyak pada permukaan baja karbon tanpa lapisan. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian elektrokimia. Produk korosi yang terbentuk pada baja karbon yang dilapisi polimer hibrid berkaitan dengan lubang/ pori kecil yang terdapat pada permukaan film tipis polimer hibrid. Pori kecil tersebut memungkinkan serangan korosi pada baja karbon saat dipaparkan pada larutan 3,5% natrium klorida. Melalui pori tersebut terjadi difusi ion agresif klorida sehingga mengenai permukaan baja karbon.

Hasil yang uji proteksi yang diperoleh telah menunjukkan lapisan polimer hibrid pada baja karbon dapat menghambat terjadinya proses korosi. Dengan menggunakan data parameter uji korosi terhadap baja

karbon yang dilapisi polimer hibrid, dapat ditentukan efisiensi proteksi dari polimer hibrid tersebut dengan menggunakan persamaan 3.

$$P (\%) = 100 \left(1 - \frac{I_{corr}}{I_{corr}^0} \right) \quad (3)$$

Efisiensi proteksi seperti yang diperlihatkan pada persamaan 3 tersebut berkaitan dengan rapat arus korosi dari baja yang dilapisi polimer hibrid (I_{corr}) dan rapat arus korosi dari baja yang tidak dilapisi atau blanko (I_{corr}^0). Dengan menggunakan data parameter korosi pada Tabel 1, telah dilakukan perhitungan efisiensi proteksi dari polimer hibrid pada baja karbon seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2. Tampak bahwa efisiensi proteksi dari polimer hibrid mencapai 58% ketika digunakan polimer hibrid dengan konsentrasi 18% w/w untuk pelapis baja karbon.

Hasil perhitungan efisiensi proteksi dari polimer hibrid tersebut sesuai dengan morfologi permukaan yang diukur dengan SEM. Terlihat bahwa baja karbon tanpa dilapisi polimer hibrid mengalami korosi merata di seluruh permukaan, sedangkan baja karbon yang dilapisi polimer hibrid sedikit mengalami kerusakan akibat korosi. Korosi yang terjadi pada permukaan baja yang dilapisi polimer hibrid disebabkan oleh kualitas film yang kurang baik. Oleh sebab

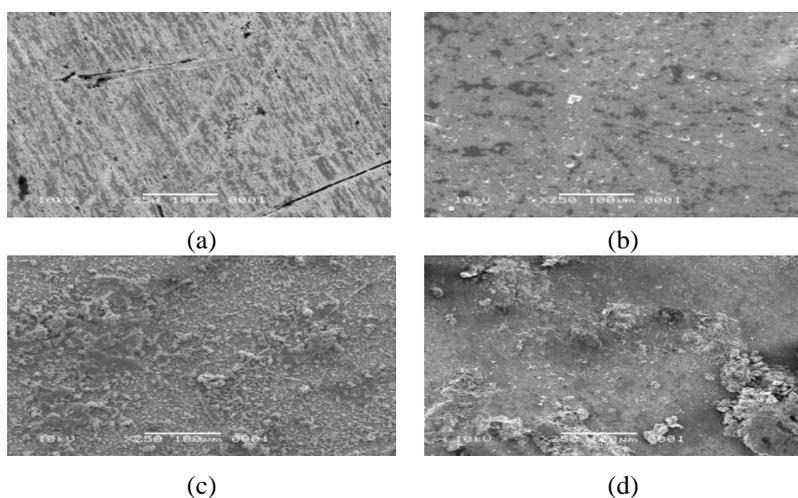
itu perlu penelitian lebih lanjut untuk menghasilkan lapisan polimer hibrid yang lebih homogen yaitu dengan meminimalkan lubang/pori yang terjadi pada permukaan film.

Tabel 2. Efisiensi proteksi dari polimer hibrid pada baja karbon.

Sampel	Konsentrasi polimer hibrid (% w/w)	Efisiensi Proteksi (%)
Sampel A	40	32
Sampel B	25	45
Sampel C	18	58

SIMPULAN

Baja karbon yang dilapisi polimer hibrid dari GLYMO memiliki laju korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan yang tidak dilapisi dengan efisiensi mencapai 58%. Hal ini menunjukkan bahan polimer hibrid dari GLYMO dapat digunakan untuk proteksi korosi baja karbon, namun perlu dilakukan optimasi dari proses pembuatan lapisan tipisnya. Secara keseluruhan hasil tersebut telah menunjukkan sifat protektif dari lapisan polimer hibrid GLYMO walaupun masih memerlukan studi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensinya



Gambar 4. Perbandingan morfologi permukaan baja karbon (a) tanpa lapisan polimer hibrid, (b) dilapisi polimer hibrid, (c) tanpa lapisan polimer hibrid setelah uji korosi, (d) dilapisi polimer hibrid setelah uji korosi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada Dr. Bun Bun Bundjali dari Laboratorium Korosi Kimia ITB atas akses penggunaan potensiostat untuk pengukuran laju korosi

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM G 5-78. 1987. Standard Recommended Practice for Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. *Annual Book of ASTM Standard, Metal Test Methods and Analytical Procedures*. American Society for Testing and Materials
- ASTM G 44-75. 1987. Standard Recommended Practice for Alternate Immersion Stress Corrosion Testing in 3,5% Sodium Chloride Solution, *Annual Book of ASTM Standard, Metal Test Methods and Analytical Procedures*. American Society for Testing and Materials.
- Buchheit, R. G. 1995. A Compilation of corrosion potentials reported for intermetallic phase in alluminium alloys. *Jurnal of the Electrochemical Society*, 12 (11): 3994-3996.
- Chou, T.P., Chandrasekaran, C., Limmer, S.J., seraji, S., Mu, y., Forbess, M.J. Nguyen, C., & Cao, G.Z. 2001. Organic-inorganic hybrid coatings for corrosion protection. *Journal of Non-Cyrtalline Solids* 290:153-162.
- Cowie, J.M.G. 1991. *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*. United Kingdom:Chapman & Hall
- Grundmeier, G., Schmidt, W., & Stratman, M. 2000. Corrosion Protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation. *Electrochim Acta* 45:2515-2533
- Haas, K-H. 2000. Hybrid inorganic-organic polymers based on organically modified Si-Alkoxides. *Advanced Engineering Material* 2:571-582
- Kickelbick, G. 2007. *Hybrid Materials*. Germany :Wiley-VCH Verlag GmbH
- Pires de Souza, M.E. Arieza, E. Ballester, M., Yoshida, I.V.P., Rocha, I.A., & Freire, C.M.A. 2006. Characterization of organic-inorganic hybrid coating for corrosion protection of galvanized steel and electroplated ZnFe steel. *Material Research* 9 (1) : 59-64.
- Schottner, G. 2001. Hybrid sol-gel derived polymers: application of multifunctional materials. *Chemistry of Matterial*. 13(10): 3422-3435