



UNIVERSITAS INDONESIA

**EFEKTIVITAS PERPINDAHAN MASSA KONVEKTIF PADA
PROSES ELEKTROKIMIA DENGAN KONTROL
TURBULENSI METODE AKUSTIK-MEKANIK**

SKRIPSI

**DITO AFANDI
0405020251**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**EFEKTIVITAS PERPINDAHAN MASSA KONVEKTIF PADA
PROSES ELEKTROKIMIA DENGAN KONTROL
TURBULENSI METODE AKUSTIK-MEKANIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**DITO AFANDI
0405020251**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Dito Afandi

NPM : 0405020251

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Dito Afandi
NPM : 0405020251
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Efektivitas Perpindahan Massa
Konvektif ppada Proses Elektrokimia
dengan Kontrol Turbulensi Metode
Akustik-Mekanik

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, M.Eng ()

Penguji : Dr.Ir. Warjito, M.Eng ()

Penguji : Dr. Ir. Engkos Achmad Kosasih,
M.T ()

Ditetapkan di :
Tanggal :

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim..

Alhamdulillah Robbil ‘alamin, penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Shalawat dan salam semoga selalu diucapkan untuk Rasulullah Muhammad SAW dan keluarganya, para sahabatnya dan kaum yang mengikuti ajaran beliau dengan baik sampai hari kiamat.

Dalam pembuatan laporan penelitian ini, penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan moril dan materiil. Pihak – pihak tersebut, a.l :

1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penulisan skripsi ini,
2. Staf teknis Departemen Teknik Mesin dan Departemen Teknik Kimia yang telah membantu penulis dalam persiapan teknis penelitian skripsi,
3. Orang tua di Pekanbaru dan seluruh keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis selama berkuliah di Universitas Indonesia,
4. Sahabat, teman, dan satu angkatan Teknik Mesin 2005 untuk semua dukungan kepada penulis.

Depok, Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dito Afandi
NPM : 0405020251
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Efektivitas Perpindahan Massa Konvektif pada Proses Elektrokimia dengan Kontrol Turbulensi Metode Akustik-Mekanik

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal :

Yang menyatakan

(.....)

ABSTRAK

Nama : Dito Afandi
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Efektivitas Perpindahan Massa Konvektif pada Proses Elektrokimia dengan Kontrol Turbulensi Metode Akustik-Mekanik

Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh dinamika fluida yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali terhadap kenaikan laju perpindahan massa konvektif proses elektroplating dalam studi kontrol aktif turbulensi aliran. Dalam penelitian ini apparatus yang digunakan adalah elektrolit CuSO_4 dan elektroda tembaga yang dipasang pada kanal vertikal kemudian diberikan gangguan berupa kecepatan aliran dalam bilangan Reynolds, $Re = 551 - 2100$ dan frekuensi eksitasi akustik, $f = 500 \text{ Hz}$ sampai 2000 Hz . Pemberian kontur tangga sebagai pencetus turbulensi dan gangguan eksitasi akustik secara radial terhadap aliran hulu kanal mempengaruhi profil turbulensi aliran dimana luasan struktur koheren terbentuk lebih intensif. Pada kenaikan frekuensi eksitasi menunjukkan penurunan laju perpindahan massa, tetapi pada bilangan Reynolds yang tinggi pengaruh ini mulai hilang. Selain itu, pada frekuensi eksitasi dan bilangan Reynolds tertentu, kedua faktor berkorelasi sehingga mempunyai potensi memperbesar *vortex shedding* yang meningkatkan laju perpindahan massa pada nilai yang signifikan. Nilai laju perpindahan massa konvektif maksimum menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan apabila dibandingkan dengan proses dalam kondisi diam hingga 214%.

Kata kunci :
Elektroplating, laju perpindahan massa konvektif, eksitasi akustik

ABSTRACT

Name : Dito Afandi
Study Program : Teknik Mesin
Title : Effectiveness of Convective Mass Transfer in Electrochemical Process with a Mechano-Acoustics Turbulent Control

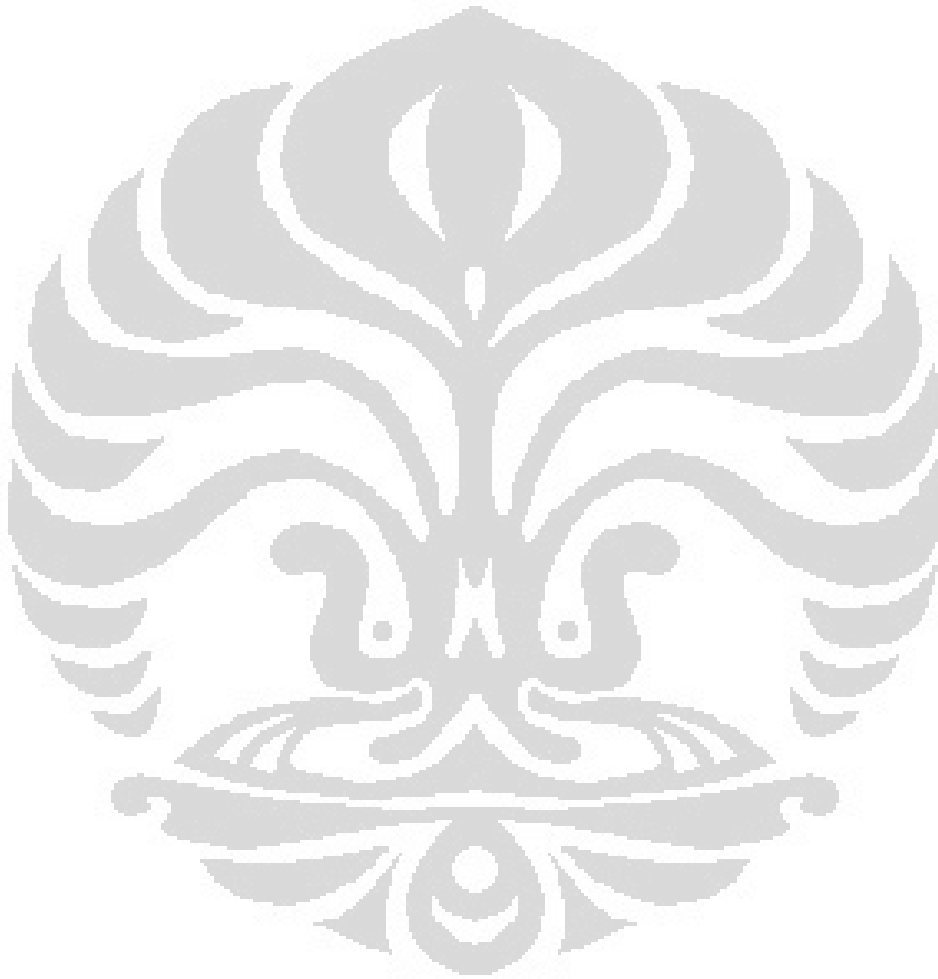
This research demonstrates the effect on convective mass transfer rate of electroplating process which caused by separated – reattached flow. The area of this research is to obtain an active control study of turbulence flow. Research was established on experimental apparatus using CuSO_4 as electrolyte, copper as electrode which is constructed on vertical ducting object. Then, velocity flow of Reynolds number, $Re = 551 - 2100$ and acoustic frequency, $f = 500 - 2000$ Hz are given to disturb the flow. Method of backward-facing step and active control using acoustic excitation which placed radially of upstream flow effect the turbulence profile which is large organized – coherent structure been produced intensively. A correlation of Reynolds number and acoustic excitation frequency shows that the convective mass transfer rate tends to decrease at higher excitation frequency. But this condition has exception on high Reynolds number. In addition, at certain point of Reynolds number and acoustic excitation show that mass transfer rate increase significantly because the growth of vortex shedding. Maximum convective mass transfer rate increase and show 214 % improvement from the condition without turbulence

Keywords :
Electroplating, convective mass transfer rate, acoustic excitation

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Metodologi Penelitian	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
2 DASAR TEORI.....	6
2.1 Elektroplating	6
2.2 Konsep Elektrokimia.....	7
2.2.1 Hukum Faraday.....	8
2.2.2 Propertis Tembaga	11
2.2.3 Larutan Elektrolit CuSO ₄	11
2.3 Aliran Fluida dalam Pipa	12
2.4 Aliran Fluida pada Backstep	15
2.5 Perpindahan Massa.....	16
3 METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Aktivitas Penelitian	19
3.2 Apparatus Penelitian	21
3.2.1 Sel elektrokimia (elektroda).....	23
3.2.2 Kanal aliran	26
3.2.3 Flowmeter	28
3.2.4 Speaker	29
3.2.5 Power supply DC	30
3.2.6 Digital multimeter (DMM)	30
3.2.7 Pompa.....	31
3.2.8 Reservoir	32
3.2.9 Pemipaan.....	32
3.2.10 Voltage regulator.....	32
3.3 Kalibrasi Alat Ukur	33
3.4 Prosedur Pengambilan Data	35
4 PENGOLAHAN DATA.....	37
4.1 Penentuan Data Uncertainty.....	37
4.2 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Reynolds	37
4.3 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa.....	38
4.4 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Strouhal.....	42

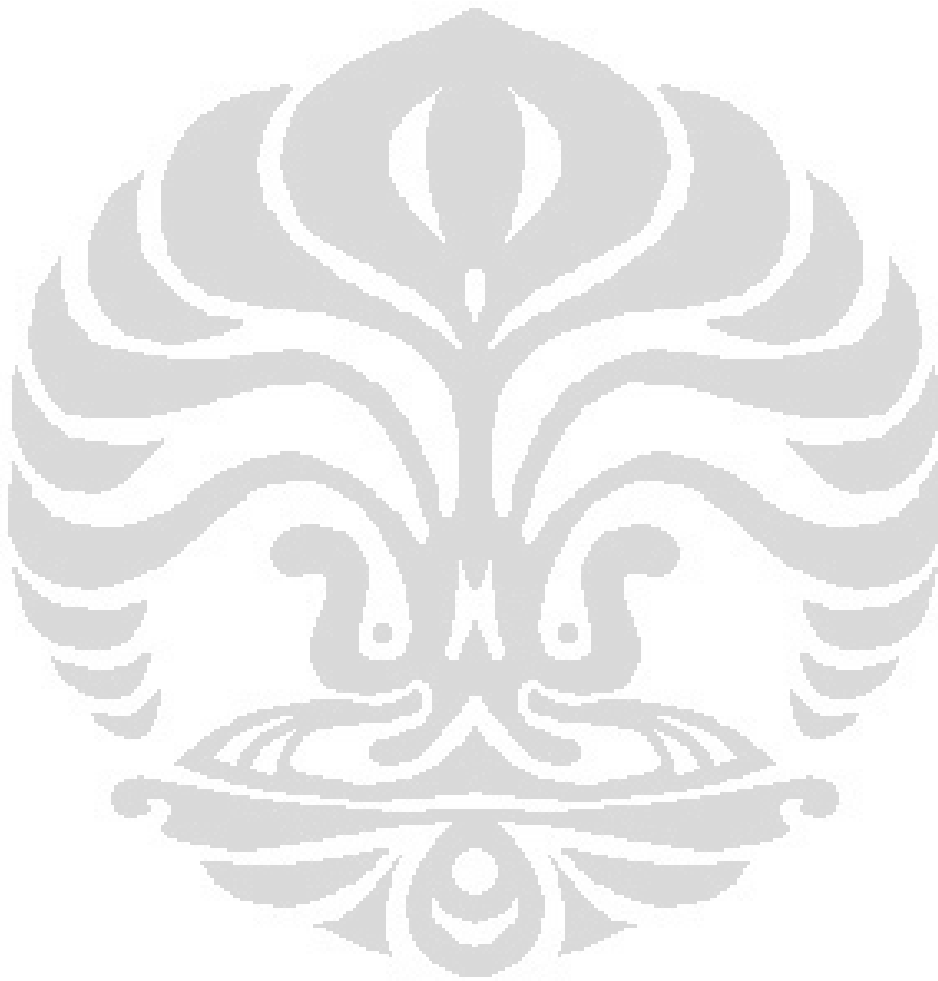
4.5	Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Schimdt	43
4.6	Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood	43
5	ANALISA DAN PEMBAHASAN	45
5.1	Analisa Koefisien Perpindahan Massa	45
5.2	Koefisien Perpindahan Massa Maksimum dan Rata-Rata	47
5.3	Korelasi Bilangan Tak Berdimensi Sherwood, Reynolds dan Schmidt	50
5.4	Efektivitas Kenaikan Koefisien Perpindahan Massa	52
6	KESIMPULAN	54
	DAFTAR REFERENSI	55
	Lampiran 1 : Data Penelitian	57
	Lampiran 2 : Gambar Kerja Apparatus Penelitian	61



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1. Proses Elektroplating pada Aplikasi Pelapisan Piala Oscar	6
Gambar 2-2. Skematik Proses Elektrokimia	7
Gambar 2-3. Deret Volta.....	8
Gambar 2-4. Jenis Karakteristik Aliran dalam Pipa.....	13
Gambar 2-5. Karakteristik Aliran Melewati Backward Facing Step	15
Gambar 2-6. Pergerakan Ion Perpindahan Massa Elektroplating	17
Gambar 3-1. Skematik Apparatus Penelitian	21
Gambar 3-2. Apparatus Penelitian	22
Gambar 3-3. Sel Elektrokimia (Elektroda) dengan Posisi Katoda dan Anoda	23
Gambar 3-4. Posisi Mini Elektroda terhadap Katoda; (kiri) Penempatan Backstep Sebelum Katoda, (kanan) Mini Elektroda yang Telah Disambungkan dengan Kabel.....	24
Gambar 3-5. Penampang Mini Elektroda terhadap Katoda	24
Gambar 3-6. Terminal Switch Selector.....	26
Gambar 3-7. Gambar CAD Kanal Aliran (tampak depan)	26
Gambar 3-8. Saluran Kanal Aliran	27
Gambar 3-9. Posisi Backstep pada Elektroda	28
Gambar 3-10. Flowmeter; (kiri) Tampilan Flowmeter, (kanan) Posisi Flowmeter terhadap Sistem	28
Gambar 3-11. Speaker; (kiri) Speaker yang Digunakan, (kanan) Posisi Speaker pada Sistem	29
Gambar 3-12. Tampilan Software Test Tone Generator untuk Kontrol Sumber Eksitasi Akustik Speaker.....	29
Gambar 3-13. Power Supply dengan Multimeter untuk Mencatat Pembacaan Arus Listrik	30
Gambar 3-14. Digital Multimeter.....	31
Gambar 3-15. Tampilan Akuisisi Data Penelitian dengan Software	31
Gambar 3-16. Pompa Sanyo PW H 136.....	32
Gambar 3-17. Voltage Regulator	33
Gambar 3-18. Grafik Kalibrasi Flowmeter	34
Gambar 5-1. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 551	45
Gambar 5-2. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 1513	46
Gambar 5-3. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 2100	46
Gambar 5-4. Pengaruh Reynolds terhadap Koefisien Perpindahan Massa Rata- Rata pada Variasi Frekuensi	48
Gambar 5-5. Pengaruh Reynolds terhadap Koefisien Perpindahan Massa Maksimum pada Variasi Frekuensi.....	49
Gambar 5-6. Pengaruh Strouhal terhadap Koefisien Perpindahan Massa Maksimum pada Variasi Frekuensi.....	50
Gambar 5-7. Plot $Sh/Sc^{0.33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 500 Hz.....	51
Gambar 5-8. Plot $Sh/Sc^{0.33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 1000 Hz.....	51

Gambar 5-9. Plot $Sh/Sc^{0.33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 2000 Hz..... 52



DAFTAR TABEL

Tabel 2-1. Physical Properties Tembaga.....	11
Tabel 2-2. Physical Properties CuSO ₄	12
Tabel 3-1. Jarak Aksial Mini Elektroda terhadap Backstep.....	25
Tabel 3-2. Propertis Larutan Elektrolit	33
Tabel 3-3. Hasil Kalibrasi Flow Rate dari Flowmeter	35
Tabel 4-1. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Reynolds	38
Tabel 4-2. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 55139	
Tabel 4-3. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 1513	
.....	40
Tabel 4-4. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 2100	
.....	41
Tabel 4-5. Nilai Koefisien Perpindahan Massa Konvektif Maksimal pada Variasi Reynolds dan Frekuensi	42
Tabel 4-6. Nilai Koefisien Perpindahan Massa Konvektif Rata-Rata pada Variasi Reynolds dan Frekuensi	42
Tabel 4-7. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Strouhal Tiap Variasi Parameter.....	42
Tabel 4-8. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood	43
Tabel 8-1. Data Penelitian Untuk 1 LPM	57
Tabel 8-2. Data Penelitian Untuk 2 LPM	58
Tabel 8-3. Data Penelitian Untuk 2,5 LPM	59

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri pada awal tahun 1800, menginspirasi peneliti dalam mengembangkan teknologi yang tepat guna. Luigi Brugnatelli, profesor dalam bidang kimia, menemukan suatu teknik pelapisan metal yang lebih lanjut proses ini dinamakan elektroplating atau *electrodeposition*. Proses elektroplating ini melibatkan suatu proses perpindahan massa antara dua elektroda (anoda dan katoda) dalam larutan elektrolit. Lebih lanjut, Luigi Brugnatelli telah melakukan banyak demonstrasi terhadap berbagai macam larutan elektrolit, hingga berhasil melakukan proses elektroplating emas ke objek perak (<http://electrochem.cwru.edu/encycl/>).

Elektroplating berkembang menjadi suatu studi *engineering* praktis yang ditandai dengan bermacamnya aplikasi yang dapat dilakukan dengan proses elektroplating ini. Di bidang industri manufaktur, elektroplating digunakan dengan banyak tujuan seperti meningkatkan nilai fungsi produk ataupun yang sifatnya dekoratif. Sebagai contoh industri yang menggunakan proses elektroplating adalah industri mobil. Proses elektroplating digunakan untuk melapisi bagian mobil yang terbuat dari baja dengan lapisan krom agar ketahanan terhadap korosi meningkat. Pada industri bola lampu, pelapisan nikel dan kuningan pada bagian aluminium bola lampu dapat menjadi nilai tambah estetika.

