



UNIVERSITAS INDONESIA

**KONTROL AKTIF TURBULENSI ALIRAN DENGAN JET
PADA PROSES PERPINDAHAN MASSA KONVEKTIF
DALAM SEL ELEKTROKIMIA PELAT SEJAJAR**

SKRIPSI

**HENDRI ROSAS
040502034Y**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**KONTROL AKTIF TURBULENSI ALIRAN DENGAN JET
PADA PROSES PERPINDAHAN MASSA KONVEKTIF
DALAM SEL ELEKTROKIMIA PELAT SEJAJAR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**HENDRI ROSAS
040502034Y**

**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 : Hendri Rosas

NPM : 040502034Y

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Hendri Rosas
NPM : 040502034Y
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Kontrol Aktif Turbulensi Aliran dengan
Jet pada Proses Perpindahan Massa
Konvektif dalam Sel Elektrokimia Pelat
Sejajar

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 mendapat dukungan dan masukan yang tak ternilai dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang terbesar-besarnya kepada:

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

Akhir kata, penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan, kritik, dan saran dari setiap orang yang membaca laporan ini. Penulis berharap laporan ini nantinya dapat bermanfaat bagi setiap pembaca.

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 : Hendri Rosas
NPM : 040502034Y
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 :

Kontrol Aktif Turbulensi Aliran dengan Jet pada Proses Perpindahan Massa Konvektif dalam Sel Elektrokimia Pelat Sejajar

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 : Hendri Rosas
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Kontrol Aktif Turbulensi Aliran dengan Jet pada Proses Perpindahan Massa Konvektif dalam Sel Elektrokimia Pelat sejajar

Penelitian ini memanfaatkan aliran turbulensi yang ditimbulkan oleh pembesaran mendadak dan aliran tambahan dengan menggunakan jet turbulensi untuk meningkatkan laju perpindahan massa konvektif antara dua sel elektrokimia pelat sejajar. Pelat tembaga dan cairan CuSO_4 dipilih sebagai elektroda dan elektrolit dalam penelitian ini. Pengukurannya menggunakan teknik limiting diffusion current yang merupakan representasi dari perpindahan elektron karena adanya arus listrik yang mengalir dari kedua plat tembaga dan elektrolit. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa aliran mengalami resirkulasi dan berseparasi didaerah setelah pembesaran mendadak. Peningkatan koefisiensi perpindahan massa konvektif seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds dan penurunan rasio kecepatan.

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

ABSTRACT

Name : Hendri Rosas
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Active Control of Turbulent Flow with Jet to the Convective Mass Transfer Process at a Parallel Plate Electrochemical Cell

This research uses a turbulence flow which is generated by sudden expansion and addition flow with turbulent jet in an electrolyte flow to increase the rate of convective mass transfer between a parallel plate electrochemical flow cell. Copper plate is chosen as electrode and CuSO_4 liquid as an electrolyte in this experiment. The rate of convective mass transfer is measured by using limiting diffusion current as result of electron movement between cathode and anode occurs in this experiment. The result of this experiment shows recirculation and separation flow occurs after sudden expansion zone. Increasing Reynolds number and lowering velocity ratio can be increase the rate of convective mass transfer.

Keywords :
Electroplating, turbulent jet, mass transfer

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 | ix |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR NOTASI..... | xi |
| 1. PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.3 Pembatasan Masalah | 2 |
| 1.4 Metodologi Penelitian | 3 |
| 1.5 Sistematika Penulisan..... | 4 |
| 2. DASAR TEORI..... | 5 |
| 2.1 Elektrokimia..... | 5 |
| 2.1.1 Konsep Elektrokimia..... | 5 |
| 2.1.2 Tembaga..... | 8 |
| 2.1.3 Larutan Elektrolit (CuSO ₄) | 9 |
| 2.2 Perpindahan Massa..... | 10 |
| 2.3 Karakteristik Aliran | 11 |
| 2.4 Aliran Separasi dan Bertaut Kembali | 14 |
| 2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD) | 15 |
| 3. METODE PENELITIAN..... | 18 |
| 3.1 Aktivitas Penelitian | 18 |
| 3.2 Deskripsi Alat dan Bahan..... | 19 |
| 3.3 Kalibrasi Submersible Pump..... | 31 |
| 3.4 Prosedur Pengambilan Data | 33 |
| 4. PENGOLAHAN DATA..... | 35 |
| 4.1 Perhitungan Bilangan Reynolds | 35 |
| 4.2 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa..... | 36 |
| 4.2.1 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Schimdt..... | 38 |
| 4.2.2 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood..... | 38 |
| 4.3 Permodelan CFD | 39 |
| 5. ANALISA DAN PEMBAHASAN..... | 41 |
| 5.1 Medan Aliran..... | 41 |
| 5.2 Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif..... | 44 |
| 5.3 Korelasi Bilangan Tak berdimensi | 46 |
| 6. KESIMPULAN..... | 48 |
| DAFTAR REFERENSI | 49 |
| Lampiran 1 : Data Penelitian..... | 50 |
| Lampiran 2 : Gambar Kerja Apparatus Penelitian..... | 53 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Skema elektrokimia..... | 6 |
| Gambar 2.2 | Jenis karakteristik aliran dalam pipa | 12 |
| Gambar 2.3 | Proses terjadinya separasi | 14 |
| Gambar 2.4 | Pola aliran separasi dan bertaut kembali akibat kontur tangga pada kanal aliran | 14 |
| Gambar 3.1 | Skema dari alat sel elektrokimia plat sejajar | 20 |
| Gambar 3.2 | Sel elektrokimia plat sejajar | 21 |
| Gambar 3.3 | Sel elektrokimia yang digunakan dalam penelitian | 22 |
| Gambar 3.4 | Posisi Mini Elektroda terhadap Katoda, (kiri) Penempatan Step Sebelum Katoda, (kanan) Mini Elektroda yang Telah Disambungkan dengan Kabel | 23 |
| Gambar 3.5 | Penampang Mini Elektroda terhadap Katoda | 24 |
| Gambar 3.6 | Terminal Switch Selector | 24 |
| Gambar 3.7 | Posisi <i>step</i> dalam kanal larutan elektrolit..... | 24 |
| Gambar 3.8 | Desain dari kanal aliran plat sejajar | 25 |
| Gambar 3.9 | Sel elektrokimia | 26 |
| Gambar 3.10 | Posisi pompa yang digunakan..... | 26 |
| Gambar 3.11 | Submersible pump..... | 27 |
| Gambar 3.12 | Power Supply dengan Multimeter untuk Mencatat Pembacaan Arus Listrik | 28 |
| Gambar 3.13 | Reservoir untuk menampung larutan CuSO_4 | 28 |
| Gambar 3.14 | Posisi flowmeter setelah pompa..... | 29 |
| Gambar 3.15 | Voltage Regulator | 29 |
| Gambar 3.16 | Digital multimeter yang digunakan dan <i>software</i> | 30 |
| Gambar 3.17 | Grafik hubungan antara kecepatan jet dan voltase..... | 32 |
| Gambar 4.1 | Model kanal..... | 39 |
| Gambar 4.2 | Grid domain | 40 |
| Gambar 5.1 | Pengaruh jet turbulen terhadap garis arus di medan aliran elektrolit pada Re 405 dan berbagai rasio kecepatan | 41 |
| Gambar 5.2 | Pengaruh jet turbulen terhadap garis arus di medan aliran elektrolit pada Re 1513 dan berbagai rasio kecepatan | 42 |
| Gambar 5.3 | Distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, km sepanjang arah aksial pada beberapa rasio kecepatan, V_r jet turbulensi ($re = 1513$) | 44 |
| Gambar 5.4 | Pengaruh bilangan Reynolds, Re pada distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, km sepanjang arah aksial ($V_r=2.1-2.2$) | 45 |
| Gambar 5.5 | Pengaruh rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi terhadap koefisien perpindahan massa maksimum, km max pada berbagai bilangan Reynolds | 46 |
| Gambar 5.6 | Plot skala log dari $Sh/Sc^{0.3}$ puncak terhadap bilangan Reynolds..... | 47 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabel 2.1 | Properties dari tembaga..... | 8 |
| Tabel 2.2 | Properties dari CuSO ₄ | 10 |
| Tabel 3.1 | Jarak Aksial Mini Elektroda terhadap Step..... | 23 |
| Tabel 3.2 | <i>Properties</i> pada tembaga dan larutan CuSO ₄ | 30 |
| Tabel 3.3 | Kecepatan jet pada nilai voltase yang berbeda..... | 32 |
| Tabel 3.4 | Nilai voltase pada debit utama yang berbeda..... | 32 |
| Tabel 4.1 | Nilai Re aliran utama dengan variasi debit aliran | 35 |
| Tabel 4.2 | Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 1513 | 36 |
| Tabel 4.3 | Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 2137 | 37 |
| Tabel 4.4 | Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada Re = 4789 | 38 |
| Tabel 4.5 | Data-data untuk memenuhi bilangan Sherwood | 39 |
| Tabel 4.6 | Kondisi simulasi aliran..... | 40 |
| Tabel 4.7 | Model turbulensi | 40 |

DAFTAR NOTASI

| Notasi | Keterangan | Dimensi |
|-----------|------------------------------|---------------------------|
| A | Luas permukaan pipa | m^2 |
| C | konsentrasi larutan | mol/m^3 |
| D | Koefisien Difusi | m^2/s |
| d | Diameter pipa | m |
| d_h | Diameter hidrolis | m |
| e | Muatan listrik per elektron | <i>Coulumb/ electron.</i> |
| F | Bilangan Faraday | C/mol |
| h | Tinggi step | m |
| I | Arus listrik DC | A |
| K_m | Koefisien massa | m/s |
| M_r | Berat molekul relatif | gr/mol |
| m | Massa zat | gr |
| N | Bilangan Avogadro | |
| P | Perimeter atau keliling pipa | m |
| Q | Debit aliran | m^3/s |
| Re | Bilangan Reynolds | |
| Sc | Bilangan Schmidt | |
| Sh | Bilangan Sherwood | |
| t | Waktu | s |
| <i>u</i> | Kecepatan fluida | m/s |
| V_r | Rasio kecepatan | |
| V_o | Kecepatan aliran utama | m/s |
| V_{jet} | Kecepatan aliran jet | m/s |
| z | Jumlah elektron valensi | |
| μ | Viskositas dinamik | kg/ms |
| <i>v</i> | Viskositas kinematik fluida | m^2/s |
| ρ | Kerapatan fluida | kg/m^3 . |

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri tiap tahun semakin pesat. Banyak teknologi-teknologi baru tercipta untuk menyelesaikan berbagai masalah yang ada. Pengembangan teknologi yang tepat guna sangat dibutuhkan agar mencapai mutu dan efisiensi yang lebih baik dari sebelumnya. Salah satu masalah penting dalam bidang industri saat ini adalah pengembangan teknik proses produksi dengan upaya untuk mendapatkan suatu metode manufaktur yang semakin efisien dan efektif yang mampu menghasilkan produk yang memenuhi standar mutu yang digunakan. Salah satu proses yang ada pada bidang manufaktur ialah elektroplating yang banyak diterapkan pada industri logam. Proses elektroplating merupakan suatu proses perpindahan massa antara dua elektroda (anoda dan katoda) dalam larutan elektrolit. Elektroplating digunakan dengan banyak tujuan seperti untuk meningkatkan nilai fungsi produk ataupun yang sifatnya dekoratif. Pada 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 alumunium bola lampu dapat menjadi nilai tambah estetika.

