

Perpindahan Massa Konvektif dengan Turbulensi Gangguan Dinding pada Kanal Aliran antara Sel Elektrokimia Pelat Sejajar

Harinaldi dan Indrawan Prasetyo

Departement Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI-Depok, Jawa Barat 16424
E-mail: harinald@eng.ui.ac.id

Abstrak

Diantara proses-proses manufaktur yang sangat luas aplikasinya di bidang industri adalah proses yang memanfaatkan reaksi elektrokimia seperti proses electroplating. Proses ini melibatkan suatu perpindahan massa antara dua elektroda (anoda dan katoda) dalam suatu cairan elektrolit. Pada penelitian ini aspek dinamika fluida aliran elektrolit menjadi fokus perhatian dalam upaya memperbaiki kinerja proses. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan aliran turbulensi yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali (separating-reattached flow) akibat gangguan dinding terhadap aliran, untuk meningkatkan laju perpindahan massa antara dua sel elektrokimia pelat sejajar dalam suatu kanal aliran fluida elektrolit. Pelat tembaga dan larutan $CuSO_4$ dipilih sebagai elektroda dan cairan elektrolit dalam penelitian. Pengukuran laju perpindahan massa menggunakan teknik limiting diffusion current. Pencetus turbulensi model gangguan dinding berupa pagar (fence) setinggi 5 mm digunakan pada kanal aliran elektrolit antara dua sel elektrokimia pelat sejajar yang berjarak 10 mm. Hasil eksperimen menunjukkan laju perpindahan massa pada daerah yang mendekati pagar dan kemudian mengalami penurunan di bagian menjauhi pagar. Laju perpindahan massa kemudian mencapai meningkat kembali di daerah berkembangnya kembali aliran (redeveloping region) di bagian hilir dan menjadi lebih seragam dengan tingkat laju perpindahan massa yang relatif lebih baik, jika dibandingkan dengan kondisi tanpa adanya gangguan dinding. Perpindahan massa mengalami fluktiasi dengan kenaikan bilangan Reynolds, dimana pada rentang $Re = 500 - 3000$ diperoleh koefisien perpindahan massa, $K_m = 3,5 - 3,85 \times 10^{-4}$ (m/s) yang merupakan peningkatan sebesar 24,75 % dari kondisi tanpa adanya turbulensi gangguan dinding sebesar $K_m = 3,1 \times 10^{-4}$ (m/s).

Kata Kunci : Perpindahan massa, elektrokimia, turbulensi gangguan dinding

1. Pendahuluan

Dalam persaingan industri saat ini, penggunaan teknologi yang tepat guna dalam industri manufaktur sangat berperan penting untuk memecahkan masalah yang ada dalam proses produksi. Salah satu masalah penting dalam industri manufaktur dewasa ini adalah pengembangan teknologi proses produksi yang menitikberatkan pada upaya mendapatkan suatu metode manufaktur yang semakin efisien dan efektif namun dapat menghasilkan produk yang memenuhi ketentuan-ketentuan standard mutu yang diterapkan oleh perusahaan. Diantara proses-proses manufaktur yang sangat luas aplikasinya di bidang industri adalah proses yang memanfaatkan reaksi elektrokimia, seperti elektroplating yang melibatkan suatu perpindahan massa antara dua elektroda (anoda dan katoda) dalam suatu cairan elektrolit. Untuk berbagai keperluan yang spesifik beberapa metode telah dikembangkan dan dipatenkan. Mayer, S.T dan Contolini, R.J (1999) mematenkan teknik electroplanarization with diffusion barriers and electropolishing, untuk planarisasi suatu permukaan substrat yang memiliki bagian-bagian hilang (recesses) yang dikelilingi oleh region yang rata dengan menggunakan material yang konduktivitas ioniknya relatif rendah seperti konsentrasi asam fosfor dan beberapa polimer. Chen (2001) menemukan teknik pendepositon secara kimia untuk melapisi permukaan bahan semi konduktor dengan bahan tembaga. Metode yang digunakan peningkatan lapisan benih (seed layer) yang memberikan suatu hasil yang memungkinkan pelapisan tembaga secara uniform yang mampu mengisi struktur-struktur mikro. Selain itu telah terdapat beberapa paten