Dalam persaingan industri saat ini, dengan alasan ekonomi dan kemudahan, perlu dilakukan pengembangan metode proses produksi yang menitikberatkan pada upaya mendapatkan metode yang semakin efisien dan efektif namun dapat menghasilkan produk yang memenuhi standar mutu yang digunakan. Dalam industri proses elektroplating, beberapa teknik telah dikembangkan dan dipatenkan. Mayer dan Contolini (1999) mempatenkan teknik *electroplanarization with diffusion barriers and electropolishing*, untuk planarisasi suatu permukaan substrat yang memiliki bagian-bagian hilang yang dikelilingi oleh *region* yang rata dengan menggunakan material yang

konduktivitas ioniknya rendah seperti konsentrasi asam fosfor dan beberapa polimer. Chen (2001) menemukan teknik penodepositian secara kimia untuk melapisi permukaan bahan semi konduktor dengan bahan tembaga. Metode yang digunakan adalah peningkatan lapisan benih (*seed layer*) yang memberikan suatu hasil yang memungkinkan pelapisan tembaga secara uniform yang mampu mengisi struktur mikro. Selain itu, telah terdapat beberapa paten lain untuk proses elektroplating. Dari metode yang ada, masih sedikit yang memanfaatkan aspek dinamika fluida sebagai dasar upaya peningkatan unjuk kerja proses elektroplating.

Dalam studi ilmu *heat and mass transfer*, diketahui bahwa efek turbulensi aliran dapat mempengaruhi laju perpindahan kalor dan massa. Pada proses elektroplating ini, perpindahan massa antara dua elektroda dapat dipengaruhi dengan memberikan efek turbulensi pada larutan elektrolit. Sehingga, mekanisme kontrol terhadap intensitas turbulensi aliran antara dua elektroda menjadi suatu metode yang mungkin untuk meningkatkan laju perpindahan massa tersebut. Selain itu, dalam aplikasi industri, proses elektroplating melibatkan produk yang mempunyai bentuk geometris yang beragam dan kompleks. Oleh karena itu, studi turbulensi aliran elektrolit di sekitar elektroda menjadi faktor yang penting.

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan kontrol turbulensi aliran secara aktif yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali (*separated-reattached flow*) untuk meningkatkan laju perpindahan massa konvektif antara dua elektroda pelat sejajar dalam suatu kanal elektrolit. Kontrol aktif turbulensi dilakukan dengan mengintroduksi gelombang akustik yang dapat mempengaruhi intensitas turbulensi aliran. Sebagai kajian awal, untuk memperoleh pemahaman fundamental mengenai peningkatan laju perpindahan massa dengan kontrol turbulensi telah dilakukan oleh Harinaldi (2003) walaupun bukan pada aplikasi yang sama. Selain itu, kajian mengenai pemanfaatan kontrol pasif turbulensi juga telah dilakukan (Harinaldi, 2007).

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik laju perpindahan massa konvektif proses elektroplating pada kondisi elektrolit dengan kontrol aktif turbulensi aliran yang diberi eksitasi akustik pada berbagai parameter

frekuensi eksitasi dan bilangan Reynolds. Penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan nilai peningkatan koefisien laju perpindahan massa konvektif terhadap hasil penelitian sebelumnya dengan kontrol pasif turbulensi (Akrom, 2008). Selain itu, penelitian ini juga memberikan beberapa relasi bilangan tak berdimensi dari laju perpindahan massa.

1.3 Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini, pembatasan masalah meliputi :

- a. proses elektroplating yang terjadi menggunakan logam tembaga (Cu) sebagai elektroda dan larutan CuSO_4 sebagai elektrolit,
- b. penggunaan kontrol aktif dengan eksitasi akustik yang berasal dari sumber speaker,
- c. *voltage* yang diberikan sebesar 600 mV,
- d. pengambilan data dengan menggunakan variasi pada debit (*flow rate*) aliran sebesar 0,79 ltr/min, 2,19 ltr/min, 3,03 ltr/min,
- e. eksitasi akustik yang diintroduksi dengan variasi frekuensi sebesar 500 Hz, 1000 Hz, dan 2000 Hz pada intensitas suara 95 dB.

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental dengan rangkaian urutan kegiatan sebagai berikut :

- a. Formulasi masalah
- b. Model dan variabel penelitian
 - Model eksperimental
Sel elektrokimia plat sejajar dalam kanal aliran elektrolit CuSO_4
 - Variabel eksperimental
Kecepatan aliran utama larutan elektrolit ($Re = 550 - 2100$), dan frekuensi eksitasi akustik ($St = 9 - 150$)
- c. Teknik pengumpulan data
Pengukuran laju perpindahan massa dengan teknik *limiting diffusion current* berdasarkan arus listrik dari reaksi reduksi katoda :

$$\text{Cu}^{+2} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$$
- d. Teknik pengolahan data

Data diakuisisi dengan sistem terkomputerisasi dan kemudian diolah lanjut dengan menggunakan *software*.

- e. Analisa hasil dan interpretasi data
- Distribusi koefisien perpindahan massa pada rasio geometris sepanjang arah aksial aliran
 - Distribusi koefisien perpindahan massa pada berbagai bilangan tak berdimensi Reynolds dan bilangan tak berdimensi Strouhal sepanjang arah aliran
 - Korelasi perpindahan massa antara bilangan tak berdimensi Reynolds dengan bilangan tak berdimensi Strouhal
 - Korelasi empiris antara bilangan Sherwood, Reynolds, dan Schmidt

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dengan memperhatikan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang masalah, tujuan dilakukan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan konsep dasar elektroplating, perpindahan massa, karakteristik aliran turbulen dan aliran *separated – reattached flow*.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan urutan proses instalasi alat uji, persiapan penelitian, serta prosedur pengambilan data.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

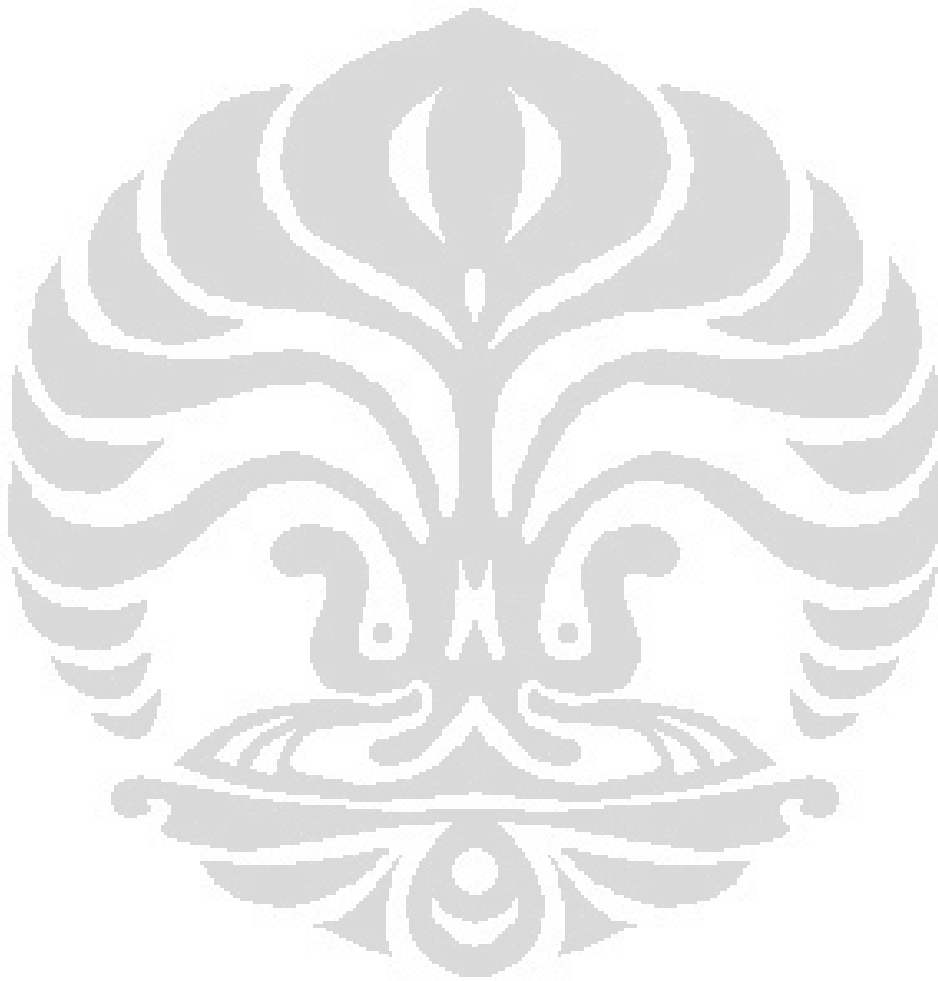
Di bab ini, penulis menjelaskan mengenai data hasil penelitian, perhitungan dan pengolahan dari data yang ditampilkan dengan bentuk tabel.

BAB 5 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Analisa dan pembahasan dari penelitian akan dipaparkan dalam bentuk grafik.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

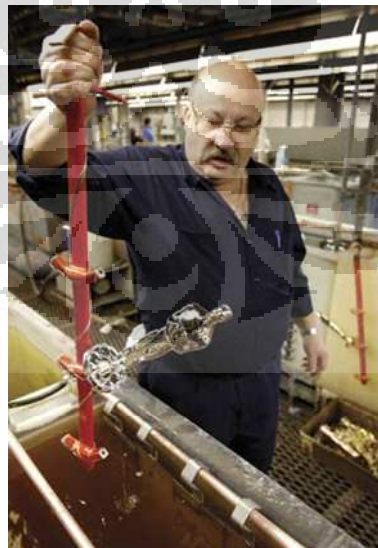
Berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran agar penelitian yang sejenis dan penelitian yang berkelanjutan dapat berjalan dengan lancar.



BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Elektroplating

Elektroplating adalah proses pelapisan logam dengan mengalirkan arus listrik pada proses elektrokimia. Elektroplating disebut juga dengan electrodeposisi karena tujuan dari elektroplating adalah mendapatkan endapan (deposit) lapisan logam pada substrat, bisa dalam bentuk logam ataupun tidak. Contohnya adalah pelapisan emas atau perak untuk perhiasan dan pelapisan krom pada beberapa bagian mobil. Elektroplating terjadi pada larutan yang disebut elektrolit. Elektrolit yang digunakan didesain dengan menggunakan larutan kimia yang mengandung logam yang ingin diendapkan yang dilarutkan dalam bentuk partikel logam submikroskopik. Benda yang ingin dilapisi, direndam dalam larutan elektrolit tersebut. Ketebalan lapisan pelapis tergantung dari lamanya proses elektroplating dilakukan.



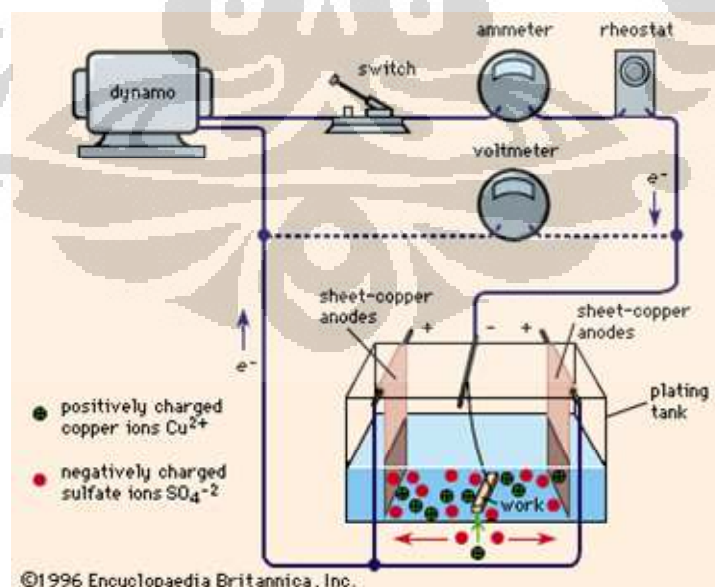
Gambar 2-1. Proses Elektroplating pada Aplikasi Pelapisan Piala Oscar

Sumber : www.britannica.com

2.2 Konsep Elektrokimia

Reaksi oksidasi-reduksi, atau redoks, melibatkan perubahan dalam keadaan oksidasi pereaksi-pereaksi. Dalam kebanyakan contoh sederhana terdapat kehilangan elektron yang sesungguhnya oleh satu pereaksi dan perolehan elektron padananya oleh pereaksi yang lain. Bila aliran elektron yang menyertai suatu reaksi membentuk aliran listrik, maka perubahan kimia itu disebut sebagai elektrokimia.

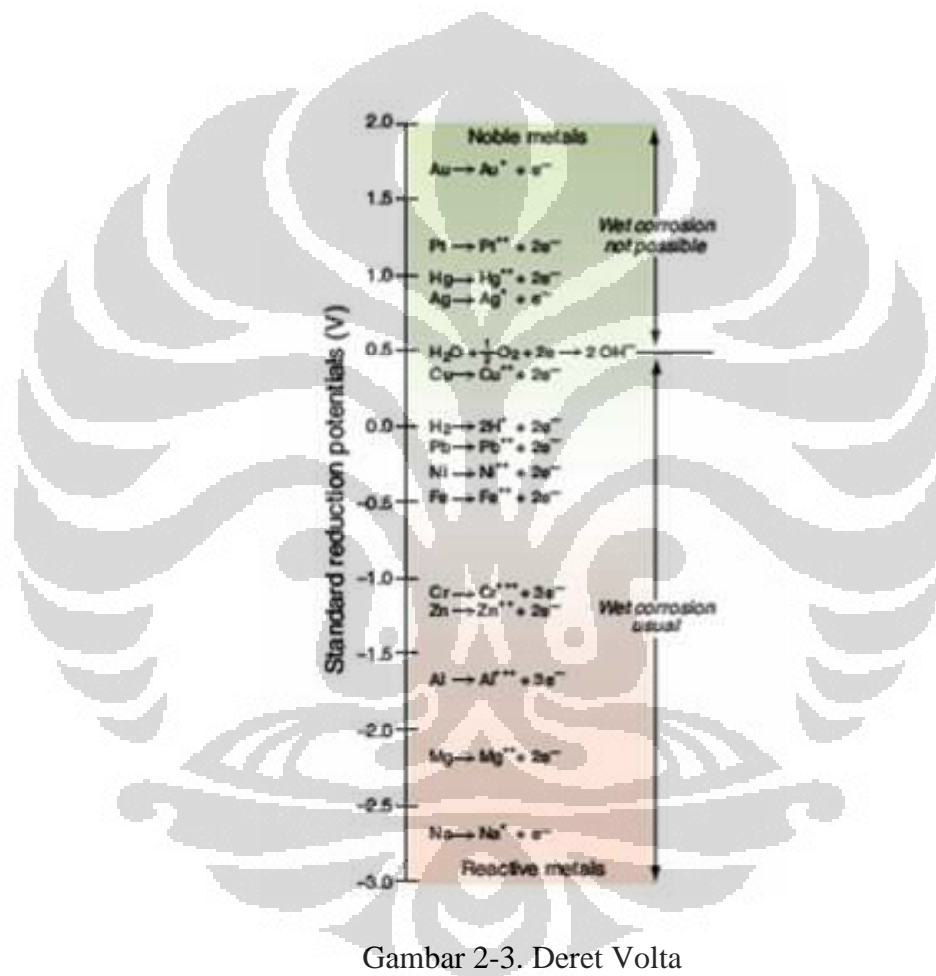
Reaksi elektrokimia selalu terjadi di permukaan elektroda. Elektroda ini terbagi menjadi elektroda yang bermuatan negatif disebut katoda dan elektroda yang bermuatan positif disebut anoda. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi sedangkan pada katoda terjadi reaksi reduksi. Jika sebuah baterai (DC) memberi tegangan yang berbeda pada kedua elektroda yang dicelupkan kedalam larutan elektrolit, ion positif dalam larutan akan bergerak menuju katoda yang bermuatan negatif untuk mengambil elektron. Sementara itu, ion negatif bergerak menuju anoda yang bermuatan positif dan melepas elektron. Selanjutnya elektron yang dilepaskan ini akan dialirkan ke katoda melalui baterai.



Gambar 2-2. Skematik Proses Elektrokimia

Sumber : www.britannica.com

Oksidasi atau reduksi berbagai elektroda dan larutan elektrolit dapat berlangsung pada potensial tegangan tertentu. Nilai tegangan yang digunakan pada proses elektrokimia ini disebut potensial sel. Potensial sel merupakan jumlah aljabar dari potensial oksidasi yang didapat dari pengurangan nilai potensial reduksi terhadap potensial oksidasi logam elektroda. Nilai ini kemudian dijabarkan ke dalam suatu deret keaktifan logam yang disebut deret Volta.



Gambar 2-3. Deret Volta

Sumber : Material – Engineering, Science, Processing and Design

2.2.1 Hukum Faraday

Salah satu penerapan elektrokimia adalah elektrolisis. Elektrolisis adalah hantaran listrik melalui larutan yang disertai suatu reaksi. Pada elektrolisis terjadi perubahan energi listrik menjadi energi kimia. Pada tahun 1831-1832, Michael

Faraday dari Inggris, menemukan hubungan kuantitatif antara massa zat yang dibebaskan pada elektrolisis dengan jumlah listrik yang digunakan. Penemuan itu disimpulkannya dalam dua hukum sebagai berikut.

Hukum 1 Faraday :

“Massa zat yang dibebaskan pada elektrolisis (m) berbanding lurus dengan jumlah listrik yang digunakan (Q).”