Dalam industri proses elektroplating, beberapa teknik telah dikembangkan dan dipatenkan. Oduoza, et.al [1997] mengkaji perpindahan massa yang terjadi pada proses elektroplating dengan kontrol turbulensi berupa *wall obstruction* dengan konfigurasi tinggi *fence* dan *step*. Dari penelitiannya disimpulkan bahwa distribusi dan besarnya nilai perpindahan massa ditentukan oleh turbulensi dari aliran elektrolit. Chen [2001] menemukan teknik pendepositan 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 masih banyak penelitian yang membahas tentang proses elektroplating, namun hanya sedikit peneliti yang memanfaatkan

kontrol turbulensi aktif menggunakan jet turbulen yang menginjeksikan aliran pada daerah pembesaran mendadak untuk mempengaruhi intensitas turbulensi aliran utama sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan massa konvektif antara dua elektroda pelat sejajar dalam suatu kanal elektrolit.

Laju perpindahan massa antara dua elektroda dapat dipengaruhi oleh efek turbulensi pada aliran, sehingga pengontrolan terhadap tingkat turbulensi yang diberikan pada aliran dimungkinkan dapat meningkatkan laju perpindahan massa yang terjadi sehingga proses elektroplating dapat selesai dalam waktu yang lebih singkat dan dapat menghemat penggunaan listrik. Pengembangan suatu teknik kontrol turbulensi sangat dibutuhkan. Berbagai metode seperti pemanfaatan kontrol turbulensi aliran secara aktif yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali (*separated-reattached flow*) banyak menarik perhatian para peneliti untuk mengkaji lebih dalam. 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 dari penelitian ini adalah untuk memperoleh karakteristik laju perpindahan massa konvektif dengan menggunakan kontrol turbulensi aktif berupa injeksi aliran dengan jet turbulen pada berbagai variasi parameter bilangan Reynolds dan rasio kecepatan antara aliran utama dan aliran jet. Penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan model kontrol turbulensi aktif dengan umpan balik.

1.3 Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini pembatasan masalah meliputi :

1. Proses elektroplating menggunakan logam Tembaga (Cu) sebagai elektroda dan larutan CuSO_4 sebagai elektrolitnya.
2. Voltage yang diberikan sebesar ± 600 mV,
3. Penggunaan kontrol aktif dengan injeksi fluida menggunakan jet turbulen dan *submersible pump*

4. Pengambilan data dengan menggunakan variasi rasio kecepatan dan variasi debit pada aliran sebesar 2 LPM (pada $V_r = 2, 2.2, \text{ dan } 2.6$), 2.5 LPM (pada $V_r = 1.5 \text{ dan } 2.1$), dan 5.25 LPM (pada $V_r = 0.7 \text{ dan } 1$)

1.4 Metodologi Penelitian

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

1. Formulasi masalah
2. Model dan variabel penelitian
 - Model penelitian
Sel elektrokimia plat sejajar dalam kanal aliran elektrolit CuSO_4
 - Variabel penelitian
Kecepatan aliran utama larutan elektrolit ($Re = 1500- 4800$), dan rasio kecepatan ($V_r = 0.7 - 2.6$)
3. Teknik pengumpulan data
Pengukuran laju perpindahan massa dengan teknik *limiting diffusion current* berdasarkan arus listrik dari reaksi reduksi katoda: $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$
4. Teknik pengolahan data
Data diakuisisi dengan sistem terkomputerisasi diolah lanjut dengan menggunakan perangkat lunak.
5. Analisis hasil dan Interpretasi data
 - Korelasi empiris yang menunjukkan pengaruh berbagai parameter yang dinyatakan dalam berbagai bilangan tak berdimensi terhadap peningkatan laju perpindahan massa:
 - Analisa distribusi koefisien perpindahan massa konvektif pada berbagai bilangan Reynolds dan pada rasio kecepatan yang berbeda.
 - Korelasi empiris antar bilangan Sherwood, bilangan Schmidt dan bilangan Reynolds.
6. Generalisasi dan Rekomendasi
 - Kondisi optimum bagi setiap parameter terkait dengan laju perpindahan massa.
 - Model praktis berorientasi aplikasi proses elektroplating di Industri.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dalam urutan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

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

BAB II : DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan konsep dasar peristiwa elektroplating, perpindahan massa, karakteristik aliran turbulen dan aliran pada *backstep*, dan konsep dasar CFD

BAB III : METODE PENELITIAN

Bagian ini memaparkan urutan proses instalasi alat uji, proses kalibrasi *submersible pump*, persiapan pengujian, tahap pengujian, serta prosedur pengambilan data.

BAB IV : PENGOLAHAN DATA

Bab ini memaparkan data hasil penelitian, perhitungan dan pengolahan dari data yang telah diambil dari pengujian. Hasil pengolahan akan ditampilkan dalam bentuk tabel.

BAB V : ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa hasil pengujian yang disajikan adalah dalam bentuk gambar simulasi dan grafik.

BAB VI : KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.

BAB 2 DASAR TEORI

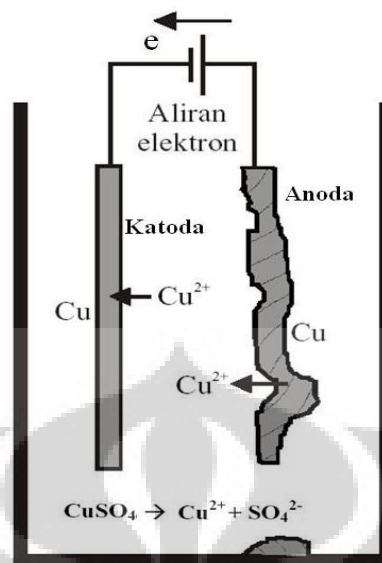
2.1 Elektrokimia

Barang-barang logam yang dibuat, dibentuk, dicetak hingga menjadi wujud yang dikehendaki membutuhkan tahap penyelesaian atau finishing. Pada tahap ini terdapat bermacam-macam jenis, dari sekedar dipoles agar halus dan mengkilap, melapisi dengan logam lain agar sifatnya berubah, atau hanya sekedar dicat atau dipernis. Elektroplating merupakan salah satu metode yang digunakan dalam finishing yang diperlukan bagi logam. Tujuan elektroplating adalah untuk mencegah korosi pada logam yang mudah mengalami korosi dan juga berfungsi dekoratif agar logam tetap mengkilat cemerlang sehingga indah dilihat. Terkadang elektroplating juga digunakan agar sifat termal, magnetik dan konduktor dapat digunakan pada suatu logam. Alasan ekonomis, kekuatan dan keawetan juga kerap dikemukakan.

2.1.1 Konsep Elektrokimia

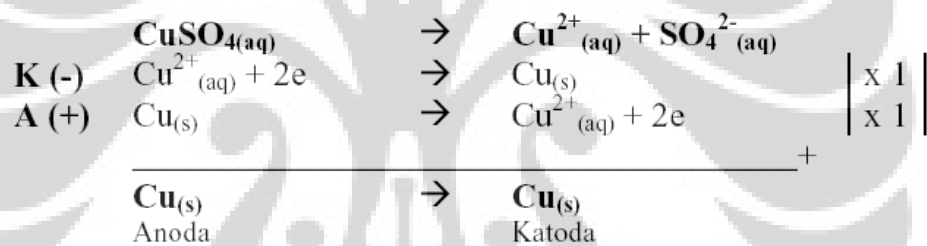
Pada Pada elektroplating terdapat elektroda yang bermuatan negatif disebut katoda dan elektroda yang bermuatan positif disebut anoda. Jika sebuah baterai (DC) memberi muatan yang berbeda pada kedua elektroda yang dicelupkan kedalam larutan. Ion positif dalam larutan akan bergerak menuju katoda yang bermuatan negatif untuk mengambil elektron. Sementara itu, ion negatif (anion) bergerak menuju anoda yang bermuatan positif dan melepas elektron. Selanjutnya elektron yang dilepaskan ini akan dialirkan ke katoda melalui baterai.

Berdasarkan proses perubahan energi yang terjadi sel elektrokimia dibagi menjadi dua yaitu; Sel Volta (sel galvanis) dan Sel Elektrolisis. Gambar 2.1 menjelaskan secara skematik proses elektrolisis yang terjadi pada kedua plat tembaga dengan larutan CuSO_4 .



Gambar 2.1 Skema elektrokimia

Berikut ini merupakan reaksi yang terjadi pada proses elektrolisis di gambar 2.1 :



Elektroplating dilandasi oleh peristiwa elektrokimia yang mengubah energi listrik ke energi kimia, yang dirintis oleh Michael Faraday (1791-1867). Salah satu penerapan elektrokimia tersebut adalah elektrolisis. Pada elektrolisis ini terdapat Hukum Faraday yaitu :

Hukum 1 Faraday :

“Jumlah massa dari zat kimia yang diproduksi pada elektrode selama elektrolisis adalah sebanding dengan kuat arus listrik yang mengalir pada elektrolisis tersebut.”