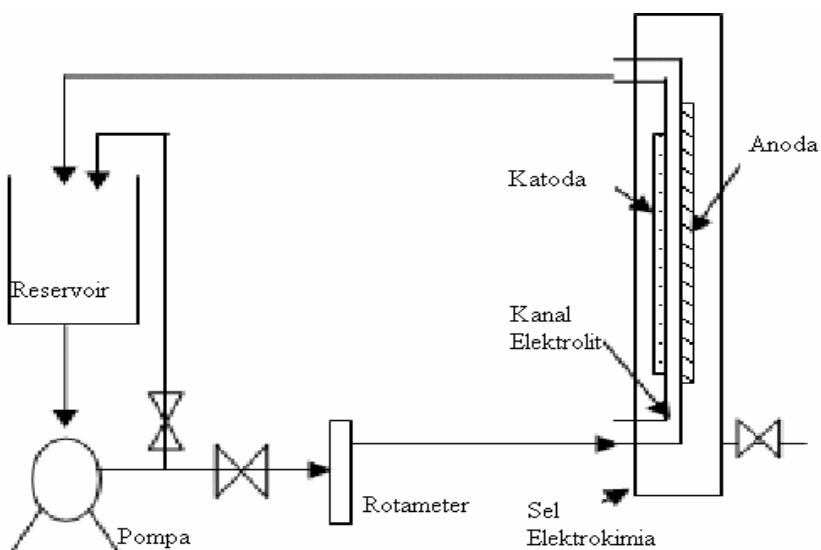
untuk teknologi sejenis. Namun dari semua metode yang ada, masih sangat jarang yang memanfaatkan aspek dinamika fluida sebagai dasar upaya peningkatan unjuk kerja proses elektroplating.

Sementara itu telah dipahami bahwa perpindahan massa antara dua elektroda pada proses elektrokimia ditentukan oleh perpindahan ion-ion elektrolit yang dapat dipengaruhi oleh tingkat turbulensi aliran, sehingga pemanfaatan turbulensi aliran pada laluan antara elektroda dapat menjadi metode yang sangat mungkin digunakan dalam meningkatkan laju perpindahan massa tersebut. Tambahan lagi, peralatan elektroplating industri melibatkan berbagai konfigurasi geometris elektroda yang kompleks, yang membuat turbulensi aliran cairan elektrolit menjadi faktor yang penting. Ditinjau dari aspek penghematan energi dan perlindungan terhadap lingkungan, pengembangan suatu teknik kontrol turbulen yang efisien sangat dibutuhkan meningkatkan perpindahan massa pada proses elektroplating tersebut. Diantara berbagai metode, kontrol umpan balik secara aktif (active feedback control) banyak menarik perhatian karena efek kendalinya yang sangat besar dengan hanya masukan kendali (control input) yang kecil. Kajian awal untuk memperoleh pemahaman fundamental mengenai peningkatan laju perpindahan massa awal untuk memperoleh pemahaman fundamental mengenai peningkatan laju perpindahan massa dengan kontrol turbulensi telah dilakukan oleh Harinaldi, et.al (2001), walaupun dilakukan bukan pada aplikasi yang sama dengan penelitian ini. Dalam penelitian ini, pemanfaatan turbulensi aliran dengan gangguan dinding sebagai dasar peningkatan laju perpindahan massa konvektif pada kanal aliran antara sel elektrokimia pelat sejajar dikaji secara komprehensif dengan metode eksperimental. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan kinerja proses elektrokimia berbasis pada kontrol dinamika fluida yang kelak dapat diterapkan dalam metode proses elektroplating secara praktis di dunia industri.