Kemudian dari hukum Faraday diatas diperoleh rumus :

$$m \approx Q \quad (2.1)$$

Jumlah muatan listrik (Q) sama dengan hasil kali dari kuat arus (I) dengan waktu (t).

$$Q = I.t \quad (2.2)$$

Jadi, persamaan di atas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$m = I.t \quad (2.3)$$

Hukum 2 Faraday :

“Massa zat yang dibebaskan pada elektrolisis (m) berbanding lurus dengan massa ekivalen zat itu (e).”

$$m \approx e \quad (2.4)$$

Penggabungan hukum Faraday I dan II menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$m = e.k.I.t \quad (2.5)$$

Faraday menemukan harga faktor pembanding $k = \frac{1}{96500}$. Jadi, persamaan di atas dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$m = \frac{e.I.t}{96.500} \quad (2.6)$$

Keterangan,

m = massa zat yang dibebaskan (gram)

e = massa ekivalen

I = kuat arus (A)

t = waktu (detik)

Massa ekuivalen dari unsur-unsur logam sama dengan massa atom relatif (A_r) dibagi dengan nilai pertukaran elektron (z).

$$e = \frac{A_r}{z} \text{ atau, } e = \frac{M_r}{z} \quad (2.7)$$

Nilai persamaan (2.7) dimasukkan ke persamaan (2.6), sehingga didapat persamaan.

$$m = \frac{M_r \cdot I \cdot t \cdot}{z \cdot F} \quad (2.8)$$

Hubungan antara densitas (ρ), berat molekul (M_r) dan konsentrasi larutan adalah :

$$\rho = C \cdot M_r \quad (2.9)$$

Nilai densitas merupakan rasio perbandingan dari massa (m) terhadap volume (V). Volume didapat dari perkalian luas permukaan terhampar (A) dengan faktor panjang. Dari proses substitusi persamaan di atas didapat persamaan akhir untuk laju perpindahan massa pada proses elektrolisis, yaitu :

$$\frac{s}{t} = K_m = \frac{I}{zFAC} \quad (2.10)$$

Keterangan,

K_m = koefisien perpindahan massa (m/s)

s = faktor panjang

I = kuat arus (mA)

z = pertukaran elektron

F = bilangan Faraday

A = luas permukaan terhampar (m^2)

C = konsentrasi borongan elektrolit (mol/m^3)

2.2.2 Propertis Tembaga

Tembaga adalah unsur kimia yang termasuk ke dalam kelompok logam transisi. Tembaga memiliki sifat umum yang liat dan kuat. Tembaga memiliki ketahanan korosi pada berbagai jenis fluida, termasuk air laut sehingga banyak digunakan pada aplikasi maritim. Selain itu, tembaga juga memiliki ketahanan korosi pada larutan elektrolit, asam organik, dan mineral non-okside sehingga banyak digunakan sebagai logam penyokong pada lingkungan industri. Kombinasi dari *physical properties* yang kuat, konduktivitas thermal tinggi, konduktivitas listrik tinggi, non-magnetik, ketahanan korosi, mudah dalam pemrosesan dan liat, menjadikan tembaga banyak digunakan pada berbagai aplikasi, seperti kabel listrik, transmisi sumber listrik, per, pemipaan, *heat exchanger*, elektroda, busi, peralatan masak, pipa refrigerasi, *gasket* dan *fastener* (<http://www.azom.com>).

Logam tembaga sering digunakan untuk elektroplating karena mudah didapat dan harganya relatif murah. Tembaga sering dijadikan lapisan dasar dalam pelapisan sebelum dilapisi oleh logam lain. Karena memiliki daya hantar listrik yang baik maka tembaga sering digunakan untuk pelapisan yang menginginkan sifat konduktor pada logam.

Tabel 2-1. Physical Properties Tembaga

Simbol	Cu
Nomor atom	29
Berat atom	63,546 g/mol
Densitas	8960 kg/m ³
Tampilan	Logam merah kecoklatan 


2.2.3 Larutan Elektrolit CuSO₄

Larutan elektrolit adalah larutan yang memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik. Daya hantar listrik pada larutan elektrolit ini bergantung

pada jenis dan konsentrasinya. Larutan yang memiliki daya hantar listrik yang baik walaupun konsentrasinya kecil disebut dengan elektrolit kuat.

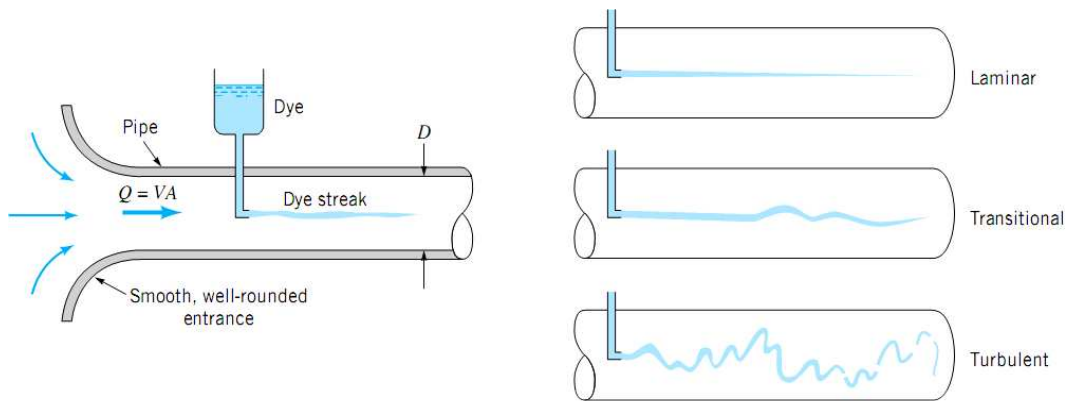
Svante August Arrhenius (1859-1927) menjelaskan bahwa larutan elektrolit mengandung ion yang bergerak bebas. Ion inilah yang menghantar arus listrik melalui larutan. Larutan elektrolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah CuSO_4 atau dikenal juga dengan nama *blue vitriol* atau *bluestone*. CuSO_4 atau Copper (II) sulfate memiliki dua jenis campuran yaitu $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (pentahydrate) dan CuSO_4 (anhydrous). Perbedaan yang terdapat pada dua campuran ini adalah pada jenis pentahydrate masih terdapat molekul air, sedangkan pada jenis anhydrous merupakan copper (II) sulfate murni yang tidak mengandung molekul air. Untuk penelitian ini, CuSO_4 yang digunakan adalah jenis pentahydrate.

Tabel 2-2. Physical Properties CuSO_4

Tampilan	<p style="text-align: center;">Kristal biru</p> 
Nama IUPAC	Copper (II) sulfate pentahydrate
Berat molekul	249,7 g/mol

2.3 Aliran Fluida dalam Pipa

Aliran fluida dalam sebuah pipa bisa berbentuk aliran laminar, transisi atau aliran turbulen. Osborne Reynolds (1842-1912) yang pertama kali membedakan aliran ini menggunakan peralatan sederhana berupa aliran air yang melalui sebuah pipa yang diamati dengan menginjeksikan zat berwarna yang mengambang.



Gambar 2-4. Jenis Karakteristik Aliran dalam Pipa

Sumber : Mekanika Fluida edisi terjemahan

Percobaan ini dilakukan dalam variasi kecepatan aliran yang berbeda untuk diameter pipa yang sama. Pada kecepatan rendah, zat berwarna yang diinjeksikan masih terlihat sebagai garis arus yang mengalir. Untuk kecepatan aliran sedang, zat berwarna ini mulai berfluktuasi. Pada penambah kecepatan aliran yang lebih cepat, zat berwarna ini berfluktuatif dengan sangat cepat dan memiliki pola yang acak. Perbedaan jenis karakteristik aliran pipa ini dijelaskan dengan bilangan tak berdimensi Reynolds. Dalam mekanika fluida, bilangan Reynold merupakan perbandingan dari gaya inersia ($V \cdot \rho$) dengan gaya viskos (μ/d). Kedua gaya tersebut penting untuk mengukur karakteristik kondisi aliran yang diberikan. Maka bilangan Reynold digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran, seperti aliran laminar atau aliran turbulen. Bilangan Reynold dinyatakan dengan

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (2.11)$$

Keterangan;

V = kecepatan fluida (m/s),

d = diameter karakteristik pipa (m),

μ = viskositas dinamik fluida (kg/ms),

ν = viskositas kinematik fluida (m^2/s),

ρ = densitas fluida (kg/m^3).

Kecepatan aliran fluida diukur dengan menggunakan tabung pitot dan manometer. Pada kondisi yang sama, kecepatan fluida dapat dihitung dengan

faktor debit aliran (Q) dan luas penampang pipa (A). Berikut persamaan yang digunakan.

$$Q = V \cdot A \quad (2.12)$$

Keterangan;

Q = debit aliran (m^3/s)

V = kecepatan aliran (m/s)

A = luas permukaan (m^2)

Ada kalanya, saluran yang dibuat untuk memindahkan fluida berpenampang tidak bundar. Maka diperlukan suatu panjang karakteristik yang mendefinisikan ukuran sebuah penampang dari bentuk yang ditentukan. Untuk menentukan diameter tersebut maka digunakan diameter hidrolis yang didefinisikan sebagai :

$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (2.13)$$

Keterangan;

d_h = diameter hidrolis (m)

A = luas permukaan pipa (m^2)

P = parameter atau keliling pipa (m)

Batasan bilangan Reynolds yang umum digunakan adalah nilai bilangan Reynolds kurang dari 2100 merupakan aliran laminar dan nilai bilangan Reynolds lebih dari 4000 merupakan aliran turbulen. Untuk bilangan Reynolds diantara bilangan tersebut merupakan aliran transisi.

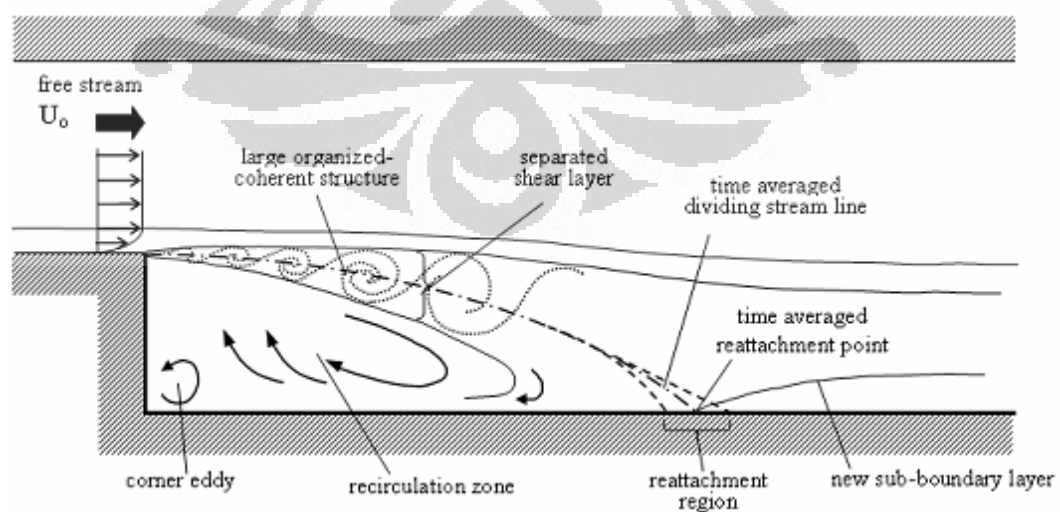
Karakteristik aliran dapat diganggu oleh gangguan luar yang diberikan kepada sistem. Sebagaimana diketahui pada percobaan Osborne Reynolds, pada aliran yang tenang, apabila diberikan gangguan aliran yang lebih cepat dapat mengganggu aliran sehingga terbentuk turbulensi aliran. Pada contoh lainnya, gangguan pada geometris aliran juga dapat mengakibatkan aliran mengalami turbulensi. Kundu dan Cohen (1990) telah melakukan penelitian terhadap aliran dengan memberikan gangguan pada dinding laluan. Gangguan berupa pagar pada dinding (*fence*) dan kontur tangga (*backstep*) mempengaruhi karakteristik aliran di dinding tersebut dan sering mengalami separasi dan pertautan kembali. Pada

penelitian lainnya, Yang dan Huang (1998) memberikan gangguan jet tambahan pada aliran *backstep* untuk mempengaruhi intensitas turbulensi aliran. Lebih lanjut, penelitian menggunakan frekuensi akustik telah dilakukan oleh Bhattacharjee, Scheelke, dan Troutt (1986). Untuk menjelaskan pengaruh frekuensi akustik, digunakan bilangan tak berdimensi Strouhal. Bilangan Strouhal menjelaskan mekanisme osilasi dari aliran. Dalam penelitian ini, Bilangan tak berdimensi Strouhal (St) merupakan rasio tak berdimensi dari frekuensi eksitasi (Hz) dan panjang karakteristik yang diwakili oleh ketinggian *backstep* (m) dengan kecepatan aliran (m/s), dengan persamaan.

$$St = \frac{f \cdot h}{V} \quad (2.14)$$

2.4 Aliran Fluida pada Backstep

Aliran fluida pada *backstep* merupakan internal flow melewati *sudden expansion* ataupun pembesaran mendadak. Aliran fluida melewati penampang fisik seperti ini akan sedikit berbeda dengan aliran fluida melewati permukaan dari pipa ataupun *ducting* yang rata. Pada aliran melewati *backstep* ini akan ditemukan fenomena-fenomena mekanika fluida yang tidak terdapat pada aliran melewati pipa ataupun *ducting* yang biasa.



Gambar 2-5. Karakteristik Aliran Melewati Backward Facing Step

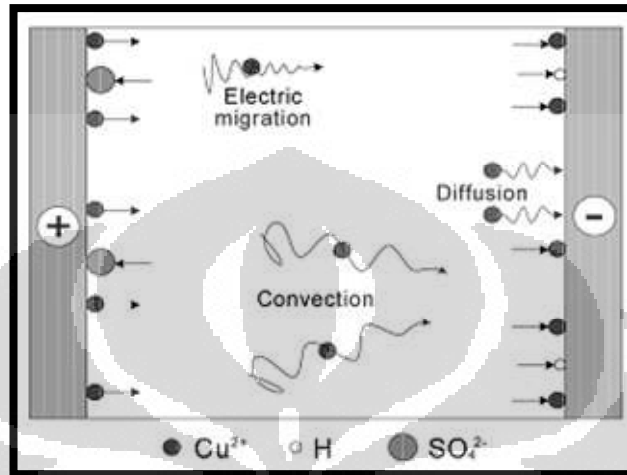
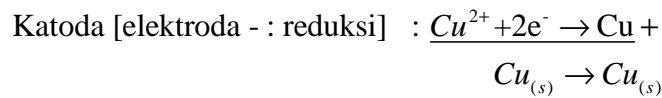
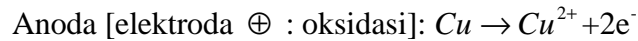
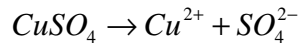
Pada aliran melewati *backstep* akan terbentuk separasi yang merupakan fenomena terlepasnya fluida dari lapisan dinding penampang yang dilewati, hal ini bisa terjadi pada aliran fluida melewati benda *nonstreamline* ataupun aliran fluida dengan bilangan Reynolds yang cukup tinggi. Lalu akan terbentuk juga daerah resirkulasi atau daerah tempat terjadinya aliran yang berputar, hal ini terjadi akibat adanya separasi. Lalu yang terakhir akan terbentuk *reattachment point* yang merupakan titik yang memisahkan antara daerah akibat adanya *backstep* atau *sudden expansion* dengan daerah yang terjadi pada aliran melewati pipa atau *ducting* biasa. Atau bisa juga disebut daerah dimana efek *sudden expansion* sudah tidak berpengaruh dan karakteristik aliran mulai mengikuti karakteristik dari penampang pipa atau *ducting*.

2.5 Perpindahan Massa

Perpindahan massa merupakan proses perpindahan molekular yang karena adanya perbedaan konsentrasi pada suatu campuran dari dua komponen yang berbeda. Konsep terjadinya perpindahan massa adalah dimana terdapat perbedaan konsentrasi yang mengakibatkan munculnya suatu konsentrasi yang seragam. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, molekul yang terdapat pada fluida tersebut berjumlah lebih banyak. Sehingga, dengan adanya perbedaan konsentrasi maka molekul yang berasal dari konsentrasi yang lebih tinggi akan berpindah mengisi molekul-molekul yang terdapat pada konsentrasi yang lebih rendah sehingga muncul konsentrasi yang seragam.

Pada proses elektroplating, perpindahan massa telah dijelaskan oleh Bum-Jin Chung, et.al (2006). Pada proses elektrokimia, perpindahan massa ion terjadi dengan beberapa mekanisme. Pertama, perpindahan ion elektrik karena beda tegangan. Kedua, difusi ion karena perbedaan densitas. Ketiga, gerakan konveksi dari larutan. Ketika beda potensial diberikan kepada elektroda tembaga yang terendam dalam larutan elektrolit tembaga sulfat, elektron dari katoda berpindah ke arus positif sehingga ion positif tembaga (Cu^{2+}) terlepas dari larutan sebagai atom tembaga. Atom tembaga ini kemudian berpindah ke permukaan katoda (melapisi permukaan). Ion sulfat SO_4^{2-} dibebaskan oleh anoda, sehingga arus listrik secara penuh mengalir. Ion sulfat ini membentuk CuSO_4 kembali.

Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada proses di atas.



Gambar 2-6. Pergerakan Ion Perpindahan Massa Elektrolating

Sumber : Bum-Jin Chung, dkk (2006)

Karakteristik aliran turbulen adalah aliran yang acak dan tidak beraturan. Karena karakteristiknya maka aliran turbulen memiliki kelebihan dalam proses pencampuran dan proses perpindahan kalor dan massa. Hal ini disebabkan oleh adanya keacakan mikroskopik dalam aliran turbulen. Pencampuran acak ukuran tertentu sangat efektif dalam menghantarkan energi dan massa ke seluruh medan aliran, sehingga meningkatkan berbagai laju proses yang terlibat.

Untuk membuktikan adanya perpindahan massa pada aliran turbulen, *separated-reattached flow*, Krall dan Sparrow (1966) lalu dilanjutkan oleh Runchall, A.K. (1971) melakukan penelitian pada sudden expansion volume. Peneliti mendapatkan laju perpindahan massa tertentu pada bilangan Schimdt dan Reynolds tinggi di daerah separasi bertaut kembali di bagian hilir aliran. Choikhi , Patrick dan Wragg (1987), telah mengkaji laju perpindahan massa lokal pada dinding dari aliran pipa di hilir suatu nozzle yang sangat menyempit pada berbagai bilangan Schimdt. Penelitian tersebut juga menyarankan penempatan pencetus turbulen yang efektif dapat meningkatkan laju perpindahan massa.

Untuk melakukan analisa dari perpindahan massa digunakan berbagai bilangan tak berdimensi yang berkorelasi dengan variabel-variabel pada perpindahan massa. Ada tiga bilangan tak berdimensi yang umum digunakan yaitu bilangan Reynolds, bilangan Schmidt dan bilangan Sherwood.

Bilangan Schmidt merupakan bilangan tak berdimensi yang rasio dari momentum terhadap diffusivitas massa. Bilangan Schmidt merupakan pengukuran dari efektivitas momentum dan perpindahan massa dengan difusi dalam kecepatan dan lapisan batas konsentrasi. Persamaan bilangan tak berdimensi Schmidt adalah.