Kemudian dari hukum Faraday diatas diperoleh rumus :

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M_r}{F \cdot z} \quad (2.1)$$

Hukum 2 Faraday :

"Massa dari macam-macam zat yang diendapkan pada masing-masing elektroda (terbentuk pada masing-masing elektroda) oleh sejumlah arus listrik yang sama banyaknya akan sebanding dengan berat ekuivalen masing-masing zat tersebut."

$$m_1:m_2 = e_1:e_2 \quad (2.2)$$

Dalam elektrokimia ini terdapat konstanta Faraday, yaitu jumlah muatan listrik dalam satu mol elektron.

$$F = N \cdot e \quad (2.3)$$

N menjelaskan bilangan Avogadro sebesar 6.02×10^{23} /mol, e adalah jumlah muatan listrik untuk satu electron sebesar 1.602×10^{-19} Coulomb/elektron. maka, nilai F yang diperoleh adalah

$$F = (6.02 \times 10^{23}) \times (1.602 \times 10^{-19})$$

$$F = 96487 C/mol$$

Untuk memperoleh nilai koefisien perpindahan massa (m/s), maka persamaan 2.1 dapat diubah dengan mensubstitusikan nilai-nilai dari parameter *density* dan luas bidang sebagai berikut :

$$K_m = \frac{m}{\rho A t} = \frac{I \cdot t \cdot M_r}{F \cdot z} \times \frac{1}{\rho A t} \quad (2.4)$$

Hubungan antara density, berat molekul dan konsentrasi larutan adalah :

$$\rho = C \cdot M_r \quad (2.5)$$

Sehingga dari persamaan 2.5 dapat disubstitusi ke persamaan 2.4 dan diperoleh persamaan:

$$K_m = \frac{I}{z F A C} \quad (2.6)$$

2.1.2 Tembaga

Tembaga memiliki sifat liat, lunak dan ulet namun jika teroksidasi oleh udara akan membentuk patina (hijau) terdiri atas hidroksokarbonat dan hidroksosulfat. Reaksinya dengan sulfide akan membentuk tarnish(bercak) yang menyulitkan untuk disolder sehingga tembaga masih sering diplat timah. 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 cukup baik maka tembaga sering digunakan untuk pelapisan yang menginginkan sifat konduktor pada logam. Tembaga memiliki dua senyawa : kupro atau tembaga (I) dan kupri atau tembaga (II).

Tabel 2.1 Properties dari tembaga

| | |
|---|---|
| <p>29 nickel ← copper → zinc</p> <p>-</p> <p>↑  Cu  29P 35N</p> <p>↓ Cu</p> <p>Ag Periodic table - Extended periodic table</p> | |
| General | |
| Nama, symbol, nomor atom | copper, Cu, 29 |
| Kelompok kimia | Logam Transisi |
| Grup, period, blok | 11, 4, d |
| Penampilan | Logam merah kecoklatan  |
| Berat Atom | 63,546 g·mol ⁻¹ |
| Konfigurasi elektron | [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹ |
| Elektron per sel | 2, 8, 18, 1 |
| Physical properties | |
| Fase | solid |
| Berat jenis (density) | 8.96 g·cm ⁻³ |



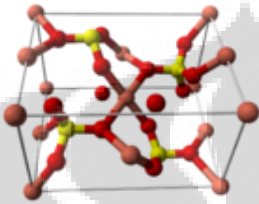
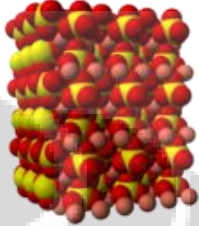
| | |
|-------------------------------|--|
| Berat jenis kondisi cair | $8.02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
| Titik Lebur | 1357.77 K ($1084.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $1984.32 \text{ }^{\circ}\text{F}$) |
| Titik Didih | 2835 K ($2562 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $4643 \text{ }^{\circ}\text{F}$) |
| Kapasitas kalor | ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) $24.440 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| Miscellaneous | |
| <i>Electrical resistivity</i> | ($20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) $16.78 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ |
| <i>Thermal conductivity</i> | (300 K) $401 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| Expansi Thermal | ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) $16.5 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| <i>Young's modulus</i> | 110 - 128 GPa |
| <i>Shear modulus</i> | 48 GPa |

2.1.3 Larutan Elektrolit (CuSO_4)

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.

Tabel 2.2 Properties dari CuSO₄

| CuSO₄ | |
|---|---|
|  |  |
|  |  |
| Nama IUPAC | Copper(II) sulfate pentahydrate |
| Nama Lain | Copper(II) sulfate Copper(II)sulphate Cupric sulfate Blue vitriol Bluestone Chalcanthite |
| <i>Properties</i> | |
| Molekul | CuSO ₄ ·5H ₂ O (pentahydrate) CuSO ₄ (anhydrous) |
| Berat molar | 249.7 g/mol (pentahydrate) 159.6 g/mol (anhydrous) |
| Tampilan | Kristal biru (pentahydrate) bubuk abu-abu (anhydrous) |
| Titik didih | 110 °C (– 4H ₂ O) 150 °C (423 K) (– 5H ₂ O) |

2.2 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. Persamaan yang digunakan untuk perpindahan massa adalah

$$\dot{M} = K_m A (\Delta C) \quad (2.7)$$

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 ratio dari momentum dan *mass diffusivities* yang menjelaskan pengukuran dari efektifitas momentum dan perpindahan massa dengan difusi dalam kecepatan dan lapisan batas konsentrasi. Persamaan untuk bilangan Schmidt adalah

$$Sc = \frac{v}{D} = \frac{\mu}{\rho D} \quad (2.8)$$

Bilangan Sherwood merupakan bilangan yang menyatakan gradien konsentrasi pada permukaan yang dapat digunakan untuk menghitung konveksi perpindahan massa.

$$Sh = \frac{K_m d}{D} \quad (2.9)$$

Korelasi antara ketiga bilangan tak berdimensi tersebut dinyatakan sebagai berikut

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.10)$$

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

2.3 Karakteristik Aliran

Aliran fluida dalam sebuah pipa bisa berbentuk aliran laminar 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 pewarna yang mengambang.

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:

$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (2.11)$$

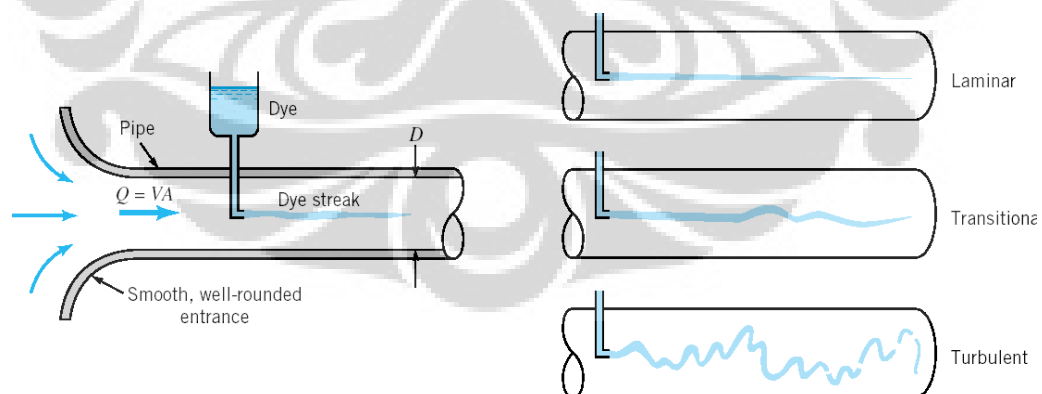
Dalam aliran pipa debit aliran atau *flowrate* menyatakan banyaknya volum cairan yang dipindahkan per satuan waktu. Berikut adalah persamaan yang digunakan

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

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds merupakan perbandingan dari gaya inersia ($u\rho$) dengan gaya viskos (μ/d) dan oleh karena itu hal ini mengukur pentingnya kedua gaya tersebut pada kondisi aliran yang diberikan. Maka bilangan Reynolds digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran, seperti aliran laminar atau aliran turbulen. Bilangan Reynolds dinyatakan dengan:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (2.13)$$

Aliran fluida dalam pipa memiliki tiga karakteristik yaitu aliran laminar, aliran transisi dan aliran turbulen. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Jenis karakteristik aliran dalam pipa

Kisaran bilangan Reynolds untuk menentukan aliran dalam pipa yang laminar, turbulen dan transisi tidak dapat ditentukan dengan tepat. Karena banyak

parameter yang mempengaruhi. Batasan bilangan Reynolds yang umum digunakan adalah nilai bilangan Reynolds kurang dari 2100 merupakan aliran laminar dan nilai bilangan Reynolds lebih dari 400 merupakan aliran turbulen. Untuk bilangan Reynolds diantara bilangan tersebut merupakan aliran transisi.

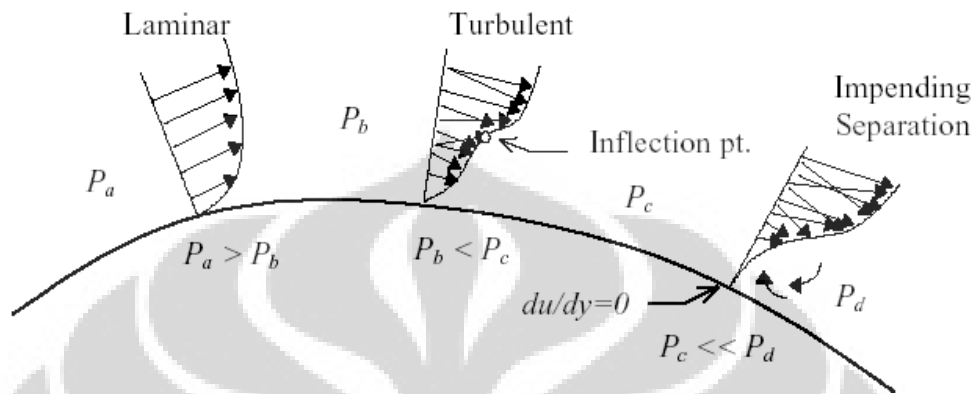
Karakteristik aliran turbulen adalah aliran yang acak dan tidak beraturan. Karena karakteristiknya maka aliran turbulen memiliki kelebihan dalam proses pencampuran dan proses perpindahan kalor dan massa. Hal ini disebabkan oleh adanya keacakan mikroskopik dalam aliran turbulen. Pencampuran acak ukuran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

Aliran yang melalui benda tumpul mengalami karakteristik yang bervariasi sesuai bilangan Reynolds. Semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin kecil efek viskos yang menjadi penting didalam medan aliran. Dengan bilangan Reynolds yang kecil pola garis arus sama didepan dan dibelakang benda. Untuk bilangan Reynolds yang meningkat, daerah didepan benda dimana efek viskos penting menjadi lebih kecil. Efek viskos dikonveksikan ke hilir sehingga aliran kehilangan kesimetrisannya. Efek inersia benda menjadi sedemikian besar sehingga tidak dapat mengikuti lintasan melengkung dibelakang benda. Hasilnya terbentuk gelembung separasi dibelakang benda dimana sebagian fluida sesungguhnya mengalir ke hulu, melawan arah dimana aliran mengalir ke hilir. Pada aliran bilangan Reynolds yang besar, daerah yang dipengaruhi oleh gaya viskos terdorong ke hilir sampai melibatkan lapisan batas tipis di bagian depan silinder dan daerah olakan yang tak beraturan yang membentang sampai jauh ke hilir. Gradien kecepatan pada bagian daerah olakan dan lapisan batas jauh lebih besar daripada daerah lainnya di medan aliran.