2. Metode Eksperimen

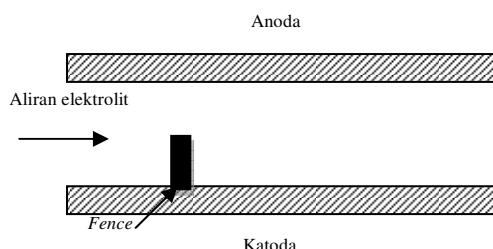
2.1 Sistem Aliran dan Sel Elektrokimian Pelat Sejajar

Eksperimen dilakukan dalam suatu sistem aliran elektrolit dengan loop tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem aliran ini dirancang untuk dapat berfungsi mengalirkan cairan elektrolit melewati kanal yang terbentuk diantara dua buah plat tembaga yang dipasang sejajar. Sistem aliran ini dilengkapi dengan katup-katup pengatur debit aliran. Cairan elektrolit yang berasal dari reservoir mengalir melewati flowmeter terlebih dahulu sebelum memasuki sel elektrokimia. Pada sel elektrokimia ini terdapat dua plat tembaga sejajar yang dipasang sebagai anoda dan katoda yang dialiri arus listrik searah yang bersumber dari sebuah perangkat catu daya DC.

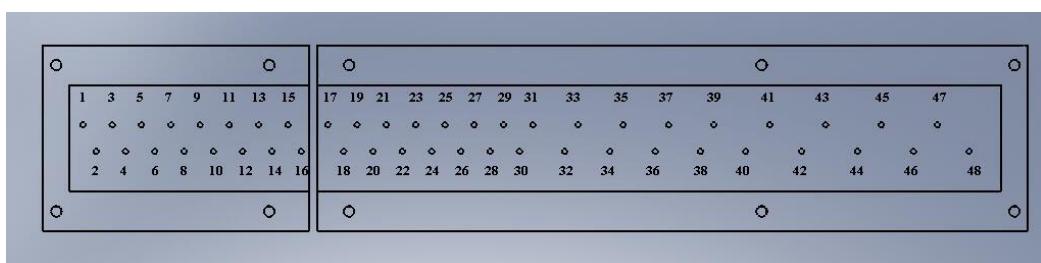


Gambar 1. Diagram Skematis Peralatan Eksperimen

Sel elektrokimia yang digunakan setinggi 100 cm dan memiliki bagian inlet dan outlet yang berjarak 10 cm dari dasar sel. Elektroda yang digunakan adalah plat tembaga. Anoda berukuran 41 cm x 4 cm dan katoda berukuran 37 cm x 4 cm dipasangkan saling sejajar dan saling bersebrang dengan jarak pisah 1 cm, sehingga membentuk kanal aliran berpenampang segiempat dengan katoda dan anoda sebagai dinding-dindingnya. Pada katoda dipasangkan pencetus turbulen gangguan dinding berupa hambatan pagar dengan tinggi 5 mm dan tebal 3 mm. Di bagian katoda dipasangi 48 titik elektrodamikro tembaga yang berdiameter 1,5 mm. Setiap mikroelektroda ini disambungkan ke terminal pengukuran arus listrik lokal yang dilakukan dengan sebuah digital multimeter yang terhubung dengan komputer sebagai suatu sistem akuisisi data. Susunan mikroelektroda terdiri dari 16 titik diposisi sebelum hambatan pagar dan 32 titik diposisi setelah hambatan pagar. Gambar 2 menunjukkan skema kanal aliran antara sel elektrokimia pelat sejajar dengan perletakan hambatan pagar (a) dan penomoran mikroelektroda pada plat katoda (b).



(a) Posisi *hambatan pagar* pada kanal sel elektrokimia



(b) Elektroda mikro pada pelat katoda

Gambar 2. Skema konfigurasi sel elektrokimia pelat sejajar

2.2 Metode Limiting Diffusion Current

Pada penelitian ini, penentuan koefisien perpindahan massa dilakukan dengan metode limiting diffusion current (Oduza, et al., 1997) dari reaksi elektrokimia berlangsung antara anoda dan katoda dengan larutan elektrolit tembaga sulfat, CuSO₄. Perpindahan massa ditentukan berdasarkan pengukuran limiting diffusion current lokal dari reaksi reduksi elektron pada ion Cu menurut persamaan reaksi:



Sifat-sifat dari cairan elektrolit CuSO₄ yang digunakan dalam eksperimen dapat dilihat pada Tabel I (Noult, 1987).