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho \cdot D} \quad (2.15)$$

Keterangan;

Sc = Bilangan tak berdimensi Schmidt

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

D = diffusivitas massa (ion) (m^2/s)

μ = viskositas dinamik (kg/ms)

ρ = densitas (kg/m^3)

Bilangan tak berdimensi Sherwood (Sh) merupakan bilangan yang menyatakan gradien konsentrasi pada permukaan yang dapat digunakan untuk menghitung konveksi perpindahan massa.

$$Sh = \frac{K_m d}{D} \quad (2.16)$$

Keterangan;

K_m = koefisien perpindahan massa (m/s)

d = diameter jet (m)

D = diffusivitas massa (ion) (m^2/s)

Korelasi antara ketiga bilangan tak berdimensi tersebut dinyatakan sebagai berikut

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^c \quad (2.17)$$

Nilai a, b dan c adalah konstanta yang muncul dari pengolahan data eksperimen.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Aktivitas Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental dengan rangkaian kegiatan yang dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Rangkaian kegiatan secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut :

a. Formulasi masalah

Merupakan kegiatan yang mencakup studi literatur yang terkait dengan subjek penelitian. Studi literatur dilakukan terhadap buku ajar dan jurnal penelitian yang mendukung untuk uraian dinamika turbulensi aliran *separated-reattached flow* pada *backstep* kaitannya dengan perpindahan massa serta metode kontrol aktif menggunakan eksitasi akustik.

b. Kegiatan *set-up* apparatus

- Memodifikasi kanal aliran tertutup dengan pemasangan pencetus turbulensi berupa kontur tangga (*backstep*) sehingga terjadi *wall recess/ sudden expansion* pada laluan hulu. Kontur tangga diletakkan pada katoda yang dipasang vertikal. Pada kontur tangga ditemplei speaker sebagai sumber eksitasi akustik. Proses pemberian eksitasi akustik dikontrol dengan *software* terkomputerisasi. Untuk sistem aliran, dilengkapi dengan pengontrol laju aliran berupa flowmeter.
- Mempersiapkan sistem pemipaan agar larutan elektrolit berada dalam sistem tertutup.
- Mempersiapkan sumber tenaga listrik yang berasal dari tegangan AC yang diubah menjadi DC oleh *power supply* dalam *range* tegangan yang diinginkan (600 mV).
- Mempersiapkan sistem sensor arus berupa kabel yang disisipkan pada katoda dengan kondisi terinsulasi dengan katoda. Subsystem

ini dilengkapi dengan kontroler (*switch selector*) yang dihubungkan dengan sumber arus.

- Mempersiapkan larutan elektrolit CuSO_4 dengan mempertimbangkan konsentrasinya untuk mendapatkan sifat-sifat fisika yang memungkinkan eksperimen berlangsung dengan baik (densitas dan viskositas yang memudahkan pengontrolan aliran serta diffusivitas ion yang memadai untuk pengukuran arus listrik).

c. Pengambilan data

- Mengukur laju perpindahan massa dengan teknik *limiting diffusion current* seperti yang telah dilakukan oleh Chouikhi, et.al (1987) dan Oduoza, et.al (1997) berdasarkan arus listrik dari reaksi reduksi katoda ($\text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$). Pengukuran dilakukan dengan sistem akuisisi data yang terkomputerisasi, tersusun atas subsistem *digital multimeter* dan *personal computer*.
- Pengukuran dilakukan dengan berbagai variasi bilangan Reynolds aliran hulu kontur tangga larutan elektrolit (Reynolds, $\text{Re} = 550 - 2100$) dan frekuensi eksitasi akustik (Strouhal, $\text{St} = 9 - 150$) pada intensitas bunyi 95 dB.

d. Pengolahan data

Data di akuisisi dengan sistem terkomputerisasi dan kemudian diolah lanjut dengan menggunakan *software*.

e. Analisis dan interpretasi data

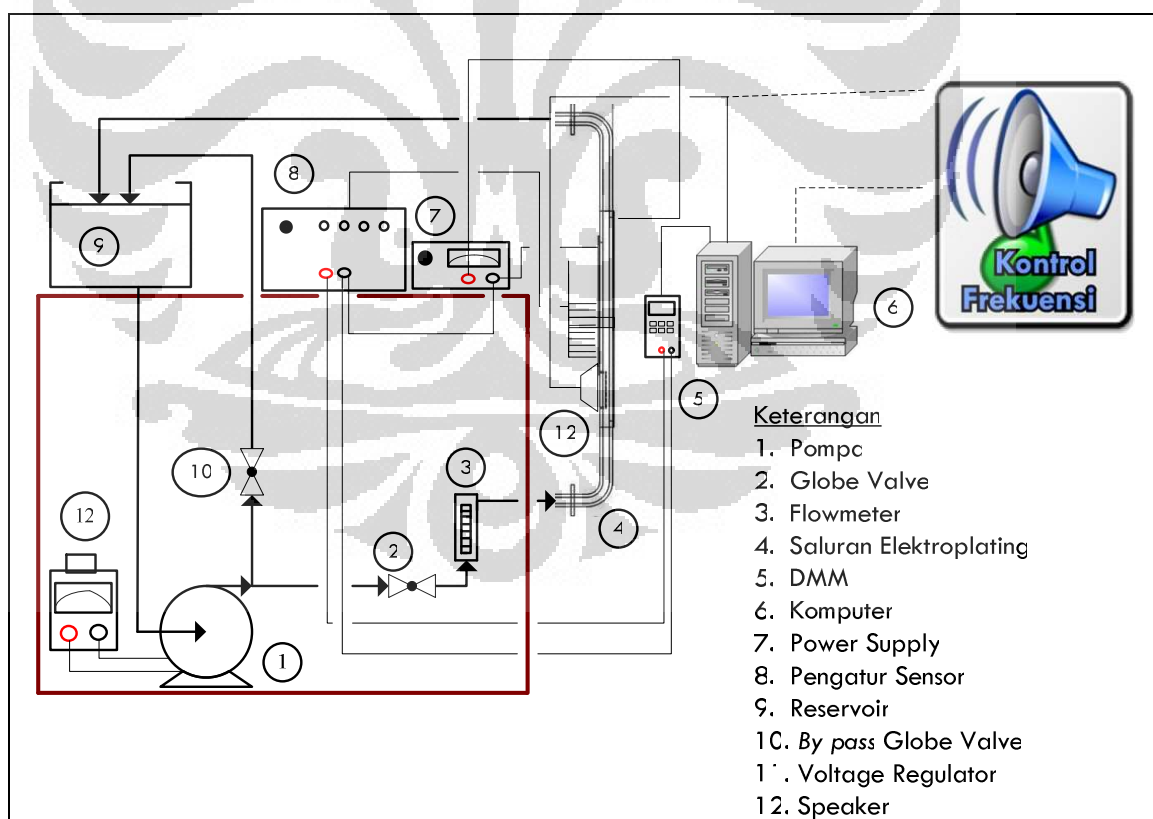
Data yang diperoleh lalu diproses dan diplot ke dalam grafik yang dapat memberikan informasi – informasi mengenai, a.l :

- Persebaran koefisien perpindahan massa berdasarkan jarak aksial terhadap *backstep*
- Distribusi koefisien perpindahan massa pada berbagai bilangan Reynolds sepanjang arah aliran
- Korelasi perpindahan massa antara bilangan tak berdimensi Reynolds dengan bilangan tak berdimensi Strouhal
- Korelasi empiris antara bilangan Sherwood, Reynolds, dan Schimdt

Hasil – hasil berupa grafik dan korelasi yang diperoleh dibandingkan dengan hasil - hasil dari penelitian tanpa kontrol aktif yang telah dilakukan peneliti – peneliti sebelumnya untuk membandingkan hasil yang diperoleh.

3.2 Apparatus Penelitian

Penelitian dilakukan dalam suatu sistem aliran elektrolit rangkaian tertutup seperti yang ditunjukkan secara skematik pada gambar 3-1. Alat yang digunakan dalam penelitian ini merupakan alat baru yang dimodifikasi dari alat penelitian sebelumnya untuk penelitian yang sama dengan pencetus aliran turbulen berupa *backstep/ sudden expansion volume*. Modifikasi yang dilakukan dengan menambahkan rongga yang digunakan untuk meletakkan speaker sebagai sumber eksitasi akustik.



Gambar 3-1. Skematik Apparatus Penelitian

Sistem aliran dirancang sehingga memungkinkan larutan elektrolit mengalir melewati kanal vertikal dari akrilik dengan sepasang pelat tembaga sejajar yang berfungsi sebagai elektroda. Cara kerja alat ini adalah dengan mengalirkan larutan elektrolit yang berasal dari *reservoir* menggunakan pompa melalui sistem pemipaan yang dilengkapi dengan katup pengendali, katup *by pass* dan flowmeter. Pada katoda terdapat 38 titik mini elektroda yang akan disambungkan ke terminal untuk kemudian dilanjutkan ke *digital multimeter* sebagai data akuisisi terkomputerisasi. Sumber eksitasi akustik diberikan pada bagian luar pencetus turbulen/ kontur tangga (*backstep*) dengan dikontrol oleh *software* terkomputerisasi.

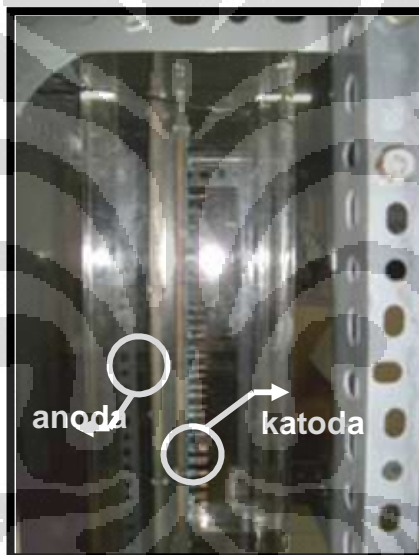


Gambar 3-2. Apparatus Penelitian

Pada alat ini terdapat beberapa komponen yang bekerja sebagai sistem sehingga alat ini dapat bekerja dengan baik.

3.2.1 Sel elektrokimia (elektroda)

Sel elektrokimia untuk proses elektroplating ini terdiri dari dua elektroda, yaitu anoda dan katoda. Elektroda yang digunakan adalah logam tembaga dengan dimensi panjang 390 mm dan lebar 40 mm dan 410 mm x 40 mm. Elektroda ini terletak di belakang kontur tangga (*backstep*). Kedua elektroda ini dipasang sejajar secara vertikal pada kanal aliran dengan jarak pemisah 10 mm. Susunan elektroda dapat dilihat dari gambar 3-3, katoda terletak di sebelah kanan, sedangkan anoda terletak di sebelah kiri. Kedua elektroda ini ditempel dengan silikon dan dibaut untuk menghindari kebocoran.



Gambar 3-3. Sel Elektrokimia (Elektroda) dengan Posisi Katoda dan Anoda

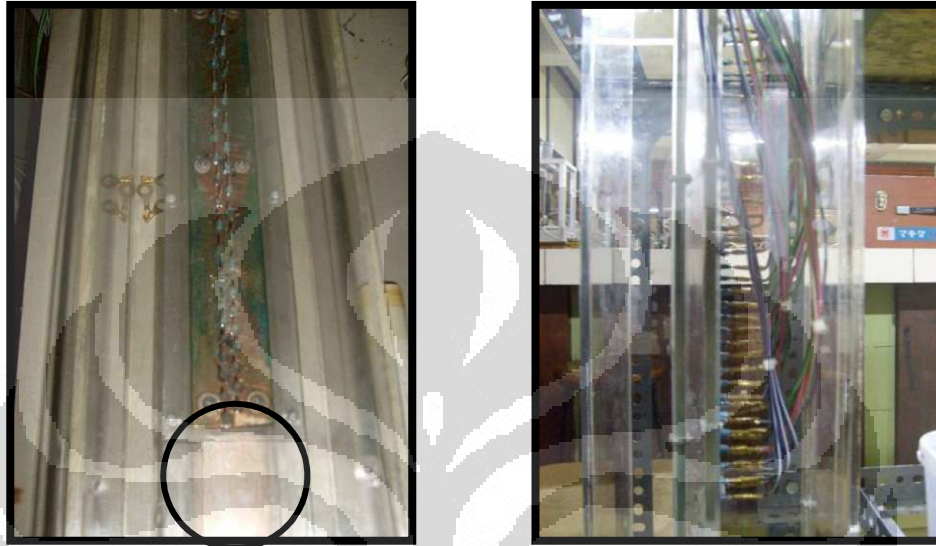
a. Katoda dan anoda

Katoda dan anoda berfungsi sebagai elektroda yang menghantarkan arus listrik dari *power supply* agar larutan elektrolit mampu menghantarkan ion.

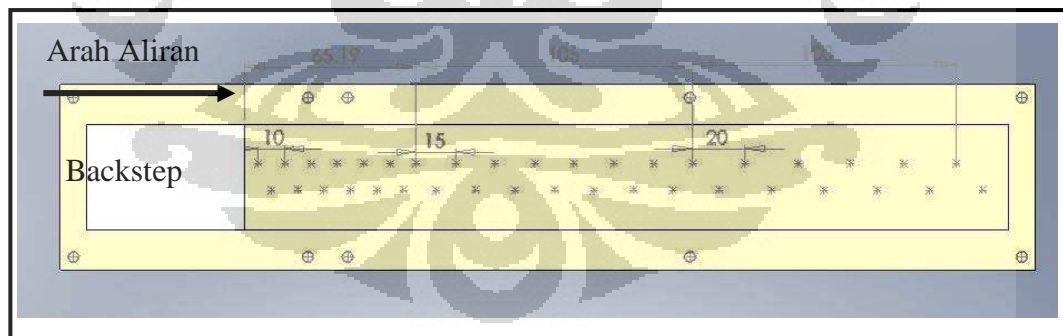
b. Sensor tembaga (mini elektroda)

Pada katoda, terdapat 38 titik mini elektroda yang terbuat dari kabel tembaga dengan diameter 1,5 mm² yang mempunyai permukaan rata dengan pelat katoda. Mini elektroda ini diinsulasi dan dilekatkan dengan epoxy agar tidak terhubung dengan katoda. Mini elektroda disusun secara

aksial dalam dua kolom di sumbu tengah pelat katoda seperti terlihat pada gambar 3-4. Jarak aksial mini elektroda terhadap *backstep* ditunjukkan oleh tabel 3-1.



Gambar 3-4. Posisi Mini Elektroda terhadap Katoda; (kiri) Penempatan Backstep Sebelum Katoda, (kanan) Mini Elektroda yang Telah Disambungkan dengan Kabel



Gambar 3-5. Penampang Mini Elektroda terhadap Katoda

Tabel 3-1. Jarak Aksial Mini Elektroda terhadap Backstep

Titik	Jarak Aksial X [mm]	Rasio, x/h (h = ketinggian <i>backstep</i>)	Titik	Jarak Aksial X [mm]	Rasio, x/h (h = ketinggian <i>backstep</i>)
1	5	1	20	117.5	23.5
2	10	2	21	125	25
3	15	3	22	132.5	26.5
4	20	4	23	140	28
5	25	5	24	147.5	29.5
6	30	6	25	155	31
7	35	7	26	162.5	32.5
8	40	8	27	170	34
9	45	9	28	180	36
10	50	10	29	190	38
11	55	11	30	200	40
12	60	12	31	210	42
13	65	13	32	220	44
14	72.5	14.5	33	230	46
15	80	16	34	240	48
16	87.5	17.5	35	250	50
17	95	19	36	260	52
18	102.5	20.5	37	270	54
19	110	22	38	280	56

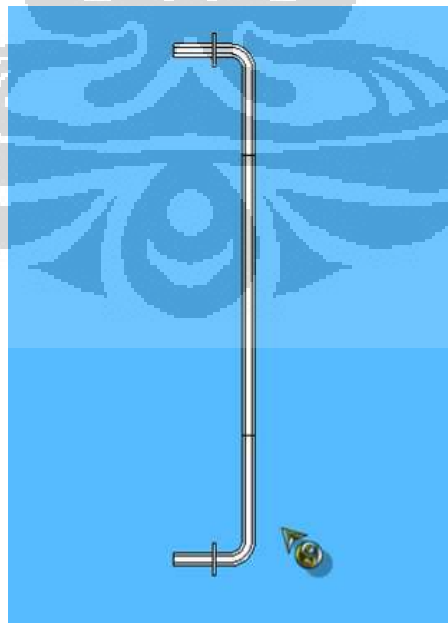
Mini elektroda disambungkan ke terminal pemilih (*switch selector*) dengan kabel yang menghubungkan mini elektroda dengan *power supply* seperti terlihat pada gambar 3-6. Sistem akuisisi data dari pengukuran arus lokal pada mini elektroda tersusun atas sebuah multimeter digital presisi tinggi yang dihubungkan melalui koneksi USB ke komputer dan dikendalikan dengan *software*. Pada setiap mini elektroda, diukur 400 buah data arus lokal dan diakuisisi untuk memastikan jumlah data memadai bagi perata-rataan statistik dalam kondisi aliran dan arus listrik yang fluktuatif.



Gambar 3-6. Terminal Switch Selector

3.2.2 Kanal aliran

Kanal aliran terbuat dari bahan akrilik dengan fungsi kanal sebagai tempat saluran yang mengalirkan larutan elektrolit dan sebagai stuktur bangun utama yang menyokong elektroda. Kanal dibuat dengan posisi vertikal sepanjang 720 mm agar kondisi kanal bagian dalam dibanjiri oleh larutan elektrolit secara keseluruhan (pemilihan posisi horizontal memungkinkan terdapatnya gelembung udara yang terjebak).



Gambar 3-7. Gambar CAD Kanal Aliran (tampak depan)

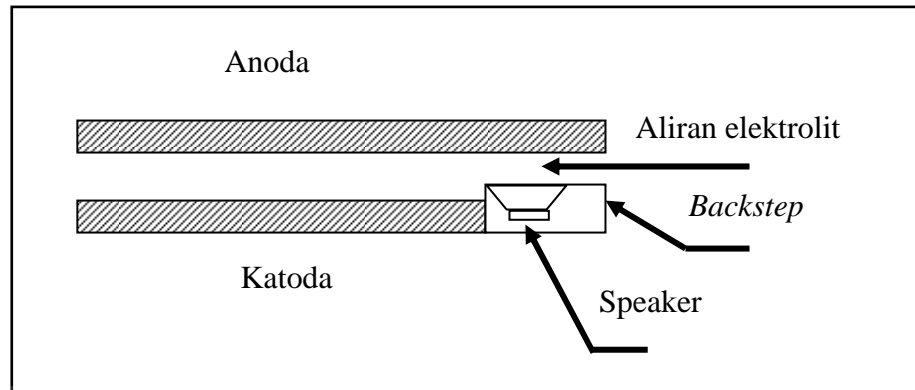


Gambar 3-8. Saluran Kanal Aliran

Awalnya larutan elektrolit melewati pipa horizontal sepanjang 300 mm dan kemudian masuk ke kanal saluran yang mempunyai dimensi dalam 40 mm x 10 mm. Kemudian kanal dibelokkan dengan flange 90⁰ dengan radius luar (bagian dalam) 35 mm dan panjang saluran kanal saluran setelah *flange* 160 mm. Kondisi ini untuk menciptakan profil kecepatan aliran yang kembali tetap.