Kontrol turbulensi dapat menggunakan metode kontrol aktif atau metode kontrol pasif. Kontrol aktif adalah kontrol turbulensi yang diberikan kepada aliran dengan menambahkan energi atau gangguan dari luar yang mengakibatkan aliran tersebut mengalami perubahan karakteristik seperti yang telah dilakukan oleh Yang dan Huang [1998] memberikan gangguan jet tambahan pada aliran *backstep* untuk mempengaruhi intensitas turbulensi aliran. Kontrol pasif adalah kontrol yang diberikan kepada aliran dimana tidak ada energi atau gangguan dari luar yang

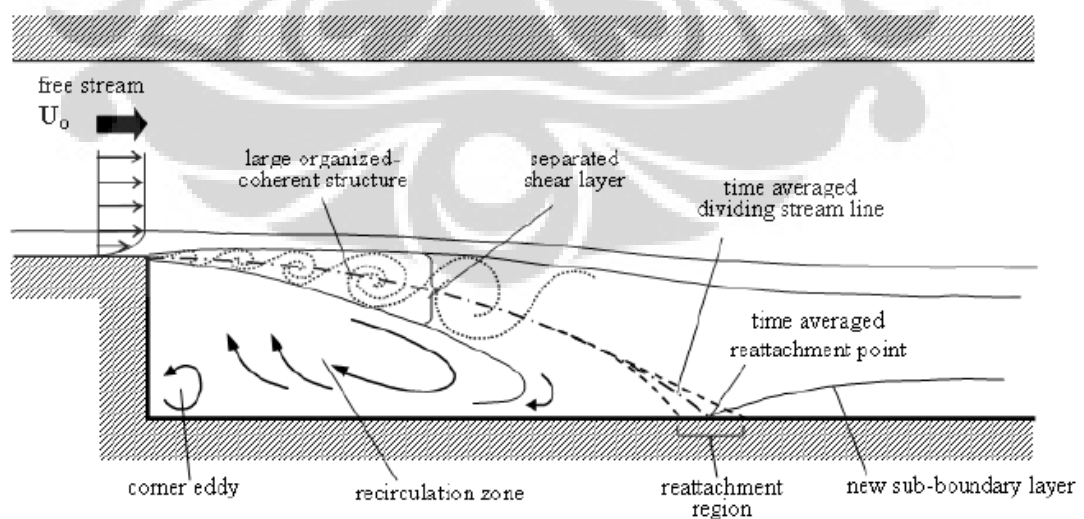
dapat diberikan untuk mengubah karakteristik aliran selain dari kontrol pasif tersebut.

2.4 Aliran Separasi dan Bertaut Kembali



Gambar 2.3 Proses terjadinya separasi

Gambar 2.3 mengilustrasikan bagaimana gradien tekanan yang tidak baik menyebabkan separasi dengan menghasilkan titik infleksi pada profile kecepatan lapisan batas. Pada aliran menanjak, gradien tekanan masih baik sehingga aliran terus terdorong. Akan tetapi ketika melewati puncak, aliran terdorong kebelakang dan akhirnya berseparasi. Aliran biasanya beralih ke turbulen pada gradien tekanan yang tidak baik, yang bisa membantu melawan separasi yang terjadi.



Gambar 2.4 Pola aliran separasi dan bertaut kembali akibat kontur tangga pada kanal aliran

Aliran dalam suatu kondisi mempunyai karakteristik *boundary layer* dan harga *vorticity* tertentu yang hanya dipengaruhi oleh viskositas fluida dengan permukaan benda yang halus. Pada daerah tipis yang berdekatan dengan permukaan benda, efek viskositas sangat penting. Pada daerah ini terjadi gesekan antara lapisan fluida yang berdekatan dengan permukaan benda dengan permukaan benda itu sendiri.

Gesekan ini menimbulkan tegangan geser yang meningkatkan *vorticity* pada daerah antara *boundary layer* dengan permukaan benda sehingga *boundary layer* cepat berkembang. Karakteristik *boundary layer* dan *vorticity* yang terjadi sangat mempengaruhi besarnya *losses* yang terjadi dalam aliran internal yang terlihat dengan adanya *pressure drop*.

Intensitas turbulensi dan *shear stress* mencapai nilai maksimal pada daerah reattachment [Kim, 1980]. Aliran dekat reattachment tidak tetap, seketika itu juga reattachment point juga tidak tetap tetapi berpindah dengan jarak tertentu

2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD merupakan teknik komputasi yang telah banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan fluida di bidang engineering yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia. Melalui pendekatan metode volum hingga dengan berbagai persamaan-persamaan yang mengaturnya, CFD telah banyak dikembangkan sebagai tool yang handal. Banyak *Software* yang telah berkembang hingga saat ini, mulai dari *Fluent* hingga *EFD LAB 8* dengan berbagai macam aplikasi yang berbeda. Walaupun begitu, pada dasarnya CFD terdiri dari 3 langkah :

1. Preprocessor

Merupakan tahapan awal yang harus dilalui pada saat menjalankan CFD. Pada tahap ini dilakukan geometri modelling, meshing, penentuan boundary condition, dan penentuan flow properties.

Geometri modelling adalah membuat gambaran sistem yang akan dianalisis. Step ini biasanya dilakukan dengan software cad lalu di import ke

software cfd. Namun pada beberapa software yang ada kedua software ini telah digabung menjadi satu. Meshing dilakukan untuk membagi sistem menjadi elemen-elemen yang lebih kecil sehingga bisa diselesaikan dengan metode numerik pada tahap processor. Meshing biasanya dilakukan oleh mesh generator dan pada beberapa software paket ini pun telah digabung menjadi satu. Jenis mesh yang akan dipilih pada tahap ini sangat dipengaruhi oleh geometri sistem.

Penentuan boundary condition atau kondisi batas dilakukan untuk memberikan informasi yang jelas untuk diolah pada saat processor. Penentuan kondisi batas ini berupa penentuan tekanan, kecepatan, dan suhu dari fluida saat masuk sistem atau pada saat keluar dari sistem atau bisa juga pada kedua-duanya. Penentuan Flow Properties berupa pendefinisian jenis fluida yang digunakan dan jenis analisis ataupun pemilihan equation yang akan digunakan pada system

2. Solver

Solver merupakan modul untuk memecahkan permasalahan yang telah didefinisikan oleh Preprocessor. Pada tahap ini dilakukan perhitungan dari masukkan yang telah didapat pada tahap pre-processor. Langkah ini merupakan step yang paling banyak memakan waktu. Lamanya waktu penyelesaian proses ini tergantung dari meshing yang dilakukan, besarnya sistem dan juga kemampuan dari komputer yang mengolah.

3. Postprocessor

Merupakan visualisasi hasil dari solusi yang diberikan solver, baik dengan grafik maupun gradasi warna. Nilai-nilai numerik diolah agar pengguna dapat dengan mudah membaca dan menganalisis hasil-hasil perhitungan CFD.

Pada tahap ini dilakukan interpretasi dari data numerik yang dihasilkan dari step sebelumnya, biasanya berupa simulasi dari aliran yang terjadi ataupun distribusi dari kecepatan, suhu ataupun tekanan dari fluida yang dianalisis.

Keunggulan teknik analisis dibandingkan dengan pendekatan eksperimen dalam sebuah desain system fluida yaitu :

1. Penghematan waktu dan biaya untuk menganalisa desain baru

2. Kemampuan studi system yang tidak mampu dikontrol dengan eksperimen (misal sistem yang sangat luas)
3. Kemampuan studi system dalam kondisi berbahaya pada dan di luar batas kinerja normal (seperti pada studi keselamatan dan scenario kecelakaan)
4. Bisa mendapatkan detail hasil yang lebih banyak secara praktis



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Aktivitas Penelitian

Metode penelitian yang digunakan merupakan sebuah kajian eksperimental dengan rangkaian urutan aktivitas sebagai berikut:

➤ Kajian Pendahuluan

Merupakan kegiatan studi literatur yang terkait dengan subjek penelitian dan perencanaan serta perancangan kanal elektroplating.

➤ Kegiatan Eksperimental

1. Pembuatan atau modifikasi sistem aliran kanal tertutup dan pembuatan model eksperimental kanal elektroplating yang dipasang vertikal pada sebuah rangka. Sistem aliran tersebut dilengkapi pengontrol laju aliran berupa flowmeter.
2. Pembuatan sistem pemipaan yang tertutup agar larutan terus mengalir.
3. Persiapkan sumber listrik yang berasal dari tegangan AC diubah ke DC dengan *power supply*. *Power supply* yang digunakan ada dua, untuk pompa aliran utama dan *submersible pump*.
4. Pemasangan sistem sensor arus berupa kabel yang disisipkan pada katoda. Sistem ini dilengkapi dengan switch selector.
5. Persiapan larutan elektrolit CuSO_4 dengan mempertimbangkan konsentrasinya untuk mendapatkan sifat-sifat fisika yang memungkinkan eksperimen dapat berlangsung baik (densitas dan viskositas yang memudahkan pengontrolan aliran serta diffusivitas ion yang memadai untuk pengukuran arus listrik).
6. Pengukuran laju perpindahan massa dilakukan dengan teknik pengukuran *limiting diffusion current* [Runchall, 1971] berdasarkan arus listrik dari reaksi reduksi katoda ($\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$). Pengukuran dilakukan dengan menggunakan suatu sistem akuisisi data yang terkomputerisasi dengan bantuan alat digital multimeter.