Tabel I. Sifat-sifat elektrolit CuSO₄

Sifat Fisik	CuSO ₄
Kerapatan, ρ (kg/m ³)	1072
Viskositas, μ (kg/m.s)	0,001149
Viskos. Kinematik, ν (m ² /s)	1,072 x 10 ⁻⁶
Berat molekul, M_r (gr/mol)	250
Konsentrasi, C (mol/m ³)	500
Diffusivitas ion, D (m ² /s)	4,43 x 10 ⁻¹⁰
Bilangan Schmidt, Sc	2418

Sebelum eksperimen, permukaan katoda dibersihkan dan dipoles dengan menggunakan kertas amplas dengan tingkat kekasaran beragam sampai didapatkan permukaan yang mengkilap. Kemudian dengan memberikan tegangan sebesar 800 mV antara anoda dan katoda, yang merupakan region datar pada kurva arus-tegangan, nilai limiting current untuk setiap elektroda mikro dapat diukur. Koefisien perpindahan massa lokal kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Km = \frac{I}{zFAC} \quad (2)$$

Dimana I adalah *limiting current* yang terukur pada elektroda mikro, z jumlah elektron valensi reaksi reduksi ($z = 2$), F bilangan Faraday (96487 C mol^{-1}), A luas penampang elektroda mikro dan C konsentrasi borongan larutan elektrolit, CuSO_4 . Kemudian data yang diperoleh dari mikroelektroda diproses menggunakan sistem akuisisi data dan diolah menggunakan perangkat lunak pengolah data. Eksperimen dilakukan pada berbagai kondisi laju aliran elektrolit dengan bilangan Reynolds, R_e yang didasarkan atas diameter hidrolik dari penampang laluan saat melewati *hambatan pagar*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel II.

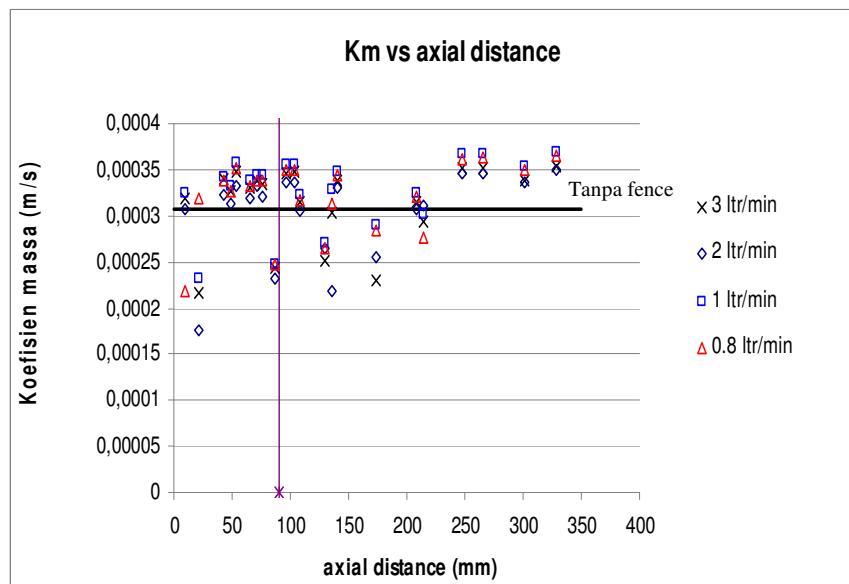
Tabel II. Kondisi Aliran dalam Eksperimen

Debit (ltr/min)	R_e
0,8	404,8
1	551,4
2	1513,2
3	2856,5

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Laju Perpindahan Massa

Pengaruh penggunaan pagar sebagai pencetus turbulensi pada laju perpindahan massa konvektif pada aliran elektrolit ditunjukkan Gambar 3 yang menggambarkan besar koefisien perpindahan massa sepanjang posisi aksial searah aliran (streamwise location) baik pada lokasi sebelum maupun setelah pagar.