Pada bagian tengah, terdapat pelat akrilik yang lebih tinggi dari dasar kanal. Daerah ini dijadikan sebagai kontur tangga (*backstep*) untuk pencetus efek turbulen larutan elektrolit. Pada bagian luar kontur tangga, merupakan tempat sumber eksitasi akustik dari speaker. Kontur tangga ini mempunyai dimensi panjang 60 mm, lebar 40 mm, dan tinggi 5 mm sehingga luas permukaan kanal yang dilewati larutan elektrolit tinggal 40 mm x 5 mm. Susunan pelat tembaga dengan dinding samping yang terbuat dari akrilik membentuk kanal aliran segiempat dengan penampang dalam berukuran 40 mm x 10 mm.

Pada bagian akhir kanal saluran kembali terdapat *flange* 90⁰ untuk merubah orientasi aliran menjadi horizontal.



Gambar 3-9. Posisi Backstep pada Elektroda

3.2.3 Flowmeter

Flowmeter digunakan sebagai alat ukur debit aliran (*flow rate*) yang akan masuk ke kanal. Flowmeter yang digunakan merupakan flowmeter yang biasa digunakan untuk fluida yang memiliki nilai *specific gravity* 1 (air). Untuk penyesuaian, dilakukan terlebih dahulu kalibrasi flowmeter yang akan digunakan untuk larutan elektrolit. Flowmeter ini mempunyai *range* ukur dari 0,8 ltr/ min sampai 7,6 ltr/min.

Posisi flowmeter berada di antara sisi *discharge* pompa dengan kanal aliran yang terlebih dahulu diatur debit aliran dengan katup.



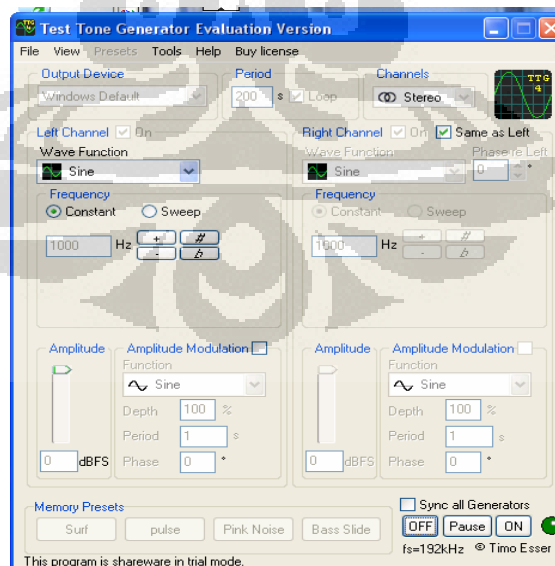
Gambar 3-10. Flowmeter; (kiri) Tampilan Flowmeter, (kanan) Posisi Flowmeter terhadap Sistem

3.2.4 Speaker

Speaker berfungsi sebagai sumber eksitasi akustik. Speaker yang berdiameter 30 mm ini mengambil input dari komputer yang dikontrol oleh *software* Test Tone Generator. Speaker diposisikan di rongga bagian luar *backstep* secara radial terhadap arah aliran.



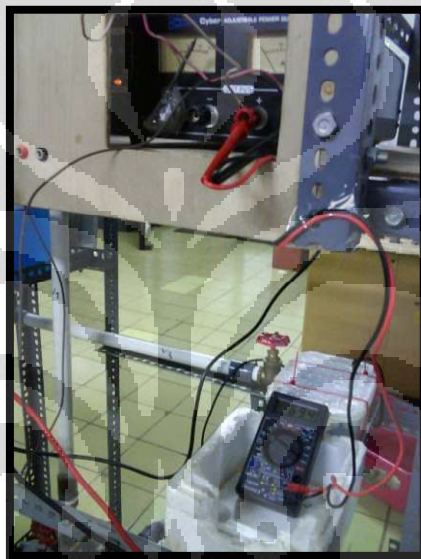
Gambar 3-11. Speaker; (kiri) Speaker yang Digunakan, (kanan) Posisi Speaker pada Sistem



Gambar 3-12. Tampilan Software Test Tone Generator untuk Kontrol Sumber Eksitasi Akustik Speaker

3.2.5 Power supply DC

Untuk mengalirkan arus listrik ke elektroda dibutuhkan *power supply* yang mampu mengalirkan arus listrik DC sesuai dengan kebutuhan yaitu 600 mV. *Power supply* yang digunakan memiliki keluaran tegangan hingga 30 V dan arus 2 A. Untuk mengetahui nilai tegangan dari *power supply* serta berfungsi sebagai kontrol manual digunakan multimeter untuk mengecek nilai tegangan setiap beberapa waktu.



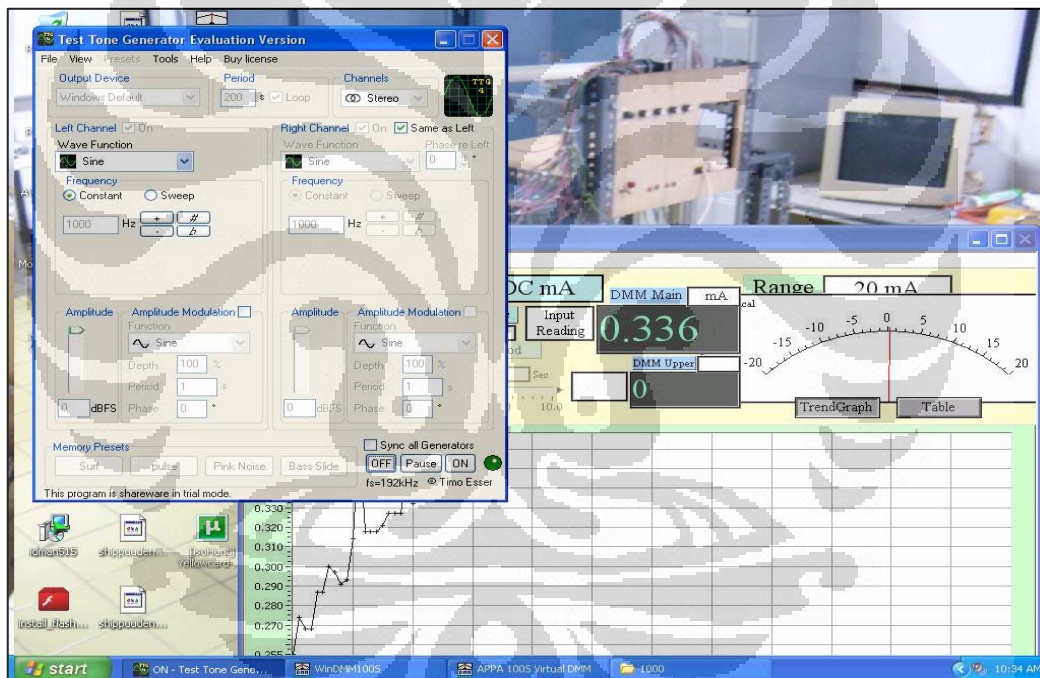
Gambar 3-13. Power Supply dengan Multimeter untuk Mencatat Pembacaan Arus Listrik

3.2.6 Digital multimeter (DMM)

Data arus lokal yang diperoleh dari mini elektroda dibaca menggunakan *digital multimeter* yang mempunyai presisi tinggi (keluaran yang dibaca dalam satuan mA). Data yang dibaca akan diakuisisi ke komputer dengan menggunakan *software*.



Gambar 3-14. Digital Multimete



Gambar 3-15. Tampilan Akuisisi Data Penelitian dengan Software

3.2.7 Pompa

Pompa berfungsi untuk menyalurkan larutan elektrolit dari *reservoir* ke kanal aliran. Pompa yang digunakan memiliki head maksimum hingga 30 m. Spesifikasi pompa Sanyo PW H 136 :

- Sumber tegangan : 1 fase 220 V 50 Hz
- Suction head : max 9 m

- Total head : max 30 m
- Kapasitas aliran : max 32 ltr/ min
- Pipa *suction* : 1 inch
- Pipa *discharge* : 1 inch



Gambar 3-16. Pompa Sanyo PW H 136

3.2.8 Reservoir

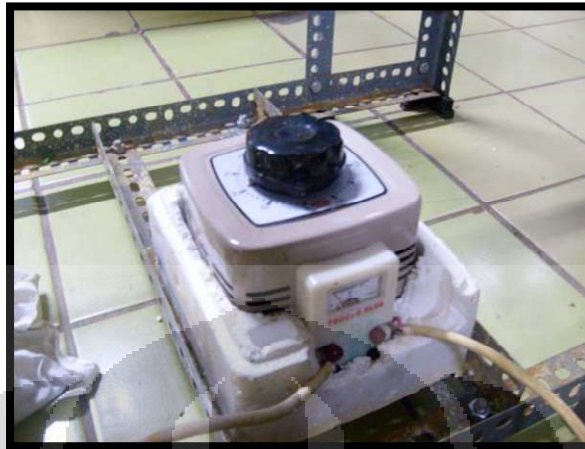
Reservoir digunakan untuk menampung larutan elektrolit CuSO_4 . Reservoir ini menerima larutan elektrolit dari kanal aliran untuk kemudian disalurkan kembali oleh pompa. Reservoir yang digunakan terbuat dari plastik yang dapat menampung larutan hingga 17 liter.

3.2.9 Pemipaan

Untuk sistem pemipaan, alat yang digunakan adalah pipa paralon PVC dengan diameter bervariasi antara $\frac{1}{2}$ inchi, $\frac{3}{4}$ inchi, dan 1 inchi. Untuk pengatur debit aliran digunakan katup pengatur yang terletak sebelum flowmeter dan katup *by pass* ke reservoir. Untuk sistem bongkar pasang digunakan *water moor* pada bagian tertentu.

3.2.10 Voltage regulator

Voltage regulator digunakan untuk mengatur putaran *impeller* pompa sehingga debit aliran sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 3-17. Voltage Regulator

Larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan CuSO_4 0,5 M. Tabel 3-2 menunjukkan sifat fisik dari larutan elektrolit pada suhu 20°C (Noulty dan Leaist, 1987).

Tabel 3-2. Propertis Larutan Elektrolit

Propertis	Nilai
Densitas (kg/m^3)	1072
Viskositas (kg.m/s)	$1,149 \times 10^{-3}$
Konsentrasi atau Molaritas (M)	0,5
Diffusivitas ion (m^2/s)	$4,43 \times 10^{-10}$

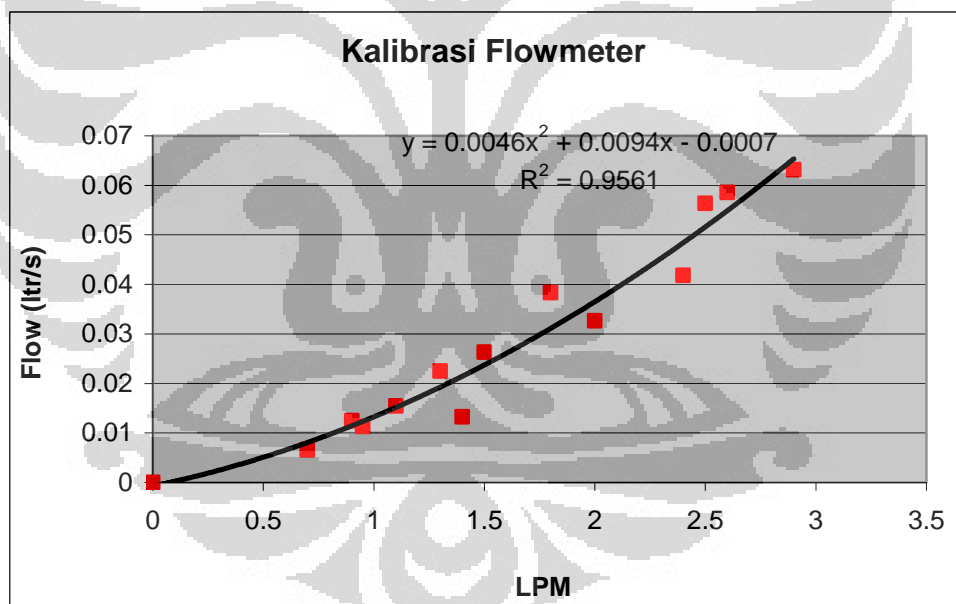
3.3 Kalibrasi Alat Ukur

Karena alat ukur, yaitu flowmeter yang digunakan tidak diperuntukkan pada larutan yang sesuai, yaitu pada SG 1, maka terlebih dahulu harus dilakukan kalibrasi. Langkah – langkah kalibrasi adalah sebagai berikut :

- a. menyiapkan gelas ukur sebesar 1000 mL atau 1 liter pada saluran output,
- b. mengalirkan larutan elektrolit melalui flowmeter,
- c. menyalakan pompa dan mencatat debit aliran yang terdapat pada flowmeter
- d. mengukur tinggi aliran yang terdapat pada gelas ukur dan waktunya,

- e. melakukan proses yang sama sebanyak lebih kurang 20 kali pada kondisi debit aliran yang berbeda,
- f. menyimpan data dan mengolah data tersebut hingga diperoleh persamaan dari grafik

Proses kalibrasi telah dilakukan sebelumnya oleh Akrom (2008) pada spesifikasi flowmeter yang sama. Data yang diperoleh adalah besarnya debit aliran (ltr/min), tinggi awal dan tinggi akhir larutan pada gelas ukur (mL) dan waktu yang diperoleh dari tinggi awal hingga tinggi akhir (sekon). Setelah diperoleh persamaan garis, maka nilai yang ada pada flowmeter kemudian dimasukkan pada persamaan tersebut agar diperoleh nilai debit aliran untuk larutan CuSO_4 . Berikut adalah hasil yang diperoleh dari proses kalibrasi.



Gambar 3-18. Grafik Kalibrasi Flowmeter

Sumber : Hanifa Akrom dalam Perpindahan Massa Konvektif dengan Kontrol Turbulensi Menggunakan Metode Wall Recess pada Sel Elektrokimia Plat Sejajar, gambar 3.17

Persamaan yang diperoleh dari grafik diatas adalah $y = 0,0046x^2 + 0,0094x - 0,0007$. Sehingga hasil kalibrasi yang diperoleh adalah sebagai berikut.

Tabel 3-3. Hasil Kalibrasi Flow Rate dari Flowmeter

Q _{flowmeter} (ltr/min)	Q _{kalibrasi} (ltr/min)
1	0,798
1,1	0,91236
1,2	1,03224
1,9	2,02596
2	2,19
2,1	2,35956
2,2	2,53464
2,3	2,71524
2,4	2,90136
2,5	3,0393

Sumber : Hanifa Akrom dalam Perpindahan Massa Konvektif dengan Kontrol Turbulensi Menggunakan Metode Wall Recess pada Sel Elektrokimia Plat Sejajar, tabel 3.2

3.4 Prosedur Pengambilan Data

Persiapan dilakukan dengan menyediakan larutan elektrolit CuSO₄ dengan molaritas 0,5 M ke dalam reservoir. Di bawah ini adalah nilai – nilai propertis yang penting untuk larutan elektrolit. Pengambilan data dilakukan dalam 3 variasi debit aliran yang berbeda, 1 ltr/min, 2 ltr/min, dan 2,5 ltr/min. Nilai debit ini dilihat dari pembacaan di flowmeter. Variasi debit aliran ini mewakili variasi bilangan Reynolds yang diinginkan. Debit aliran ini akan diukur dengan flowmeter dan diatur menggunakan *voltage regulator* atau juga katup pengatur. Variasi lainnya yaitu variasi frekuensi eksitasi akustik dengan frekuensi 500 Hz, 1000 Hz, dan 2000 Hz dengan amplitudo 0 dBFS dan intensitas getaran 95 dB.

Berikut adalah langkah – langkah pengambilan data :

- a. menyiapkan dan menghidupkan peralatan elektronik dan instrumen yang akan digunakan (*power supply*, pompa, speaker, *digital multimeter* dan komputer),
- b. mengatur sambungan koneksi *probe digital multimeter* ke pengatur sensor mini elektroda, termasuk persiapan koneksi *digital multimeter* ke

komputer (persiapan *software*, setting pembacaan arus di miliAmpere DC)

- c. mengatur debit aliran yang diperlukan untuk pengambilan data dengan pengatur katup dan *voltage regulator*. Kondisi ini dibiarkan dahulu hingga larutan mengalir melalui sistem secara keseluruhan dan tidak terdapat gelembung – gelembung kecil pada kanal. Gelembung – gelembung kecil ini dapat mempengaruhi pengambilan data.
- d. mengatur tegangan *power supply* diposisi 600 mV dan dicek pada multimeter
- e. menentukan titik mini elektroda yang akan diambil datanya (titik 1 – 38) dengan *switch selector* pada panel kontrol,
- f. mengatur frekuensi speaker dengan *software* sesuai dengan variasi data yang akan diambil (settingan volume komputer maksimal),
- g. melakukan pengambilan data sebanyak minimal 400 data untuk tiap titik mini elektroda,
- h. melakukan langkah 3 – 7 pada titik mini elektroda yang berbeda,
- i. mematikan seluruh peralatan elektronik ketika pengambilan data selesai,
- j. menyalin larutan elektrolit ke wadah lain,
- k. dan terakhir, menguras sistem dengan air bersih hingga sistem benar-benar bersih dari larutan elektrolit

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

4.1 Penentuan Data Uncertainty

Kebutuhan untuk mendapatkan data eksperimental yang dapat dipertanggungjawabkan kehandalan hasilnya merupakan suatu prasyarat sebelum dilakukannya pengambilan data. Pada dasarnya, proses pengambilan data dan perhitungan instrumen mempunyai potensi terjadinya ketidakakuratan (*inaccuracies*). Kline, S.J. (1985) melakukan pembahasan yang telah disetujui, konsep yang tepat untuk menjelaskan suatu ketidakakuratan adalah dengan menggunakan *uncertainty analysis*. Metoda *uncertainty analysis* ini dilakukan dengan mengambil data dalam jumlah tertentu sehingga didapat nilai persentase kesalahan data berdasarkan jumlah data yang diambil. Dengan ini akan dicari nilai kesalahan data sekecil mungkin, yang terjadi pada jumlah data yang cukup banyak.