7. Pengukuran dilakukan dalam berbagai kecepatan aliran elektrolit ($Re = 1500- 4800$) dan pada variasi rasio kecepatan antara saluran utama dan saluran jet.

➤ Pengolahan dan Analisis data

Data yang diperoleh diproses dan diplot dalam berbagai grafik yang dapat memberikan informasi - informasi penting antara lain:

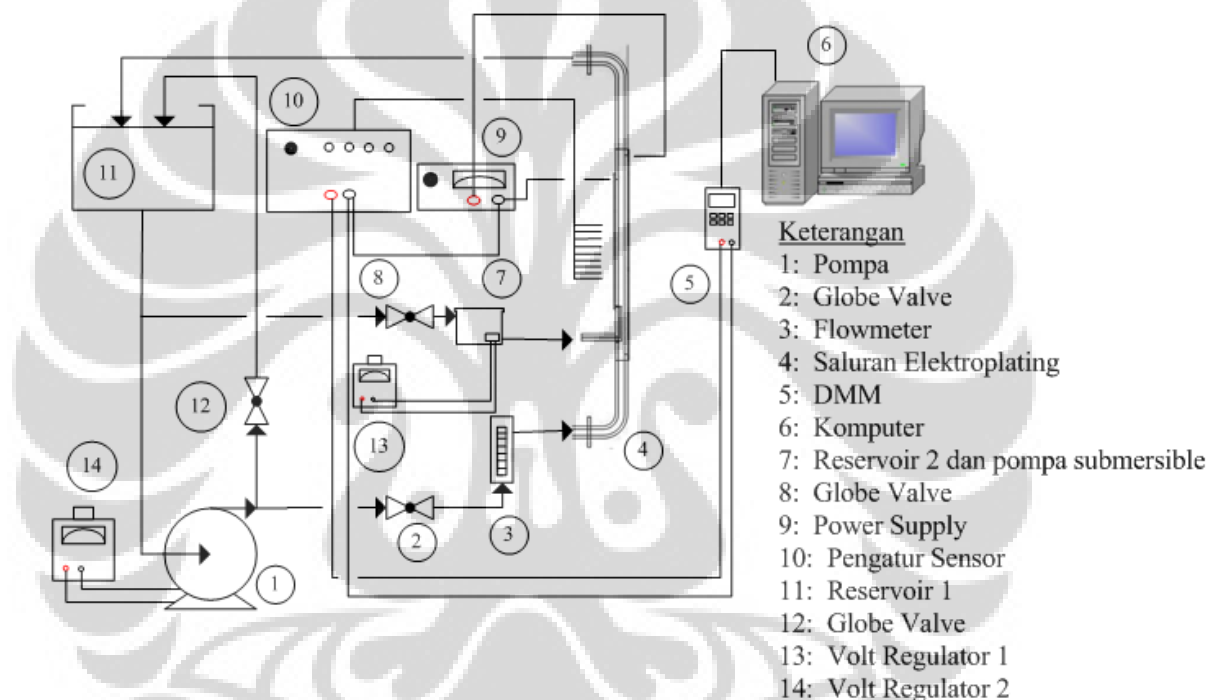
- Besar maksimum koefisien perpindahan massa dan lokasinya pada berbagai bilangan Reynolds dan rasio kecepatan.
- Persebaran koefisien perpindahan massa berdasarkan jarak aksial terhadap *backstep*
- Menentukan korelasi empiris antar parameter yang dinyatakan dalam hubungan antara bilangan Sherwood (Sh), bilangan Schmidt (Sc) dan bilangan Reynolds (Re)

➤ Hasil-hasil berupa grafik dan korelasi yang diperoleh dibandingkan dengan hasil penelitian dengan kontrol turbulensi pasif yang telah dilakukan peneliti-peneliti sebelumnya untuk memvalidasi hasil yang diperoleh

3.2 Deskripsi Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini merupakan alat baru yang harus dibuat terlebih dahulu. Sistem aliran dirancang sehingga memungkinkan larutan elektrolit mengalir melewati kanal vertikal dari akrilik dengan sepasang pelat tembaga sejajar yang berfungsi sebagai elektroda. Alat ini menggunakan sistem tertutup dimana aliran elektrolit yang keluar kemudian dialirkan kembali ke sel elektrokimia. Cara kerja alat ini adalah mengalirkan larutan yang berasal dari reservoir besar menggunakan pompa melalui sistem pemipaan yang dilengkapi dengan pengatur debit seperti katup bypass dan flowmeter. Aliran dari reservoir bercabang dua, sebagian besar melewati aliran utama, yang lainnya melewati *submersible pump* ke arah jet turbulen. Pada aliran utama, debit aliran diukur menggunakan flowmeter sebelum memasuki sel elektrokimia. Namun pada aliran jet turbulen, debit aliran diatur dengan penyetelan pada volt regulator sesuai dengan data kalibrasi yang telah dilakukan. Sel elektrokimia ini terdapat dua plat

tembaga sejajar yang dipasang sebagai anoda dan katoda untuk dialiri arus listrik dari *power supply* DC. Pada plat katoda ini terdapat 48 titik mikroelektrode yang akan disambungkan ke terminal untuk kemudian dilanjutkan ke *digital multimeter* sebagai data akuisisi yang terhubung dengan komputer. Didalam sel elektrokimia terdapat pencetus turbulen berupa kontur tangga (*backstep*) yang dimodifikasi dengan membuat lubang jet turbulen dibagian depan *backstep* sejajar dengan aliran utama. Penelitian dilakukan dalam suatu sistem aliran elektrolit seperti yang ditunjukkan secara skematik pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema dari alat sel elektrokimia plat sejajar



Gambar 3.2 Sel elektrokimia plat sejajar

Proses pengambilan data untuk penelitian ini menggunakan data akuisisi melalui digital multimeter. Pengambilan data pada alat ini meliputi :

1. Mengatur nilai voltage pada power supply sekitar 600 mV
2. Menentukan debit aliran melalui flowmeter yang diatur melalui *valve* dan mengatur putaran pompa dengan *voltage regulator*.
3. Pengambilan nilai arus pada mikroelektrode pada setiap titik menggunakan digital multimeter

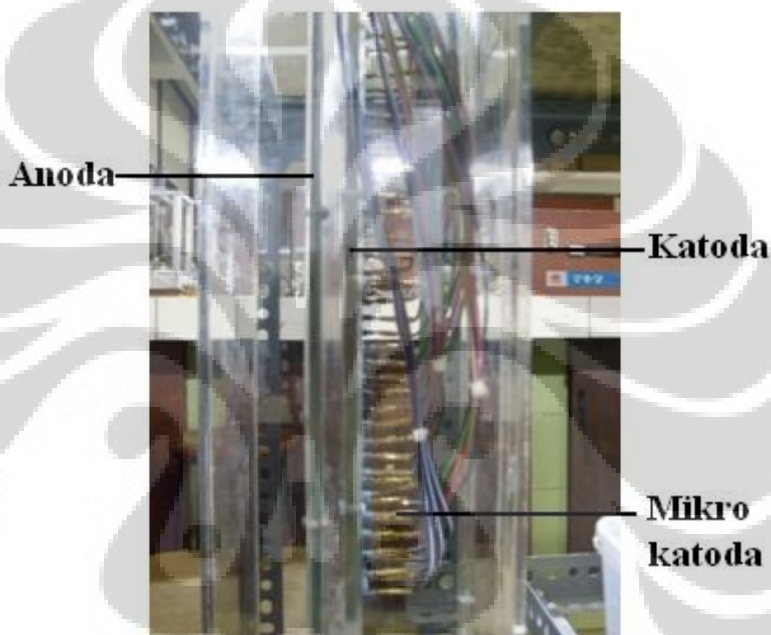
Pada alat ini terdapat beberapa komponen yang bekerja sebagai satu kesatuan sehingga alat ini dapat bekerja dengan baik. Komponen-komponen tersebut adalah :

1. Sel Elektrokimia

Merupakan komponen inti yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya elektrolit diantara dua buah plat tembaga yang dipasang sejajar vertikal. Terdiri dari dua elektroda yang terbuat dari tembaga. Anoda dengan dimensi 410mm x 40mm x 5mm dan katoda dengan dimensi 390mm x 40mm x 5mm. Jarak antara kedua elektroda yaitu 10mm. Kedua elektroda ini ditempel ke akrilik dengan silikon dan dibaut untuk menghindari kebocoran. Pada sel elektrokimia ini terdapat beberapa bagian penting yaitu:

a. Katoda dan Anoda (makroelektroda)

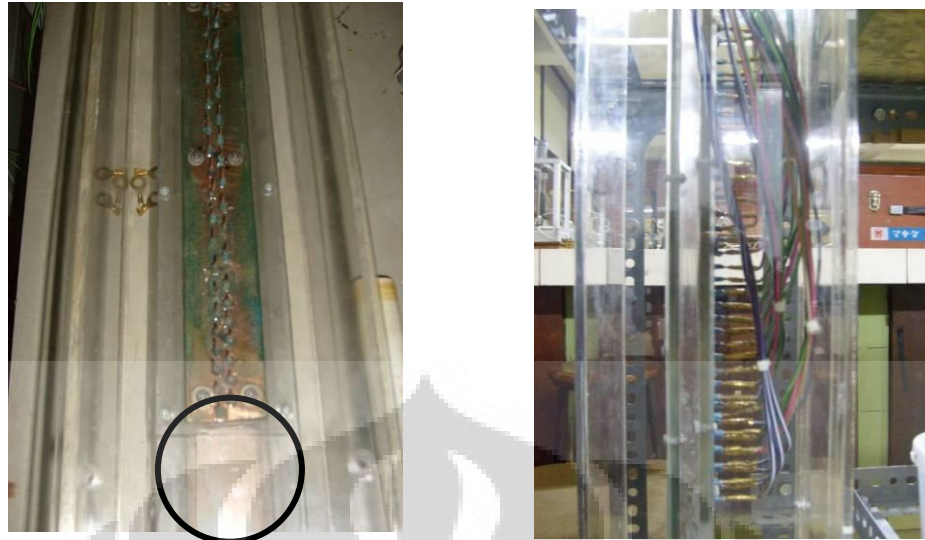
Katoda dan Anoda ini berfungsi sebagai elektroda yang menghantarkan listrik dari *power supply* agar larutan elektrolit mampu menghantarkan ion. Katoda berfungsi untuk menghantarkan arus positif dan anoda berfungsi sebagai arus negatif yang menangkap elektron dari katoda melalui larutan elektrolit. Makroelektrode ini terbuat dari tembaga. Kedua bagian ini dipasang disisi sel elektrokimia yang kemudian dibaut dan ditempel menggunakan silikon untuk menghindari terjadinya kebocoran yang dapat mempengaruhi data yang diperoleh.