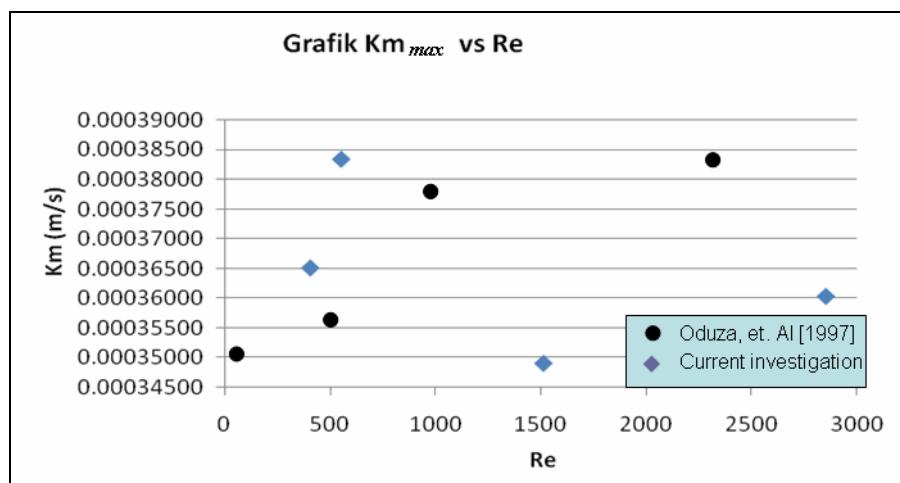


Gambar 3. Koefisien perpindahan massa lokal pada posisi searah aliran

Kenaikan maksimum perpindahan massa yang terjadi sebelum hambatan pagar adalah 14,66%, sedangkan perpindahan massa yang terjadi setelah hambatan pagar adalah 24,75%. Gambar 3 juga mengindikasikan kecenderungan koefisien perpindahan massa yang meningkat pada posisi-posisi awal menuju ke hambatan pagar lalu kemudian menurun setelah melewati hambatan pagar dan kemudian meningkat kembali setelah menjauhi hambatan pagar. Pada bagian hulu dari hambatan pagar terlihat bahwa kecepatan massa yang berpindah cenderung naik ketika mendekati hambatan pagar. Hal ini terjadi, karena aliran elektrolit harus melewati area yang menyempit dan menimbulkan turbulensi yang cukup besar akibat adanya hambatan pagar. Akibatnya partikel-partikel fluida dalam aliran tersebut menjadi bergerak lebih dinamis didekat hambatan pagar yang mendukung peningkatan laju perpindahan massa. Pada daerah yang sangat dekat dengan hambatan pagar terlihat pada Gambar 3, terdapat sebuah titik data yang menghasilkan koefisien perpindahan massa yang sangat rendah. Pada posisi tersebut diperkirakan terjadi jebakan aliran (*flow trap*) yang membuat region tersebut menjadi sangat tidak dinamis (*vacant region*) yang didominasi oleh *corner eddy* yang sangat lemah. Akibatnya partikel-partikel massa tersebut hanya berputar-putar di lokasi tersebut saja, sehingga kemampuan mendukung perpindahan massa menjadi jauh berkurang. Setelah melewati hambatan pagar karakter dari nilai koefisien perpindahan massa tersebut cenderung menurun seiring dengan melemahnya tingkat turbulensi setelah melewati hambatan pagar. Partikel-partikel fluida mengalami pergerakan acak akibat proses pertautan kembali (*reattachment*) sehingga meskipun masih memiliki tingkat intensitas turbulensi yang cukup tinggi, diperkirakan timbul efek yang menghambat proses perpindahan massa sehingga koefisien perpindahan massa lebih kecil dari kondisi tanpa aliran. Kemudian memasuki lokasi yang cukup jauh dari penghambat pagar aliran berkembang kembali (*redevelop*) dengan kondisi yang lebih stabil dan tingkat turbulensi yang lebih tinggi sehingga laju perpindahan massa lebih besar dari kondisi diam dengan distribusi yang lebih merata.