Pada penelitian sebelumnya, analisa *data uncertainty* untuk pengambilan data telah dilakukan oleh Akrom (2008). Untuk penentuan *data uncertainty* ini, diambil dua titik sebagai sampel yaitu titik yang mewakili area awal bagian hulu dan area akhir bagian hilir. Pada tiap titik data yang diambil sebanyak 50, 100, 200, 300, 500, 700 dan 1000 data hingga lima kali pengambilan data. Dari perhitungan yang telah dilakukan, nilai kesalahan data pada jumlah pengambilan data 300 menghasilkan nilai yang cukup kecil yaitu berada pada nilai $< 1\%$, sehingga data yang diperoleh memiliki nilai kesalahan yang dapat diterima. Untuk pengambilan data pada penelitian ini, jumlah data yang diambil tiap titik nya adalah 400 dengan asumsi nilai kesalahan dapat lebih kecil lagi.

4.2 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Reynolds

Untuk perhitungan bilangan Reynolds sesuai dengan persamaan (2.11) dibutuhkan parameter propertis fluida, diameter hidrolis dan kecepatan profil aliran. Parameter – parameter ini diambil dari kondisi di *backstep*. Untuk propertis fluida, nilai yang digunakan merujuk pada tabel 3-2. Pada penelitian yang

dilakukan, kanal aliran yang digunakan bukan berbentuk silinder tetapi berbentuk *duct*. Sehingga, untuk perhitungan bilangan Reynolds, diameter hidrolis dari kanal didapat dari persamaan (2.13) sebesar 0,0089 m. Sedangkan kecepatan profil aliran hulu dihitung dengan persamaan (2.12). Hasil dari perhitungan tersebut ditunjukkan pada tabel 4-1.

Pada penelitian ini, parameter yang diperhatikan adalah variasi bilangan Reynolds yang diwakili oleh variasi debit (*flow rate*) aliran. Variasi debit aliran digunakan untuk memperhatikan pengaruh efek turbulensi yang dijelaskan oleh bilangan Reynolds dengan laju perpindahan massa dan hubungan bilangan Reynolds dengan parameter bilangan tak berdimensi lainnya. Hubungan bilangan Reynolds dengan *flow rate* berbanding lurus, sehingga penambahan *flow rate* dapat memperbesar bilangan Reynolds.

Tabel 4-1. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Reynolds

Debit aliran flowmeter (ltr/min)	Debit aliran larutan elektrolit (ltr/min)	Kecepatan profil aliran <i>backstep</i> (m/s)	Bilangan Reynolds <i>backstep</i>
1	0,798	$6,65 \times 10^{-2}$	551,49
2	2,19	$1,83 \times 10^{-1}$	1513,50
2,5	3,0393	$2,53 \times 10^{-1}$	2100,46

Dari tabel 4-1 perhitungan bilangan Reynolds aliran hulu kanal, didapat profil bilangan Reynolds lebih kecil dari 2100, yang artinya aliran kanal bagian hulu mempunyai profil aliran laminar. Nilai ini penting diketahui untuk menjelaskan kondisi aliran sebelum melewati *backstep* adalah aliran yang belum terjadi olakan turbulen sebagai landasan dasar dalam melakukan analisa.

4.3 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Penentuan koefisien perpindahan massa lokal dilakukan dengan metode *limiting diffusion current* seperti yang telah dilakukan Chouikhi et.al (1987) dan Oduoza et.al. (1997) pada reaksi reduksi di katoda. Koefisien perpindahan massa lokal ini dihitung dengan persamaan (2.10), dimana arus diperoleh dari

pengambilan data arus lokal pada tiap – tiap mini elektroda yang dibaca oleh *digital multimeter*. Arus lokal merupakan nilai rata – rata arus dari keseluruhan data yang didapat di tiap titiknya. Nilai luas permukaan merupakan luas permukaan mini elektroda yang terpapar ke elektrolit yang besarnya $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Nilai konsentrasi borongan yang digunakan adalah 0,5 M.

Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa dalam penelitian ini dilakukan pada 3 variasi debit aliran dan 3 variasi frekuensi eksitasi akustik. Sehingga untuk pengolahan data, nilai koefisien perpindahan massa dijabarkan ke dalam 3 kelompok bilangan Reynolds yang berbeda dengan frekuensi akustik tertentu.

Dari 38 titik mini elektroda, data yang diolah dalam penelitian ini hanya data dari titik 1 sampai 19. Reduksi data ini memperhatikan kondisi data yang cenderung tidak normal setelah titik 20 (panjang aksial > 117,5 mm). Pereduksian data dapat dipertanggungjawabkan karena rasio geometris panjang aksial katoda dari *backstep* terhadap ketinggian *backstep* nilainya masih lebih besar dari 15. Nilai rasio yang dianjurkan untuk penelitian aliran *separated-reattached flow* setelah *backstep* adalah 5 – 15 (Eaton dan Johnson , 1981).

Tabel 4-2. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 551$

Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik			Koefisien Perpindahan Massa (m/s) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.4993	0.4791	0.4271	0.000002930	0.000002811	0.000002506
2	0.2887	0.3772	0.2641	0.000001694	0.000002213	0.000001550
3	0.4298	0.4115	0.4463	0.000002522	0.000002415	0.000002619
4	0.3128	0.3070	0.3889	0.000001835	0.000001801	0.000002282
5	0.2653	0.4179		0.000001557	0.000002452	
6	0.2945	0.3271	0.2421	0.000001728	0.000001919	0.000001421
7	0.4058	0.4573	0.4180	0.000002381	0.000002683	0.000002453
8	0.4073	0.4374	0.3892	0.000002390	0.000002567	0.000002284
9	0.3591	0.4223	0.4512	0.000002107	0.000002478	0.000002647

10	0.3470	0.3979	0.4403	0.000002036	0.000002335	0.000002584
11	0.4124	0.4592	0.3673	0.000002420	0.000002694	0.000002155
12	0.1786	0.2946	0.2720	0.000001048	0.000001729	0.000001596
13	0.3328	0.3807	0.2877	0.000001953	0.000002234	0.000001688
14	0.4120	0.4484	0.3494	0.000002418	0.000002631	0.000002050
15	0.2745	0.3773	0.1440	0.000001611	0.000002214	0.000000845
16	0.3822	0.4090	0.3786	0.000002243	0.000002400	0.000002221
17	0.3244	0.4031	0.3779	0.000001903	0.000002365	0.000002217
18	0.3901	0.4051	0.3534	0.000002289	0.000002377	0.000002074
19	0.3902	0.3995	0.3667	0.000002290	0.000002344	0.000002152

Tabel 4-2 adalah tabel pengolahan data untuk bilangan Reynolds 551,49. Terdapat beberapa data yang mengalami reduksi dikarenakan nilai pembacaan arus listrik yang di luar kondisi normal.

Tabel 4-3. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 1513$

Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik			Koefisien Perpindahan Massa (m/s) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.4294	0.3736	0.2981	0.000002520	0.000002192	0.000001749
2	0.2258	0.1859	0.2548	0.000001325	0.000001091	0.000001495
3	0.3479	0.3189	0.2364	0.000002042	0.000001871	0.000001387
4	0.3449	0.3299	0.2462	0.000002024	0.000001936	0.000001445
6	0.2471			0.000001450		
7	0.4550	0.3945	0.2431	0.000002670	0.000002315	0.000001427
8	0.4396	0.4131	0.2297	0.000002580	0.000002424	0.000001348
9	0.4672	0.4420	0.2575	0.000002741	0.000002594	0.000001511
10	0.4381	0.4120	0.2545	0.000002570	0.000002418	0.000001493
11	0.4512	0.4684	0.2387	0.000002647	0.000002748	0.000001401
12	0.3221	0.3424	0.2579	0.000001890	0.000002009	0.000001513
13	0.3734	0.3698	0.3044	0.000002191	0.000002170	0.000001786
14	0.4282	0.5734	0.2480	0.000002512	0.000003364	0.000001455
15	0.1789	0.1511	0.1344	0.000001050	0.000000886	0.000000789
16	0.3479			0.000002041		
17	0.4136	0.3331	0.3154	0.000002427	0.000001955	0.000001851
18	0.3637	0.3497	0.1443	0.000002134	0.000002052	0.000000846

19	0.3658	0.3642	0.1804	0.000002147	0.000002137	0.000001059
----	--------	--------	--------	-------------	-------------	-------------

Tabel 4-3 adalah tabel pengolahan data untuk bilangan Reynolds 1513,50. Pada beberapa titik terdapat data yang tidak sesuai dengan kondisi normal. Data ini mengalami *data reduction* yang ditunjukkan oleh kekosongan data pada beberapa kolom dan baris termasuk data untuk titik 5.

Tabel 4-4. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 2100$

Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik			Koefisien Perpindahan Massa (m/s) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.3236	0.3580	0.3554	0.000001899	0.000002101	0.000002086
2	0.3165			0.000001857		
3	0.2614	0.2764	0.2803	0.000001534	0.000001622	0.000001644
4	0.3197	0.2730	0.2842	0.000001876	0.000001602	0.000001668
7	0.2825			0.000001658		
8	0.2350			0.000001379		
9	0.3105			0.000001822		
10	0.3161	0.3188	0.3264	0.000001855	0.000001871	0.000001915
11	0.2494	0.3226	0.3116	0.000001463	0.000001893	0.000001829
12	0.2916	0.2534	0.2638	0.000001711	0.000001487	0.000001548
13	0.3525	0.2836	0.3165	0.000002068	0.000001664	0.000001857
14	0.2587	0.2964	0.3256	0.000001518	0.000001740	0.000001910
15	0.1891	0.2431	0.2217	0.000001109	0.000001426	0.000001301
16		0.3885	0.2626		0.000002280	0.000001541
17	0.3834	0.3058	0.2736	0.000002250	0.000001794	0.000001605
18	0.4308	0.2965	0.2878	0.000002528	0.000001740	0.000001689
19	0.2194	0.2555	0.2329	0.000001287	0.000001499	0.000001367

Tabel 4-4 adalah tabel perhitungan untuk bilangan Reynolds 2100,46. Terdapat juga beberapa data yang mengalami *data reduction* yang ditunjukkan oleh kekosongan data pada beberapa kolom dan baris termasuk data untuk titik 5 dan 6.

Nilai koefisien perpindahan massa maksimal yang diambil dari koefisien perpindahan massa di 19 titik mini elektroda ditunjukkan oleh tabel 4-5.

Tabel 4-5. Nilai Koefisien Perpindahan Massa Konvektif Maksimal pada Variasi Reynolds dan Frekuensi

Reynolds	Max Km (m/s) pada Frekuensi Eksitasi		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
551,49	0.000002930	0.000002811	0.000002647
1513,50	0.000002741	0.000003364	0.000001851
2100,46	0.000002528	0.000002280	0.000002086

Nilai koefisien perpindahan massa rata-rata yang diambil koefisien perpindahan massa di 19 titik mini elektroda ditunjukkan oleh tabel 4-6.

Tabel 4-6. Nilai Koefisien Perpindahan Massa Konvektif Rata-Rata pada Variasi Reynolds dan Frekuensi

Reynolds	Average Km (m/s) pada Frekuensi Eksitasi		
	500	1000	2000
551,49	0.000002071	0.000002351	0.000002075
1513,5	0.000002165	0.000002135	0.000001410
2100,46	0.000001738	0.000001748	0.000001689

4.4 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Strouhal

Parameter lain yang akan diperhitungkan adalah korelasi antara bilangan Strouhal sebagai bilangan tak berdimensi yang menyatakan mekanisme osilasi aliran. Bilangan Strouhal yang dipengaruhi juga oleh parameter frekuensi dan geometris benda dihitung dengan persamaan (2.14). Nilai parameter frekuensi didapat dari variasi frekuensi eksitasi akustik yang diintroduksi oleh speaker. Sedangkan parameter geometris diambil dari ketinggian kontur tangga sebesar 5 mm.

Perhitungan bilangan Strouhal dan hubungan dengan maksimal koefisien perpindahan massa konvektif diperlihatkan oleh tabel 4-7.

Tabel 4-7. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Strouhal Tiap Variasi Parameter

f (Hz)	V aliran (m/s)	Reynolds	Max Km (m/s)	Strouhal
500	0.0665	551.498	0.000002930	37.59398

	0.1825	1513.509	0.000002741	13.69863
	0.253275	2100.460	0.000002528	9.870694
1000	0.0665	551.498	0.000002811	75.18797
	0.1825	1513.509	0.000003364	27.39726
	0.253275	2100.460	0.000002280	19.74139
2000	0.0665	551.498	0.000002647	150.3759
	0.1825	1513.509	0.000001851	54.79452
	0.253275	2100.460	0.000002086	39.48278

4.5 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Schmidt

Untuk menjelaskan hubungan perpindahan massa konvektif yang terjadi, digunakan bilangan tak berdimensi Sherwood yang berkorelasi dengan bilangan tak berdimensi Reynolds dan Schmidt.

Bilangan tak berdimensi Schmidt secara fisik menggambarkan hubungan ketebalan relatif lapisan aliran dengan lapisan batas perpindahan massa. Perhitungan bilangan Schmidt menggunakan persamaan (2.15), yang parameternya didapat dari propertis larutan elektrolit CuSO_4 merujuk pada tabel 3-2. Hasil perhitungan didapat nilai bilangan Schmidt untuk larutan elektrolit CuSO_4 adalah $2,42 \times 10^3$.

4.6 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood

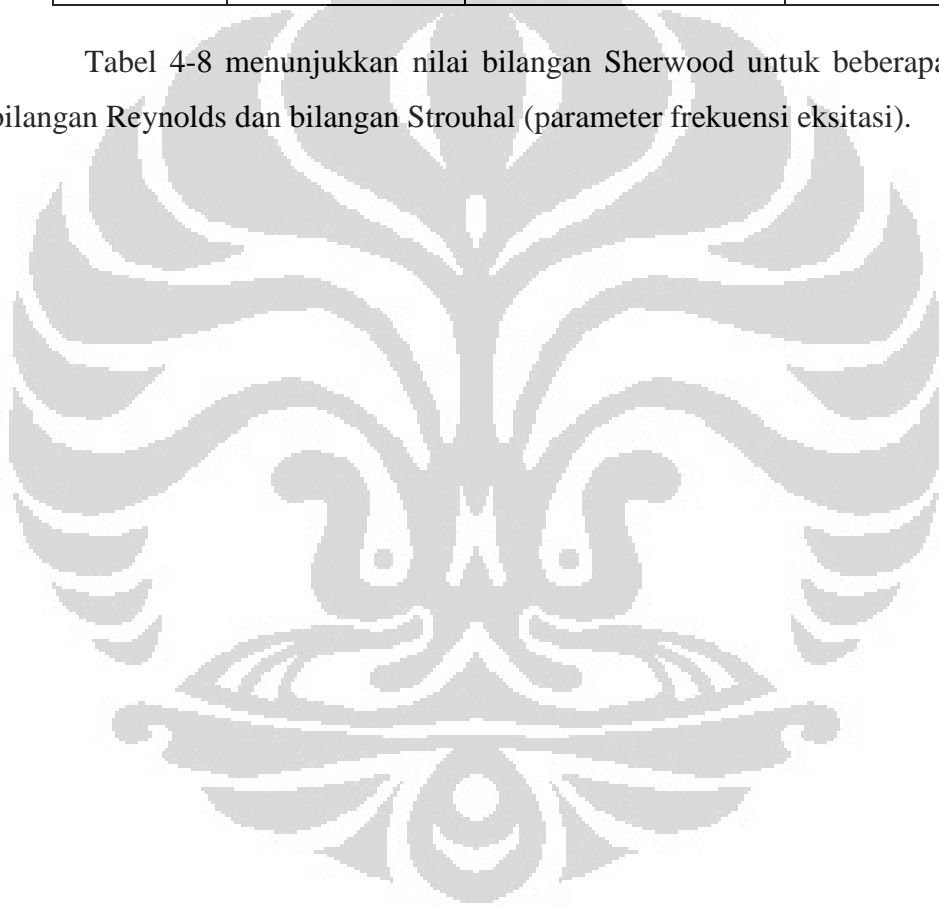
Bilangan tak berdimensi Sherwood menjelaskan perpindahan massa konvektif yang terjadi di permukaan lapisan batas. Untuk menghitung nilai bilangan tak berdimensi Sherwood digunakan persamaan (2.16). Nilai koefisien perpindahan massa konvektif didapat dari perhitungan sebelumnya pada tabel 4-5, nilai panjang karakteristik didapat dari diameter hidrolis, dan koefisien difusi perpindahan massa adalah nilai karaktersitik larutan elektrolit CuSO_4 .

Tabel 4-8. Hasil Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood

Reynolds	Strouhal	Max Km (m/s)	Sherwood
551.498	37.593985	0.000002930	58.7824
	75.1879699	0.000002811	56.4033

	150.37594	0.000002647	53.1200
1513.509	13.6986301	0.000002741	55.0068
	27.3972603	0.000003364	67.5078
	54.7945205	0.000001851	37.1377
2100.461	9.87069391	0.000002528	50.7243
	19.7413878	0.000002280	45.7463
	39.4827756	0.000002086	41.8470

Tabel 4-8 menunjukkan nilai bilangan Sherwood untuk beberapa variasi bilangan Reynolds dan bilangan Strouhal (parameter frekuensi eksitasi).