Gambar 3.3 sel elektrokimia yang digunakan dalam penelitian

b. Mikroelektrode

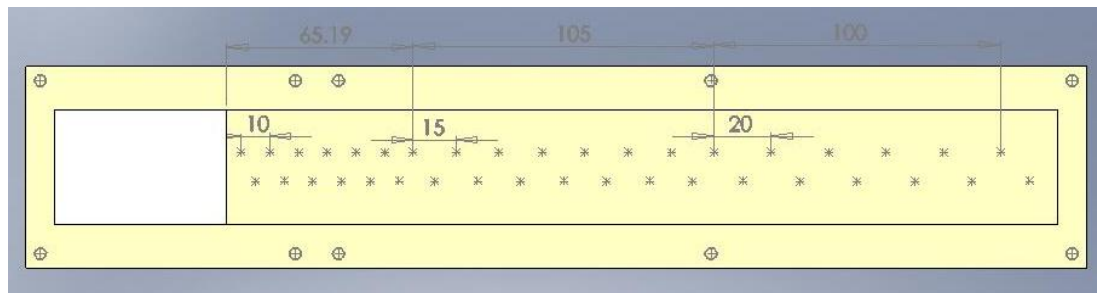
Pada katoda terdapat 38 titik mikroelektrode yang terbuat kabel tembaga berdiameter 1.5 mm^2 yang dilapisi isolator agar tidak terhubung dengan makroelektrode, tersusun paralel dan bersilang agar memudahkan dalam pemasangannya. Jarak antara minielektroda ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.4 Posisi Mini Elektroda terhadap Katoda, (kiri) Penempatan Step Sebelum Katoda, (kanan) Mini Elektroda yang Telah Disambungkan dengan Kabel

Tabel 3.1 Jarak Aksial Mini Elektroda terhadap Step

| Titik | Jarak Aksial [mm] | Titik | Jarak Aksial [mm] |
|-------|-------------------|-------|-------------------|
| 1 | 5 | 20 | 117.5 |
| 2 | 10 | 21 | 125 |
| 3 | 15 | 22 | 132.5 |
| 4 | 20 | 23 | 140 |
| 5 | 25 | 24 | 147.5 |
| 6 | 30 | 25 | 155 |
| 7 | 35 | 26 | 162.5 |
| 8 | 40 | 27 | 170 |
| 9 | 45 | 28 | 180 |
| 10 | 50 | 29 | 190 |
| 11 | 55 | 30 | 200 |
| 12 | 60 | 31 | 210 |
| 13 | 65 | 32 | 220 |
| 14 | 72.5 | 33 | 230 |
| 15 | 80 | 34 | 240 |
| 16 | 87.5 | 35 | 250 |
| 17 | 95 | 36 | 260 |
| 18 | 102.5 | 37 | 270 |
| 19 | 110 | 38 | 280 |



Gambar 3.5 Penampung Mini Elektroda terhadap Katoda

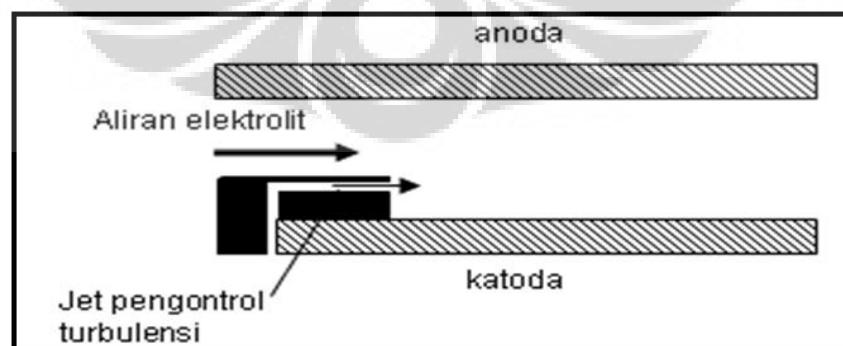


Gambar 3.6 Terminal Switch Selector

Mikroelektrode ini nantinya akan terhubung dengan terminal-terminal yang terdapat pada *switch selector* kemudian disambungkan ke digital multimeter.

c. Step dan jet pengontrol turbulensi

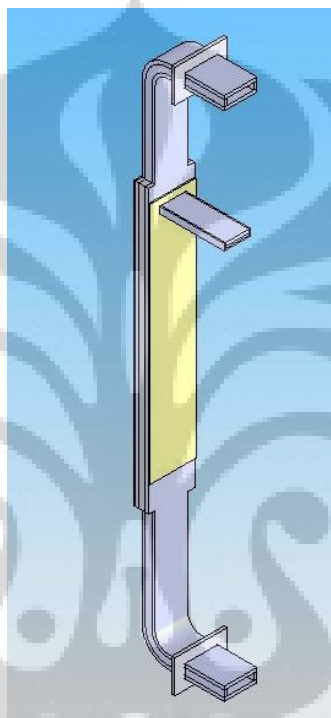
Digunakan untuk menciptakan aliran turbulen pada sistem aliran elektrolit. Tinggi ukuran *step* ini adalah 5 mm. Jarak antara anoda dan katoda adalah 10 mm. lubang output jet berdimensi 1mm x 36 mm.



Gambar 3.7 Posisi *step* dalam kanal larutan elektrolit

d. Kanal aliran plat sejajar

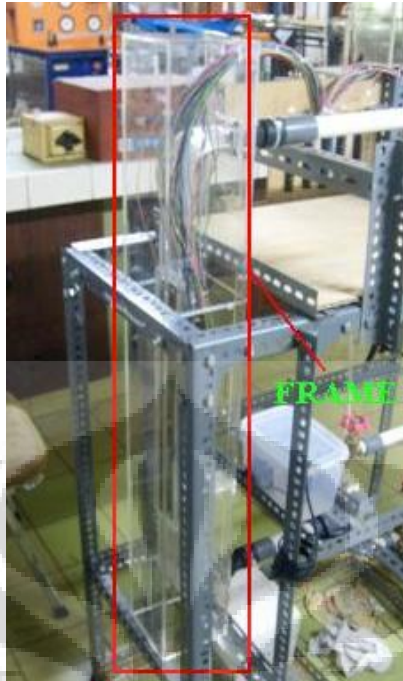
Saluran yang terbuat dari *acrylic* ini berfungsi untuk mengalirkan elektrolit agar mampu lewat diantara plat anoda dan plat katoda yang terbuat dari tembaga ini. Pada saluran ini terdapat dua lubang di setiap sisi untuk menempatkan katoda dan anoda. Saluran ini dilapisi dengan silikon untuk mencegah agar larutan elektrolit tidak bocor.



Gambar 3.8 Desain dari kanal aliran plat sejajar

e. Frame

Frame berfungsi untuk menahan dan menampung bocoran dari saluran elektrolit dan juga berfungsi sebagai pondasi dari saluran plat sejajar. Frame ini terbuat dari bahan *acrylic* agar visualisasi dari aliran dapat terlihat jelas dan berdiri secara vertikal agar mampu menopang saluran plat sejajar. Bagian bawah sel ini berlubang untuk mengeluarkan larutan jika terjadi kebocoran pada saluran.



Gambar 3.9 Sel elektrokimia

2. Pompa

Berfungsi untuk menyalurkan elektrolit dari reservoir ke sel elektrokimia yang melalui pipa dengan diameter yang bervariasi.. Pompa yang digunakan memiliki head maksimum hingga 30 meter. Untuk mengatur aliran elektrolit yang keluar dari pompa ini digunakan *valve* dan *voltage regulator* agar debit yang masuk ke sel elektrokimia sesuai dengan yang dikehendaki.



Gambar 3.10 Posisi pompa yang digunakan

Spesifikasi Pompa Sanyo PW H 136

| | |
|------------------|-------------------------|
| Sumber tegangan | : satu phase 220V 50 Hz |
| Output | : 125 W |
| Input | : 260 W |
| Suction head | : max 9 m |
| Total Head | : max 30 m |
| Kapasitas aliran | : max 32 ltr/min |
| Pipa Hisap | : 1 inch |
| Pipa Dorong | : 1 inch |

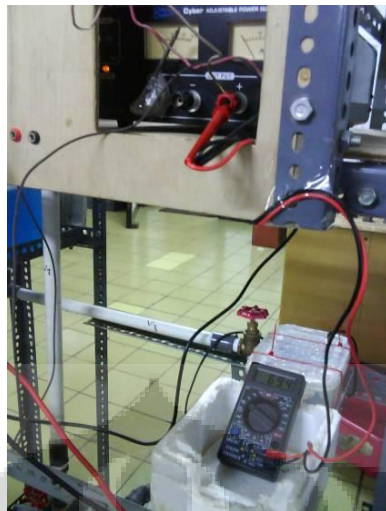
Pompa untuk aliran jet menggunakan submersible pump karena untuk aliran jet membutuhkan debit aliran yang cukup kecil. Debit aliran diatur melalui penyetelan volt regulator dengan menggunakan data kalibrasi pompa.



Gambar 3.11 Submersible pump

3. *Power Supply* DC

Untuk mengalirkan arus listrik ke elektroda dibutuhkan *power supply* yang mampu mengalirkan arus listrik DC sesuai dengan kebutuhan yaitu 0,6 V. *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 3.12 Power Supply dengan Multimeter untuk Mencatat Pembacaan Arus Listrik

4. Reservoir

Untuk menampung larutan elektrolit CuSO_4 dibutuhkan reservoir ini. Reservoir terbuat dari kotak plastik yang mampu untuk menampung larutan hingga 17 liter. Reservoir ini menerima aliran elektrolit dari sel elektrokimia untuk kemudian disalurkan kembali ke sel elektrokimia melalui pompa yang tersedia.



Gambar 3.13 Reservoir untuk menampung larutan CuSO_4 .