3.2 Pengaruh Laju Aliran Elektrolit

Pengaruh laju aliran bebas (*free stream*) elektrolit terhadap laju perpindahan massa konvektif ditunjukkan pada Gambar 4 yang menggambarkan hubungan antara koefisien perpindahan massa maksimum dengan bilangan Reynolds aliran elektrolit. Dari gambar terlihat bahwa koefisien perpindahan massa maksimum menunjukkan hubungan yang tidak linear dengan bilangan Reynolds aliran elektrolit. Dengan kenaikan Re sampai kisaran 600 koefisien perpindahan massa maksimum meningkat cukup tinggi. Namun kenaikan lebih lanjut laju aliran sampai Re 1500 menurunkan koefisien perpindahan massa maksimum mencapai nilainya yang terendah. Kenaikan Re lebih lanjut kembali meningkatkan koefisien perpindahan massa dengan gradien peningkatan yang lebih moderat. Dari hasil yang diperoleh ini, ternyata perpindahan massa yang terjadi tidak serta merta mengalami kenaikan jika nilai bilangan Reynolds ditambah.

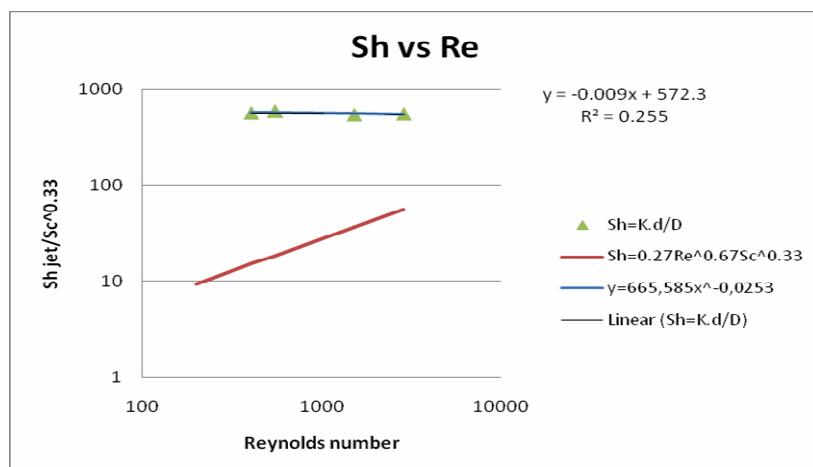


Gambar 4. Grafik koefisien perpindahan massa maksimum dengan bilangan Re

Dengan kenaikan Re pergerakan partikel fluida akan semakin cepat dan turbulensi meningkat sehingga mendorong peningkatan perpindahan massa. Namun kecenderungan yang ditunjukkan pada Gambar 4 mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan yang melebihi ambang tertentu memberikan pengaruh yang berlawanan yaitu menghambat perpindahan massa. Pada kondisi ini, kemungkinan perpindahan elektron antara anoda tidak dapat berlangsung secara efektif akibat elektron terseret oleh aliran yang mengalir begitu cepat mengikuti aliran borongannya. Pada gambar juga ditampilkan hasil dari eksperimen yang dilakukan Oduza et al. (1997), namun dengan konfigurasi reaksi elektrokimia yang berbeda. Kecenderungan peningkatan kenaikan Km_{max} pada laju aliran dengan kisaran Re rendah juga terlihat. Namun kecenderungan yang agak berbeda terlihat saat peningkatan laju aliran dengan bilangan Reynolds yang tinggi.