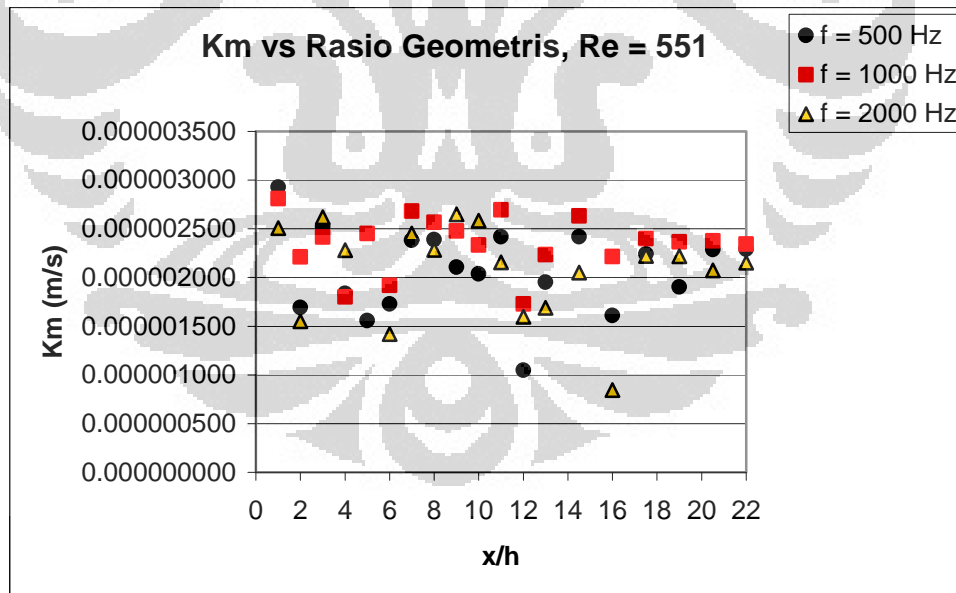


BAB 5 ANALISA DAN PEMBAHASAN

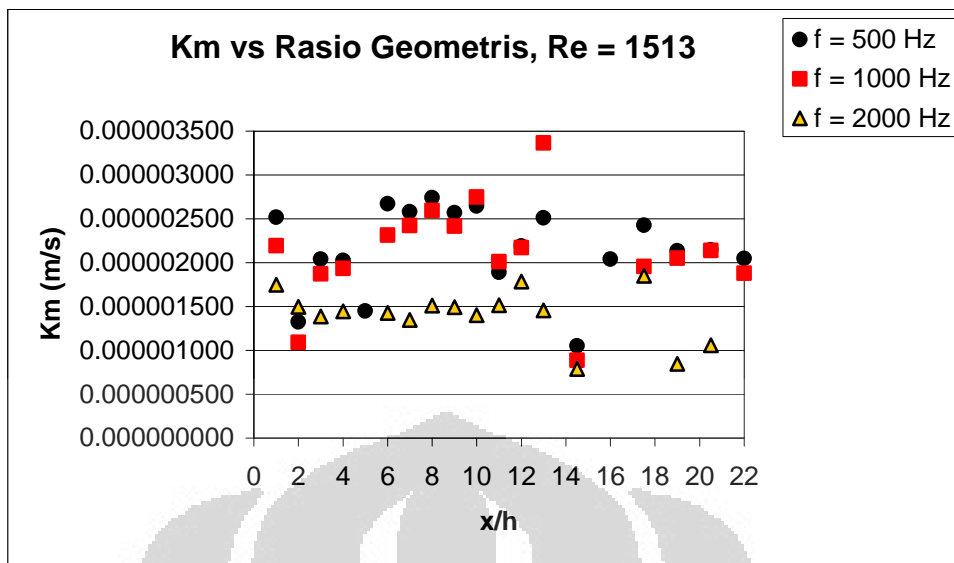
5.1 Analisa Koefisien Perpindahan Massa

Studi tentang eksitasi akustik pada aliran turbulen menunjukkan karakteristik aliran jet dapat dipengaruhi oleh frekuensi eksitasi. Penelitian yang telah dilakukan ini merupakan penelitian untuk melihat pengaruh pemberian eksitasi akustik dan kecepatan aliran terhadap kenaikan koefisien perpindahan massa proses elektroplating.

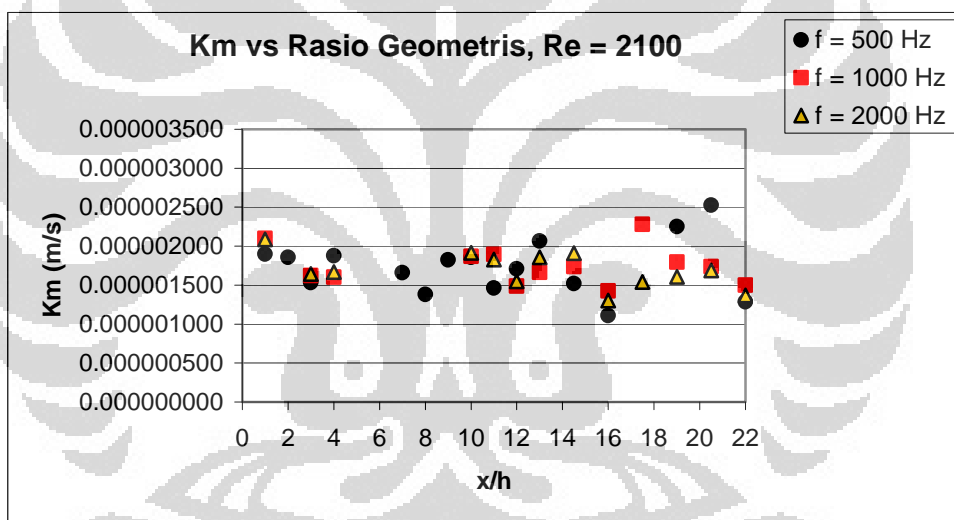
Dari pengolahan data yang telah dilakukan, yang ditunjukkan pada tabel 4-2, 4-3, dan 4-4, dapat diplot nilai distribusi koefisien perpindahan massa konvektif terhadap rasio geometris kanal ($x/h = 0 - 22$) pada berbagai bilangan Reynolds dan frekuensi eksitasi 500 Hz, 1000 Hz dan 2000 Hz.



Gambar 5-1. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 551



Gambar 5-2. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 1513



Gambar 5-3. Distribusi Koefisien Perpindahan Massa pada Reynolds 2100

Dari ketiga grafik di atas, dapat dilihat nilai distribusi koefisien perpindahan massa konvektif pada setiap bilangan Reynolds cenderung tersebar merata pada rasio geometris x/h . Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Akrom, 2008) tentang pengaruh pemberian kontur tangga sebagai pencetus turbulensi aliran, distribusi koefisien perpindahan massa pada penelitian ini tidak menunjukkan daerah dengan tingkat perpindahan massa yang sangat tinggi di daerah resirkulasi *corner eddy*. Sehingga dapat dikatakan pemberian eksitasi frekuensi akustik pada aliran turbulen setelah *backstep* mempengaruhi profil aliran turbulen sehingga distribusi perpindahan massa merata pada $x/h = 0 - 22$.

Pemberian eksitasi frekuensi tertentu dapat menyebabkan luasan struktur koheren (*large organized-coherent structure*) dari aliran separasi bertaut kembali menjadi lebih luas sehingga distribusi perpindahan massa menjadi lebih merata. Wardana (1998) menjelaskan bahwa *large scale coherent motion* dibuat menjadi lebih intensif oleh kebisingan berintensitas rendah pada semua frekuensi.

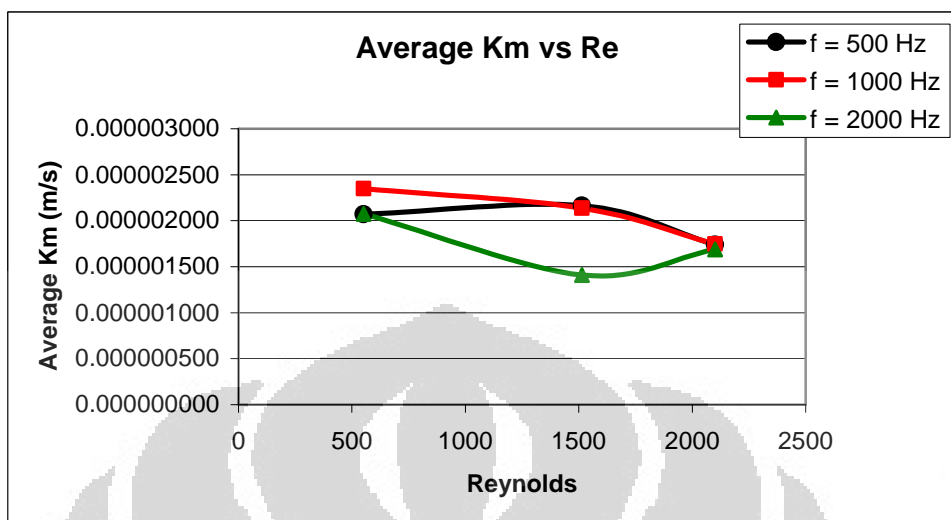
Apabila melihat pengaruh dari variasi frekuensi eksitasi akustik yang diberikan, pada bilangan Reynolds 2100, distribusi koefisien perpindahan massa hampir sama dan tidak terlihat kecenderungan yang konsisten dari pengaruh peningkatan frekuensi eksitasi akustik. Pada perlakuan yang berbeda, pada bilangan Reynolds 551 dan 1513, kenaikan frekuensi eksitasi akustik mengakibatkan nilai koefisien perpindahan massa semakin berkurang. Hal ini mengindikasikan, pada bilangan Reynolds yang tinggi, pemberian variasi eksitasi frekuensi tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada profil turbulensi aliran.

Jika melihat kecenderungan dari *range* nilai, kenaikan bilangan Reynolds mengakibatkan *range* nilai menjadi lebih kecil. Pada bilangan Reynolds 551, *range* nilai koefisien perpindahan massa terletak di *range* 0,000001 m/s dengan 0,000003 m/s. Pada bilangan Reynolds 1513, *range* nilai di 0,000001 m/s dengan 0,0000025 m/s. Pada bilangan Reynolds 2100, *range* nilai di 0,0000015 dengan 0,000002 m/s. Hal ini mengindikasikan, semakin besar bilangan Reynolds maka nilai koefisien perpindahan massa menunjukkan nilai yang cenderung konvergen dengan tingkat fluktuasi rendah. Namun demikian, nilai yang konvergen ini tidak diikuti oleh kenaikan koefisien perpindahan massa. Kenaikan bilangan Reynolds mengakibatkan kecenderungan koefisien perpindahan massa semakin kecil, dan pengaruh dari pemberian frekuensi eksitasi mulai tidak berpengaruh.

Untuk melakukan analisa yang lebih mendalam diperlukan studi lanjutan korelasi koefisien perpindahan massa maksimum dengan bilangan tak berdimensi Reynolds dan Strouhal.

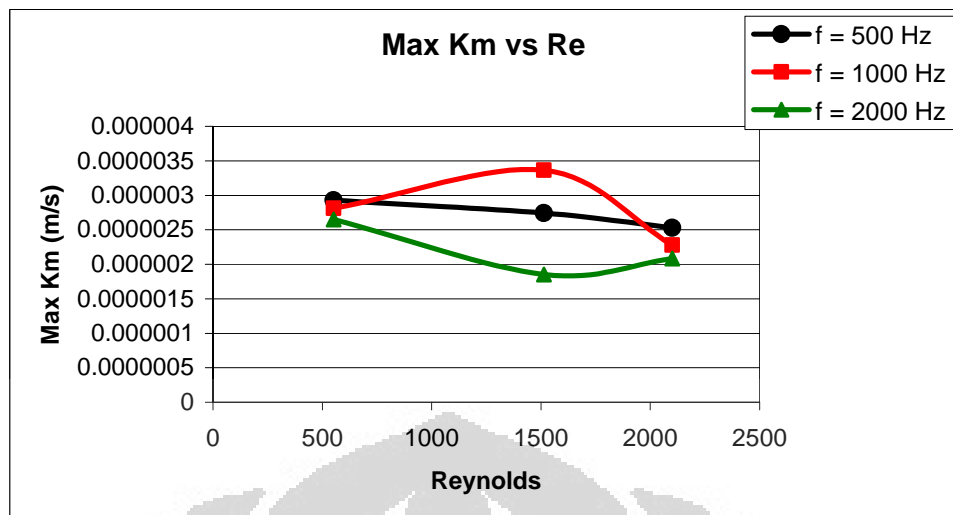
5.2 Koefisien Perpindahan Massa Maksimum dan Rata-Rata

Dari pengolahan data yang telah dilakukan sebelumnya, dapat diplot grafik koefisien perpindahan massa maksimum terhadap nilai bilangan Reynolds dan Strouhal yang diambil dari tabel 4-6 dan 4-7.



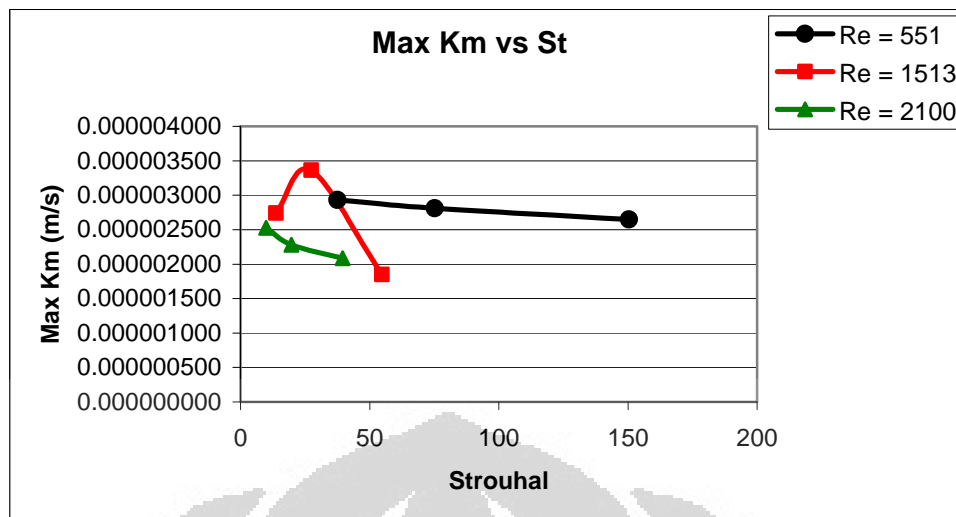
Gambar 5-4. Pengaruh Reynolds terhadap Koefisien Perpindahan Massa Rata-Rata pada Variasi Frekuensi

Grafik di atas menunjukkan korelasi antara koefisien perpindahan massa konvektif rata-rata terhadap bilangan Reynolds pada frekuensi eksitasi tertentu. Dari grafik dapat dilihat, secara umum efek dari kenaikan eksitasi frekuensi menyebabkan nilai koefisien perpindahan massa konvektif mengalami penurunan. Selain itu, kenaikan bilangan Reynolds juga menyebabkan nilai koefisien perpindahan massa menurun. Hal ini menjadi landasan pembahasan awal yang telah dilakukan pada subbab sebelumnya. Vlasov, E.V. et.al. (1999) melakukan penelitian terhadap pengaruh eksitasi akustik terhadap turbulensi pada kecepatan subsonik. Dalam studi yang telah dilakukan, laju pencampuran (*mixing rate*) meningkat ketika jet dikenai eksitasi frekuensi yang rendah. Ketika jet dikenai eksitasi frekuensi yang tinggi, nilai laju pencampuran ini menurun. Laju pencampuran dapat dianalogikan sebagai laju perpindahan massa konvektif.



Gambar 5-5. Pengaruh Reynolds terhadap Koefisien Perpindahan Massa Maksimum pada Variasi Frekuensi

Grafik di atas menggambarkan pengaruh kenaikan bilangan Reynolds terhadap perpindahan massa pada variasi frekuensi dengan intensitas 95 dB. Seperti yang ditunjukkan oleh grafik, *trend* kurva menunjukkan penurunan koefisien perpindahan massa maksimum pada kenaikan bilangan Reynolds dan frekuensi eksitasi. Namun demikian, pada bilangan Reynolds 1500 dan frekuensi eksitasi 1000 Hz terjadi kenaikan koefisien perpindahan massa konvektif maksimum yang signifikan. Hal ini terjadi karena pada variasi parameter tersebut terjadi peningkatan *vortex shedding*. Penguatan *vortex shedding* dapat meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa maksimum. Hal ini dijelaskan lebih lanjut oleh Bhattacharjee, Scheelke dan Troutt (1986), pemberian eksitasi akustik pada frekuensi tertentu akan menyebabkan peningkatan pertumbuhan *vortex shedding* pada *separated shear layer* yang disebabkan oleh penyatuan *vortex*.

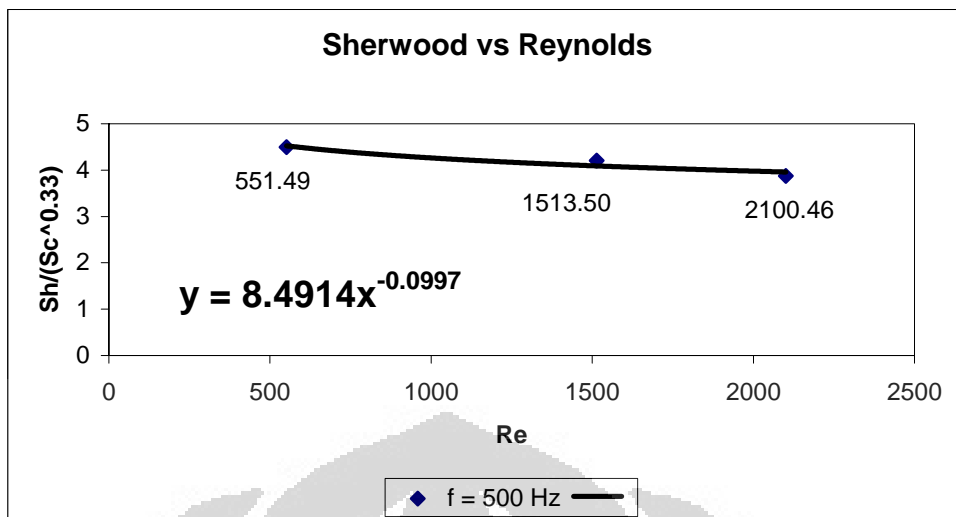


Gambar 5-6. Pengaruh Strouhal terhadap Koefisien Perpindahan Massa Maksimum pada Variasi Frekuensi

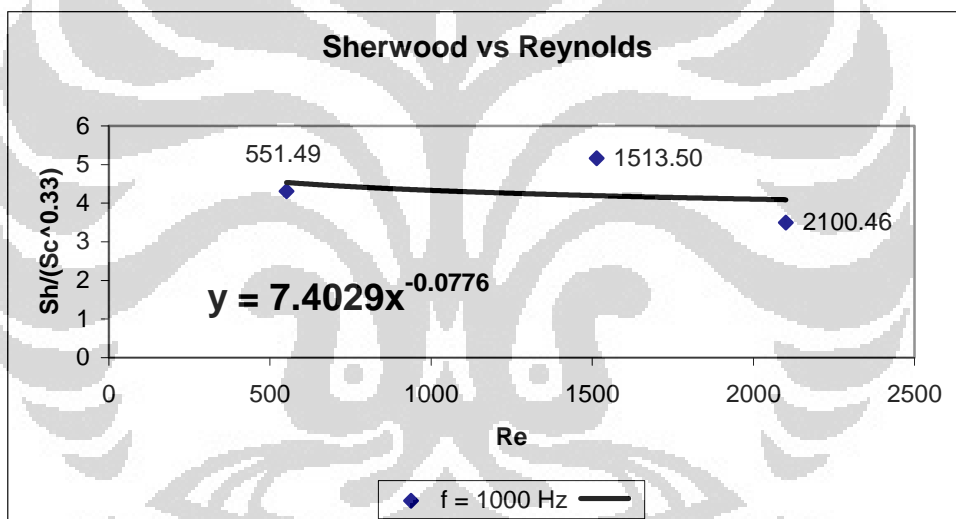
Grafik di atas menggambarkan pengaruh kenaikan bilangan Strouhal terhadap perpindahan massa pada variasi kecepatan kanal di *backstep*.