5. Flowmeter

Flowmeter digunakan sebagai alat ukur untuk mengetahui debit aliran yang akan masuk ke sel elektrokimia. Flowmeter yang akan digunakan merupakan flowmeter yang biasa digunakan untuk fluida yang memiliki *Specify Gravity* 1 atau biasa digunakan untuk mengalirkan air. Sehingga agar debit aliran pada larutan elektrolit dapat diketahui maka flowmeter perlu dikalibrasi terlebih dahulu. Posisi

flow meter berada di antara sisi *output* pompa, dimana sebelum masuk ke flowmeter terdapat *valve* yang digunakan untuk mengatur debit aliran, dan berada di bagian sebelum masuk ke sel elektrokimia. Flowmeter ini mempunyai *range* ukur dari 0,8 ltr/ min sampai 7,6 ltr/min.



Gambar 3.14 Posisi flowmeter setelah pompa.

6. Pemipaan

Alat ini menggunakan pipa paralon PVC untuk mengalirkan larutan elektrolit dengan diameter bervariasi antara $\frac{1}{2}$ ' inchi, $\frac{3}{4}$ ' inchi dan 1 inchi. Selain itu juga terdapat 3 *valve* yang digunakan untuk mengatur aliran. Selain itu juga terdapat *water moor* pipa lurus untuk memudahkan dibongkar pasang.

7. Voltage regulator

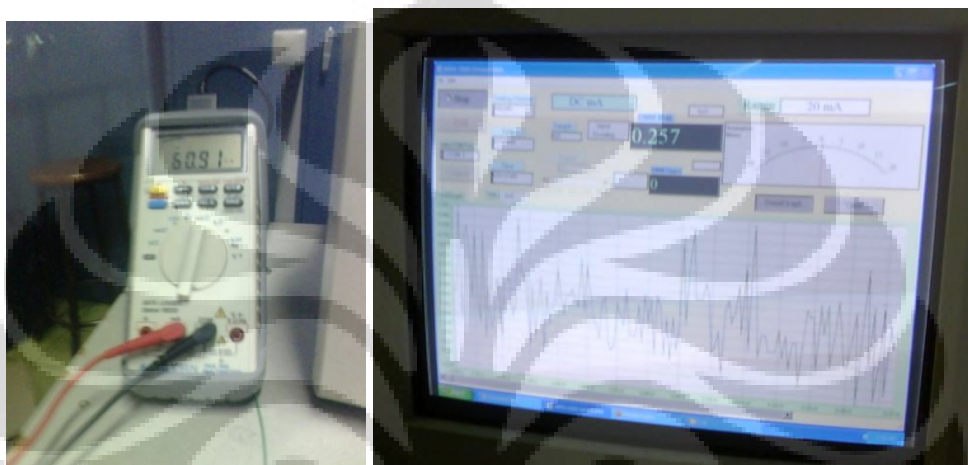
Digunakan untuk mengatur tegangan pada pompa sehingga putaran *impeller* pompa dapat diatur sehingga debit aliran yang dikeluarkan pompa dapat diatur sebelum memasuki flowmeter. Voltase yang diatur berkisar dari 0 – 270 volt.



Gambar 3.15 Voltage Regulator

8. Digital Multimeter

Data yang diperoleh dari mikroelektroda berupa arus listrik dengan satuan mA (mili Ampere) ini dibaca oleh digital multimeter ini untuk kemudian data tersebut dipindahkan ke komputer melalui port USB dan agar dapat dibaca dikomputer maka telah tersedia *software* yang siap diinstall. *Software* ini dapat membaca data tersebut untuk kemudian disimpan dalam format .txt yang dapat langsung dipindahkan ke dalam format Excel.



Gambar 3.16 Digital multimeter yang digunakan dan *software*

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah menggunakan plat tembaga sebagai katoda dan anoda dan menggunakan larutan CuSO_4 sebagai elektrolit untuk menghantarkan elektron-elektron pada tembaga. Pada tabel 3.2 menunjukkan sifat fisik dari larutan elektrolit pada suhu $20\text{ }^\circ\text{C}$ [Noulty dan Leaist, 1987].

Tabel 3.2 *Properties* pada tembaga dan larutan CuSO_4

| <i>Properties</i> | Nilai |
|---|------------------------|
| ρ density (kg/m^3) | 1072 |
| μ viskositas (kg/m.s) | 0,001149 |
| ν viskos. kinematik (m^2/s) | $1,072 \times 10^{-6}$ |
| Mr berat molekul (kg/mol) | 250 |
| C konsentrasi (mol/m^3) | 500 |
| D diffusivitas ion (m^2/s) | $4,43 \times 10^{-10}$ |

3.3 Kalibrasi Submersible Pump

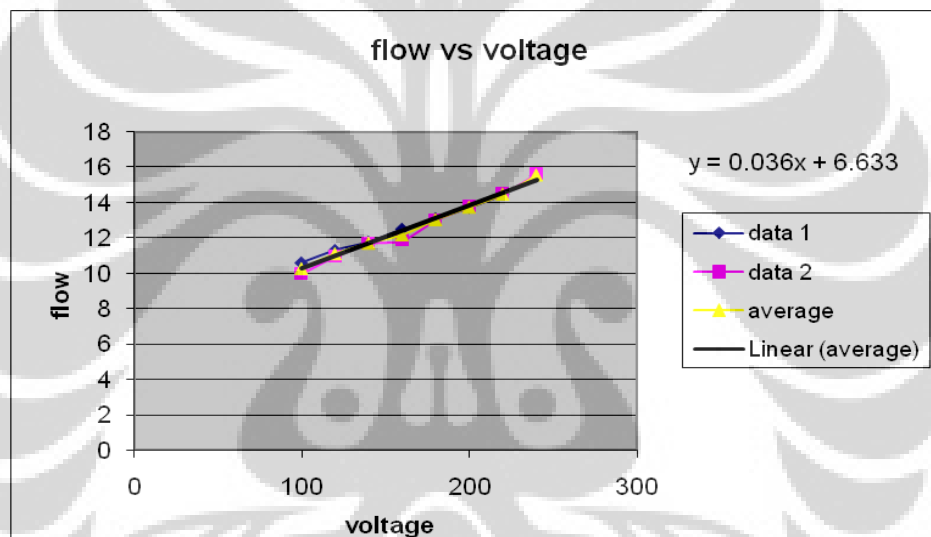
Submersible pump digunakan untuk mengalirkan elektrolit dengan debit yang sangat kecil, untuk mengatur debit dibutuhkan flowmeter, namun sulit sekali mendapatkan flowmeter yang sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan. Oleh karena itu pengaturan debit aliran diatur dengan penyetelan pada voltage regulator. Untuk itu kita harus mengkalibrasikan debit *submersible pump* dengan nilai yang terdapat pada voltage regulator sehingga debit yang diinginkan dapat tercapai dan dipercaya. Langkah – langkah kalibrasi adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan gelas ukur sebesar 1000 ml pada saluran output.
2. Menyiapkan voltage regulator, *Submersible pump* dan fluida yang akan dipakai
3. Mengatur posisi head pada *Submersible pump* sekitar 32 cm
4. Mengatur voltage regulator pada berbagai nilai mulai dari 100V sampai 240V
5. Mencatat waktu yang dibutuhkan elektrolit mencapai volume 250 mL pada gelas ukur
6. Melakukan prosedur diatas dengan kondisi berbeda yaitu pada nilai voltage regulator mulai dari 240V ke 100V untuk melihat kondisi histeresisnya
7. Menyimpan dan mengolah data tersebut hingga diperoleh garis persamaannya dari grafik yang diperoleh

Pengambilan data dilakukan dua kali dengan 2 kondisi berbeda yaitu nilai voltage dari yang rendah ke tinggi dan sebaliknya. Ini dimaksudkan untuk memperkecil kesalahan akibat histeresis. Data yang diperoleh adalah rata-rata dari nilai debit aliran (lpm) pada berbagai nilai voltage. Setelah itu diperoleh persamaan garis debit terhadap voltage. Kecepatan jet bisa didapat dari data tersebut, lalu masukan ke nilai rasio jet yang ditentukan kemudian didapat debit jet yang seharusnya, lalu dengan persamaan, didapat nilai voltage yang seharusnya diberikan untuk mendapatkan rasio jet yang diinginkan

Tabel 3.3 Kecepatan jet pada nilai voltase yang berbeda

| Voltage (V) | Waktu (s) | | Q _{avg} jet (mL/s) | V jet (m/s) |
|-------------|-----------|--------|-----------------------------|-------------|
| | Data 1 | Data 2 | | |
| 100 | 23.58 | 25.05 | 10.29112 | 0.278138 |
| 120 | 22.11 | 22.82 | 11.1312 | 0.300843 |
| 140 | 21.23 | 21.41 | 11.72629 | 0.316927 |
| 160 | 19.99 | 21.05 | 12.19137 | 0.329496 |
| 180 | 19.09 | 19.21 | 13.05496 | 0.352837 |
| 200 | 18.2 | 18.15 | 13.75518 | 0.371762 |
| 220 | 17.26 | 17.23 | 14.49697 | 0.39181 |
| 240 | 16.12 | 16 | 15.56684 | 0.420725 |



Gambar 3.17 Grafik hubungan antara kecepatan jet dan voltase

Tabel 3.4 Nilai voltase pada debit utama yang berbeda

| Q utama (lpm) | Rasio | V jet (m/s) | Q jet (mL/s) | Voltage |
|---------------|-------|-------------|--------------|----------|
| 2 | 2 | 0.31746 | 11.74603 | 141.6186 |
| 2 | 2.2 | 0.349206 | 12.92063 | 174.1561 |
| 2 | 2.6 | 0.412698 | 15.26984 | 239.2311 |
| 2.5 | 1.5 | 0.297619 | 11.0119 | 121.2827 |
| 2.5 | 2.1 | 0.416667 | 15.41667 | 243.2982 |
| 5.25 | 0.7 | 0.291667 | 10.79167 | 115.1819 |
| 5.25 | 1 | 0.416667 | 15.41667 | 243.2982 |

3.4 Prosedur Pengambilan Data

Penelitian mengenai aliran turbulen merupakan penelitian yang melibatkan data dengan tingkat keacakan cukup tinggi. Oleh karena itu dibutuhkan pengambilan data yang cukup banyak untuk menghindari error yang cukup besar yang dapat menyebabkan hasil yang kurang akurat. Semakin banyak pengambilan data maka akan semakin memperkecil nilai eror yang didapat, namun pengambilan data yang banyak membutuhkan waktu dan penggunaan energi yang banyak juga. Oleh karena alasan itu maka dibutuhkan pengambilan data yang cukup optimum terhadap tingkat akurasi dan juga penggunaan waktu.