3.3 Korelasi bilangan Reynolds (Re) dengan bilangan Sherwood (Sh)

Relasi antara bilangan Reynolds, Re dan bilangan Sherwood, Sh yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 5. Dari eksperimen diperoleh relasi dengan persamaan $Sh=665.585Re^{-0.0253} Sc^{0.33}$. Pada grafik juga ditunjukkan relasi empiris yang didapatkan oleh Odouza et al. (1997). Terjadi perbedaan yang signifikan antara kedua relasi tersebut. Relasi yang diperoleh Odouza menunjukkan nilai yang cenderung naik sedangkan pada hasil eksperimen ini selain nilai yang lebih besar, trend yang ada juga menunjukkan grafik yang cenderung konstan. Dari dua relasi yang diperoleh masih sulit untuk menganalisis dan menentukan korelasi yang lebih tepat. Tambahan lagi korelasi dari Odouza et al. berasal hanya dari 2 titik data yang terlalu sedikit untuk membentuk regresi yang valid.



Gambar 5. Relasi antara bilangan Reynolds dan Sherwood

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan. Perpindahan massa yang terjadi pada kanal aliran elektrolit yang menggunakan pencetus turbulensi gangguan dinding tipe hambatan pagar (*fence*) memiliki kecenderungan koefisien laju perpindahan yang lebih besar daripada perpindahan massa tanpa pencetus turbulensi aliran. Pengaruh turbulensi aliran pada peningkatan nilai koefisien perpindahan massa tersebut tidak terjadi pada sepanjang plat tembaga. Bagian yang mengalami kenaikan nilai terjadi di bagian hulu plat tembaga atau bagian sebelum hambatan pagar sebesar 14,66% dan bagian hilir plat tembaga sebesar 24,75%. Perpindahan massa tidak berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aliran atau kenaikan bilangan Reynolds. Perpindahan massa memiliki grafik naik sampai nilai Reynolds sebesar 1000 kemudian turun dan mulai naik kembali hingga nilai Reynolds sebesar 3000.

Notasi

- | | |
|-----|--|
| A | Luas penampang elektroda mikro (m ²) |
| C | Konsentrasi larutan (mol/m ³) |

<i>D</i>	Koefisien difusi massa (m ² /s)
<i>d</i>	Diameter pipa (m)
<i>dh</i>	Diameter hidrolik (m)
<i>e</i>	Muatan listrik (C/mol)
<i>F</i>	Konstanta Faraday (A.s/mol)
<i>I</i>	Arus (A)
<i>Km</i>	Koef. perpindahan massa (m/s)
<i>Mr</i>	Berat molekul (gr/mol)
<i>Re</i>	Bilangan Reynolds
<i>Sc</i>	Bilangan Schmidt
<i>Sh</i>	Bilangan Sherwood
<i>z</i>	Elektron valensi
μ	Viskositas dinamik (kg/ms)
ρ	Massa jenis (kg/m ³)
ν	Viskositas kinematik (m ² /s)

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Program Hibah Penelitian pada Program Hibah Kompetisi A-3 Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia tahun 2007.

Referensi

- Chen, L.(2001), Method for electrolytically depositing copper on a semiconductor workpiece, U.S Patent No. 6290833.
- Harinaldi, Ueda, T and Mizumoto, M., (2001), “Effect of slot gas injection to the flow field and coherent structure characteristics of a backstep flow” International journal of heat and mass transfer, vol 44, issue 14, hal 2711-2726
- Mayer, S.T and Contolini, R.J (1999), Electroplanarization of large and small damascene features using diffusion barriers and electropolishing, U.S Patent No. 6315883.
- Nouly, R.A., Leaist, D.G. (1987). “Diffusion in aqueous copper sulfate and copper sulfate-sulfuric acid solutions” Journal of solution chemistry, vol 16, no 10, hal 813-825.
- Oduza, C.F, A.A Wragg, M.A Patrick (1997). “The effects of a variety of wall obstruction on local mass transfer in a parallel plate electrochemical flow cell”. Chemical Engineering Journal, 68, hal 145-155.