5.3 Korelasi Bilangan Tak Berdimensi Sherwood, Reynolds dan Schmidt

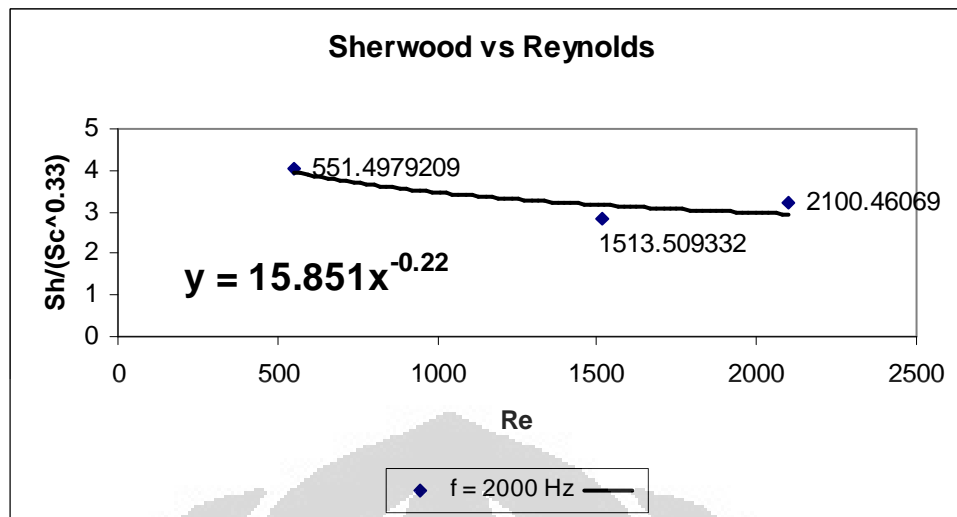
Korelasi bilangan Sherwood dapat dinyatakan dengan menggunakan teorema pi Buckingham dengan analisa dimensional beberapa parameter fisik yang mempengaruhi. Dengan alasan kemudahan, bilangan tak berdimensi Sherwood dapat dijelaskan dengan hubungan dengan bilangan tak berdimensi Reynolds dan Schmidt yang didapat secara eksperimental. Hubungan tiga bilangan tak berdimensi ini diperlihatkan oleh persamaan (2.17), dimana hubungan dapat digunakan pada geometri fisik, fluida, dan kecepatan aliran yang berbeda-beda selama asumsi seperti disipasi viskositas dianggap tidak ada. Nilai eksponensial bilangan Schmidt diasumsikan adalah $n = 1/3$. Nilai asumsi ini banyak digunakan untuk beberapa jenis aliran turbulen dan laminar. Dari tabel 4-8 dapat diplot hubungan bilangan tak berdimensi Sherwood, Schmidt dan Reynolds ke dalam persamaan.



Gambar 5-7. Plot $Sh/Sc^{0.33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 500 Hz



Gambar 5-8. Plot $Sh/Sc^{0.33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 1000 Hz



Gambar 5-9. Plot $Sh/Sc^{0,33}$ nilai Koefisien Perpindahan Massa Maksimum terhadap Re pada Frekuensi 2000 Hz

Dari ketiga grafik di atas, didapat 3 hubungan bilangan tak berdimensi Sherwood dengan Reynolds dan Schmidt.

- Pada frekuensi eksitasi 500 Hz, $Sh = 8,4914 Re^{-0,0997} \cdot Sc^{0,33}$
- Pada frekuensi eksitasi 1000 Hz, $Sh = 7,4029 Re^{-0,0776} \cdot Sc^{0,03}$
- Pada frekuensi eksitasi 2000 Hz, $Sh = 15,851 Re^{-0,22} \cdot Sc^{0,33}$

5.4 Efektivitas Kenaikan Koefisien Perpindahan Massa

Karakteristik perpindahan massa yang diuraikan sebelumnya disebabkan pada daerah sesaat setelah melewati step, terjadi pola aliran separasi dan bertaut kembali akibat kontur tangga (*backstep*) pada kanal aliran, yang menyebabkan terjadinya pembesaran mendadak (*sudden expansion*) dalam aliran pipa. Pola aliran tersebut membentuk suatu pola aliran turbulensi yang sangat kompleks, yang terdiri dari region aliran resirkulasi (*recirculation flow*), lapisan geser (*shear layer*), dan lapisan batas yang berkembang kembali (*redeveloping boundary layer*). Karakteristik dari pola aliran turbulensi ini sangat ditentukan oleh konfigurasi geometris pengganggu aliran yang juga berfungsi sebagai pencetus turbulensi (dalam penelitian ini berbentuk *backstep*), parameter dinamika fluida aliran terutama kecepatan aliran utama di bagian hulu serta gangguan lain yang diberikan pada sistem fluida.

Nilai koefisien perpindahan massa konvektif maksimum ini mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan proses elektroplating pada kondisi diam, yaitu

pada kondisi tidak diberikan gangguan berupa kecepatan dan frekuensi. Nilai koefisien perpindahan massa konvektif pada kondisi diam terjadi pada nilai yang sama untuk setiap titik yaitu 0,00000107 m/s. Sehingga efektivitas kenaikan koefisien perpindahan massa maksimum hingga 214%.



BAB 6 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian proses elektroplating dengan studi kontrol turbulensi aliran setelah *backstep* dengan ketinggian 5 mm menggunakan metode akustik mekanik pada bilangan Reynolds, $Re = 551 - 2100$ dengan eksitasi frekuensi, $f = 500 \text{ Hz} - 2000 \text{ Hz}$, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Pemberian eksitasi akustik dapat meningkatkan efektivitas perpindahan massa maksimum hingga 214%.
2. Pemberian eksitasi akustik dapat mempengaruhi profil struktur koheren aliran separasi bertaut kembali menjadi lebih luas sehingga distribusi perpindahan massa pada aliran turbulen setelah *backstep* yang dikenai eksitasi frekuensi menunjukkan nilai yang merata dan tersebar secara aksial sepanjang $x/h = 0 - 22$.
3. Kenaikan frekuensi eksitasi akustik mengakibatkan nilai koefisien perpindahan massa semakin berkurang pada bilangan Reynolds rendah ($Re = 551 - 1513$) tetapi pengaruh kenaikan frekuensi eksitasi tidak berlaku pada bilangan Reynolds mendekati transisi ($Re = 2100$).
4. Pada bilangan Reynolds dan frekuensi eksitasi tertentu menyebabkan penguatan *vortex shedding* pada *separated shear layer* yang disebabkan oleh penyatuan *vortex* yang menyebabkan kenaikan koefisien perpindahan massa yang maksimal.
5. Nilai korelasi bilangan tak berdimensi Sherwood, Reynolds dan Schmidt yang menggambarkan konsep perpindahan massa ditunjukkan oleh persamaan berikut pada nilai frekuensi masing – masing
 - Pada frekuensi eksitasi 500 Hz, $Sh = 8,4914 Re^{-0,0997} \cdot Sc^{0,33}$
 - Pada frekuensi eksitasi 1000 Hz, $Sh = 7,4029 Re^{-0,0776} \cdot Sc^{0,03}$
 - Pada frekuensi eksitasi 2000 Hz, $Sh = 15,851 Re^{-0,22} \cdot Sc^{0,33}$

DAFTAR REFERENSI

- Akrom, H. (2008). Perpindahan massa konvektif dengan kontrol turbulensi aliran menggunakan metode wall recess pada sel elektrokimia plat sejajar.
- Bhattacharjee, S., Scheelke, B., dan Troutt, T.R. (1986). Modification of vortex interactions in a reattaching separated flow. Vol 24, No. 4.
- Bum-Jin Chung., Sang-Hyuk Ko, dan Deok-Won Moon. (2006). Application of electroplating method for heat transfer studies using analogy concept, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol 38 No.3.
- Chouikhi, S.M., Patrick, M.A. dan Wragg, A.A. (1987). *Journal of Applied Electrochemical*, 17, pp. 1118-1128.
- Chen, L. (2001). Method for electrolytically depositing copper on a semiconductor workpiece, *U.S Patent No. 6290833*.
- Eaton, J.K. dan Johnston, J.P. (1981). *AIAA Journal*, 19, pp. 1093 - 1099.
- Harinaldi. (2003). *Proceeding of The 8th Indonesia Toray Science Foundation Seminar on Science and Technology*.
- Harinaldi. (2007). *Laporan Penelitian Hibah PHK A3-DTM FTUI*.
- Kline, S.J. (1985). The purpose of uncertainty analysis. *Journal of Fluids Engineering*. Vol.107, pp. 153-164.
- Krall, K.M. dan Sparrow, E.M. (1987). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14, pp. 131 – 181.
- Kundu, P.K., dan Cohen, I.M. (1990). Fluid mechanic, *Academic Press, California*.
- Mayer, S.T dan Contolini, R.J. (1999). Electroplanarization of large and small damascene features using diffusion barriers and electropolishing, *U.S Patent No. 6315883*.
- Noulty, R.A., Leaist, D.G. (1987). *Journal of Solution Chemistry*, 16, 10, , pp. 813 - 825.
- Oduoza, C.F., Wragg, A.A., Patrick, M.A. (1997). *Chemical Engineering Journal*, 68 pp. 145 - 155.

- Runchall, A.K. (1971). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14, , pp. 781 – 792.
- Vlasov, E.V., Ginevskii, A.S., Karavosov, R.K., dan Makarenko, T.M. (1999). Turbulence suppression in subsonic jets by high-frequency acoustic excitation, *Fluid Dynamic*, Vol 34, No. 1.
- Wardana, I.N.G. (1998). Pengaruh frekuensi kebisingan pada intensitas rendah terhadap struktur turbulensi dalam aliran lapisan batas. *Jurnal Teknik* Vol.V No. 2.
- Yang, Y.T., dan Huang, M.L. (1998). Numerical studies of heat transfer characteristics by using jet discharge at downstream of backward-facing step, *Acta Mechanic* 128, 29 – 37.
- Ashby, Michael., Hugh Shercliff, dan David Cebon. (2007). *Material-engineering, science, processing and design first edition*. UK : Elsevier
- Brady, James E. (1999). *Kimia Universitas : Asas dan struktur* (terjemahan, edisi 5 jilid 1). Jakarta: Binarupa Aksara.
- Incropera, Frank P., De Witt, David P. (2002). *Fundamental of heat and mass transfer* (4th edition). Singapore : Wiley and Son
- Keenan, Charles W. (1992). *Kimia untuk universitas* (terjemahan, edisi 6 jilid 1). Jakarta: Erlangga.
- Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H. (2004) *Mekanika fluida* (Harinaldi & Budiarmo, Penerjemah, edisi 4, jilid 2). Jakarta : Erlangga
- Petrucci, Ralph H. (1996). *Kimia Dasar: Prinsip dan terapan modern* (terjemahan, edisi 4 jilid 1). Jakarta: Erlangga.

<http://electrochem.cwru.edu/encycl/>

<http://www.azom.com>

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/183990/electroplating>

Lampiran 1 : Data Penelitian

Tabel 8-1. Data Penelitian Untuk 1 LPM

Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.4993	0.4791	0.4271
2	0.2887	0.3772	0.2641
3	0.4298	0.4115	0.4463
4	0.3128	0.3070	0.3889
5	0.2653	0.4179	
6	0.2945	0.3271	0.2421
7	0.4058	0.4573	0.4180
8	0.4073	0.4374	0.3892
9	0.3591	0.4223	0.4512
10	0.3470	0.3979	0.4403
11	0.4124	0.4592	0.3673
12	0.1786	0.2946	0.2720
13	0.3328	0.3807	0.2877
14	0.4120	0.4484	0.3494
15	0.2745	0.3773	0.1440
16	0.3822	0.4090	0.3786
17	0.3244	0.4031	0.3779
18	0.3901	0.4051	0.3534
19	0.3902	0.3995	0.3667
20	0.3498	0.3764	0.3308
21	0.1921	0.2438	0.2058
22	0.2551	0.3942	0.3421
23	0.2642	0.4206	0.4031
24	0.2638	0.4385	
25	0.2784	0.4467	0.3219
26	0.2921	0.4715	0.3719
27	0.3355	0.5308	0.3914
28	0.3349	0.5257	0.2199
29	0.3225	0.5893	0.3851
30	0.2853	0.3125	0.3572

31	0.3152	0.2740	0.3784
32	0.3301	0.2700	0.3081
33	0.2817	0.2292	0.3232
34	0.3524	0.2863	
35	0.2498	0.2703	0.3013
36	0.3094	0.2491	
37	0.2694	0.2186	0.2520
38	0.2790	0.2008	

Tabel 8-2. Data Penelitian Untuk 2 LPM

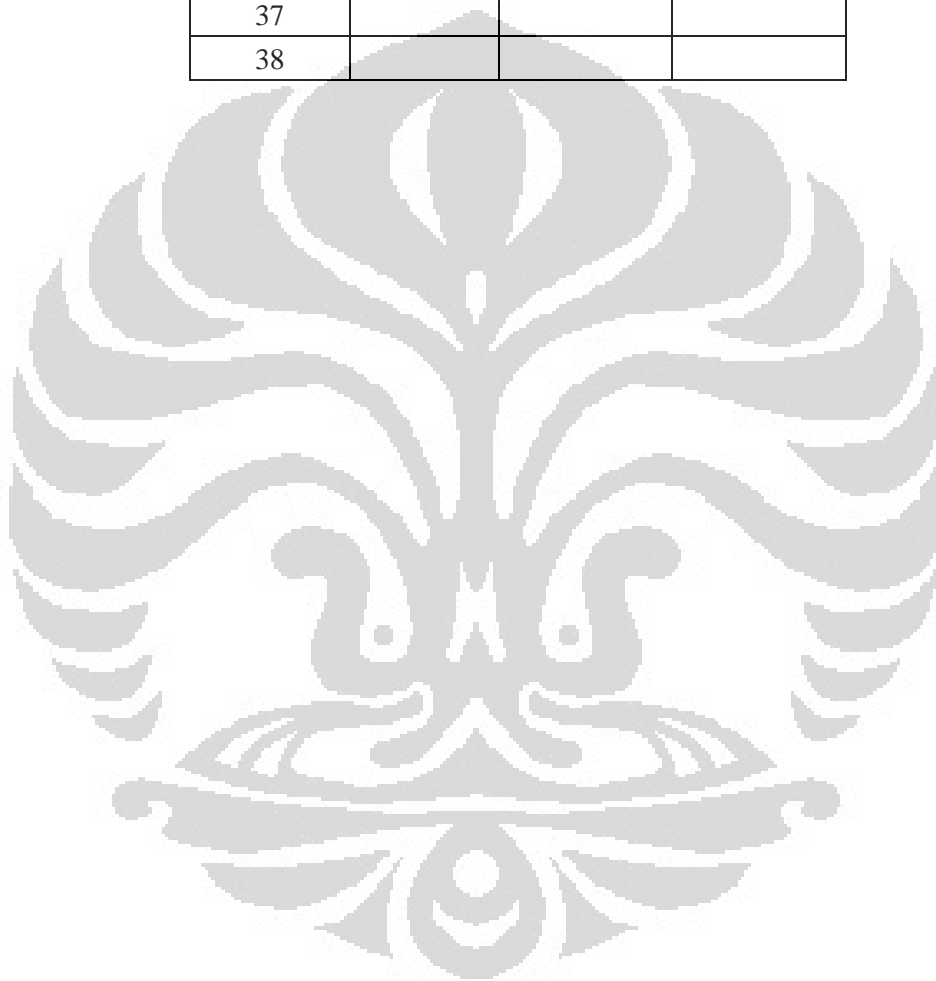
Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.4294	0.3736	0.2981
2	0.2258	0.1859	0.2548
3	0.3479	0.3189	0.2364
4	0.3449	0.3299	0.2462
6	0.2471		
7	0.4550	0.3945	0.2431
8	0.4396	0.4131	0.2297
9	0.4672	0.4420	0.2575
10	0.4381	0.4120	0.2545
11	0.4512	0.4684	0.2387
12	0.3221	0.3424	0.2579
13	0.3734	0.3698	0.3044
14	0.4282	0.5734	0.2480
15	0.1789	0.1511	0.1344
16	0.3479		
17	0.4136	0.3331	0.3154
18	0.3637	0.3497	0.1443
19	0.3658	0.3642	0.1804
20	0.3491	0.3203	
21	0.2660	0.2622	
23	0.3884	0.3735	
25	0.3542		
26	0.3470		
27	0.3923		
28	0.4181		0.1627

29	0.3668	0.3437	0.2356
31	0.3225	0.3652	
33	0.2875	0.3042	0.2689
34			
35			
36			
37			
38			

Tabel 8-3. Data Penelitian Untuk 2,5 LPM

Titik	Rata - rata Arus (mA) untuk Frekuensi Eksitasi Akustik		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0.3236	0.3580	0.3554
2	0.3165		
3	0.2614	0.2764	0.2803
4	0.3197	0.2730	0.2842
7	0.2825		
8	0.2350		
9	0.3105		
10	0.3161	0.3188	0.3264
11	0.2494	0.3226	0.3116
12	0.2916	0.2534	0.2638
13	0.3525	0.2836	0.3165
14	0.2587	0.2964	0.3256
15	0.1891	0.2431	0.2217
16		0.3885	0.2626
17	0.3834	0.3058	0.2736
18	0.4308	0.2965	0.2878
19	0.2194	0.2555	0.2329
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			

28			
29	0.2200		
30			
31			
32			
33	0.2272	0.2774	
34			
35			
36			
37			
38			



Lampiran 2 : Gambar Kerja Apparatus Penelitian