Kline, S.J. [1985] melakukan pembahasan tentang 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. Jumlah data yang diambil mengacu pada data *uncertainty* yang telah dilakukan Akrom [2008], nilai kesalahan data $\pm 1\%$ untuk pengambilan data sebanyak 300 data. Untuk memperkecil kesalahan data, dalam penelitian ini kami mengambil data sebanyak 400 data dari 48 titik mikroelektroda.

Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin Fakultas Indonesia. Pengujian pada penelitian ini dilakukan pada perubahan 2 parameter penting. Pertama, pada debit aliran utama yang bervariasi antara 2 lpm, 2.5 lpm dan 5.25 lpm. Kedua, pada rasio kecepatan antara aliran utama dan aliran jet yang bervariasi pada masing-masing debit aliran. Debit aliran utama dapat dibaca dengan menggunakan alat ukur berupa flowmeter. Debit aliran untuk jet diatur pada voltage regulator.

Sebelum pengambilan data ini yang perlu dipersiapkan adalah larutan elektrolit berupa CuSO_4 dengan molaritas sebesar 0.5 M ditampung hingga beda ketinggian aliran sekitar 32 cm dengan *submersible pump* sesuai dengan head yang dilakukan ketika kalibrasi *submersible pump*. Langkah-langkah yang dilakukan untuk pengambilan data:

1. Memeriksa tidak ada cairan elektrolit yang mengalir dalam sistem.

2. Kemudian disiapkan elektrolit yang dibutuhkan dalam reservoir.
3. Menyiapkan peralatan elektronik dan instrumen yang akan digunakan (*power supply*, pompa, *voltage regulator*, *Digital Multimeter* dan Komputer).
4. Memasang 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
5. Lalu mengatur debit utama yang diperlukan untuk pengambilan data dengan bantuan *valve* dan *voltage regulator*.
6. Mengatur tegangan *Power Supply* pada 600 mV untuk aliran utama.
7. Mengatur *voltage regulator* untuk aliran jet. Untuk mendapatkan rasio jet tertentu
8. Menentukan titik mikroelektroda (1-48 titik) yang akan diambil datanya dengan *switch selector* pada panel kontrol.
9. Pengambilan data sebanyak 400 data pada setiap titik mikroelektroda, 2 data per detik.
10. Melakukan langkah nomor 5 – 9 pada titik mikroelektroda yang berbeda.
11. Menyimpan data yang telah diambil.
12. Mematikan seluruh peralatan elektronik.
13. Membersihkan alat dengan membuang larutan dan mengalirkan air bersih pada sistem 2-3 kali agar elektrolit dapat terkuras semua.
14. Membersihkan dan merapikan alat sebelum ditinggalkan.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

4.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui jenis aliran laminar atau aliran turbulen. Untuk perhitungan bilangan Reynolds menggunakan persamaan (2.13). Untuk menentukan nilai d yang merupakan nilai diameter jet pipa, karena pipa pada kanal bukan berbentuk silinder maka harus menggunakan persamaan (2.11). Sedangkan untuk mengetahui nilai u yang merupakan kecepatan aliran CuSO_4 menggunakan persamaan (2.12). Hasil dari perhitungan tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1.

Nilai Re pada penelitian ini merupakan variabel kondisi yang akan diubah-ubah sesuai dengan kondisi yang diperlukan. Kondisi ini diubah dengan tujuan memperoleh karakteristik aliran yang berbeda pada bilangan Re yang berubah. Bilangan Re tersebut berubah dengan mengubah nilai debit aliran sehingga kecepatan aliran akan berubah. Dimana nilai bilangan Re sebanding dengan nilai kecepatan aliran, sehingga semakin besar nilai debit aliran yang mengakibatkan nilai kecepatan aliran akan meningkat sehingga nilai bilangan Re menjadi bertambah.

Tabel 4.1 Nilai Re aliran utama dengan variasi debit aliran

| Debit (lpm) | Debit _{kalibrasi} (lpm) | Re_{utama} |
|-------------|----------------------------------|--------------|
| 2 | 2.19 | 1513 |
| 2.5 | 3.093 | 2137 |
| 5.25 | 10.526 | 4789 |

Dari tabel 4.1 perhitungan bilangan Reynolds aliran hulu kanal, didapat profil bilangan Reynolds antara 1500 - 4800, yang artinya aliran kanal bagian hulu mempunyai profil aliran yang bervariasi. Nilai ini penting diketahui untuk

menjelaskan kondisi aliran sebelum melewati *step* dan sebagai landasan dasar dalam melakukan analisa.

4.2 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Perhitungan koefisien perpindahan massa dilakukan untuk mendapatkan nilai koefisien untuk perpindahan massa yang terjadi dalam proses elektroplating yang menggunakan plat tembaga dan larutan elektrolit CuSO_4 . Perhitungan dilakukan setelah memperoleh data berupa besarnya arus pada digital multimeter untuk kemudian diolah dengan menggunakan properties dari masing-masing material yang digunakan.

Koefisien perpindahan massa lokal ini dihitung dengan persamaan (2.6), dimana arus diperoleh dari pengambilan data arus lokal pada setiap mikroelektroda 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 pada penelitian ini dilakukan dalam 3 variasi debit aliran pada variasi rasio kecepatan aliran jet dan aliran utama. Dari 38 titik mikroelektroda, data yang diolah dalam penelitian ini hanya data dari titik 1 sampai 24. Reduksi data ini memperhatikan kondisi data yang cenderung tidak normal setelah titik 24 (panjang aksial > 147,5 mm). Pereduksian data dapat dipertanggungjawabkan karena rasio geometris panjang aksial katoda dari *step* terhadap ketinggian *step* nilainya masih lebih besar dari 15. Nilai rasio yang dianjurkan untuk penelitian aliran *separated and reattached flow* setelah *backstep* adalah 5 – 15 [Eaton, J.K dan Johnson, J.P , 1981]

Tabel 4.2. Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 1513$

| Titik | Jarak (mm) | Arus _{mean} (mA) | | | Koefisien massa _{mean} (m/s) | | |
|-------|------------|---------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------|-------------|
| | | $V_r = 2$ | $V_r = 2.2$ | $V_r = 2.6$ | $V_r = 2$ | $V_r = 2.2$ | $V_r = 2.6$ |
| 1 | 5 | 0.288815 | 0.2467 | 0.165863 | 0.000001695 | 0.000001448 | 0.000000973 |
| 2 | 10 | 0.2101 | 0.1984125 | 0.174243 | 0.000001233 | 0.000001164 | 0.000001022 |
| 3 | 15 | 0.19042 | 0.1912775 | 0.17238 | 0.000001117 | 0.000001122 | 0.000001012 |
| 4 | 20 | 0.25537 | 0.18245 | 0.16763 | 0.000001498 | 0.000001071 | 0.000000984 |
| 5 | 25 | 0.212928 | 0.20253 | 0.140923 | 0.000001249 | 0.000001188 | 0.000000827 |
| 6 | 30 | 0.273998 | 0.23461 | 0.148903 | 0.000001608 | 0.000001377 | 0.000000874 |

| | | | | | | | |
|----|-------|----------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 7 | 35 | | | | | | |
| 8 | 40 | 0.29624 | 0.242735 | 0.186698 | 0.000001738 | 0.000001424 | 0.000001096 |
| 9 | 45 | 0.21984 | 0.2229125 | 0.168875 | 0.000001290 | 0.000001308 | 0.000000991 |
| 10 | 50 | 0.279343 | 0.2381 | 0.150228 | 0.000001639 | 0.000001397 | 0.000000882 |
| 11 | 55 | 0.283605 | 0.2496675 | 0.131048 | 0.000001664 | 0.000001465 | 0.000000769 |
| 12 | 60 | 0.218433 | 0.2287825 | 0.141114 | 0.000001282 | 0.000001342 | 0.000000828 |
| 13 | 65 | 0.274928 | 0.219435 | 0.18534 | 0.000001613 | 0.000001288 | 0.000001088 |
| 14 | 72.5 | 0.285995 | 0.2219125 | 0.136765 | 0.000001678 | 0.000001302 | 0.000000803 |
| 15 | 80 | 0.287398 | 0.23079 | 0.159783 | 0.000001686 | 0.000001354 | 0.000000938 |
| 16 | 87.5 | 0.295658 | 0.2603 | 0.20978 | 0.000001735 | 0.000001527 | 0.000001231 |
| 17 | 95 | 0.338677 | 0.2933175 | 0.113908 | 0.000001987 | 0.000001721 | 0.000000668 |
| 18 | 102.5 | 0.356755 | 0.2805475 | 0.12034 | 0.000002093 | 0.000001646 | 0.000000706 |
| 19 | 110 | 0.297103 | 0.2597225 | 0.146193 | 0.000001743 | 0.000001524 | 0.000000858 |
| 20 | 117.5 | 0.359038 | 0.2856975 | 0.214943 | 0.000002107 | 0.000001676 | |
| 21 | 125 | 0.32804 | 0.2954225 | 0.194193 | 0.000001925 | 0.000001733 | 0.000001139 |
| 22 | 132.5 | 0.322638 | 0.278585 | 0.182083 | 0.000001893 | 0.000001635 | 0.000001068 |
| 23 | 140 | | | | | | |
| 24 | 147.5 | | | | | | |

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 2137$

| Titik | Jarak (mm) | Arus _{mean} (mA) | | Koefisien massa _{mean} (m/s) | |
|-------|------------|---------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
| | | $V_r = 1.5$ | $V_r = 2.1$ | $V_r = 1.5$ | $V_r = 2.1$ |
| 1 | 5 | 0.1924475 | 0.2950925 | 0.000001129 | 0.000001732 |
| 2 | 10 | 0.2563075 | 0.15094 | 0.000001504 | 0.000000886 |
| 3 | 15 | 0.3109275 | 0.135325 | 0.000001824 | 0.000000794 |
| 4 | 20 | 0.4607725 | 0.1962575 | 0.000002704 | 0.000001152 |
| 5 | 25 | 0.31045 | 0.147595 | 0.000001822 | 0.000000866 |
| 6 | 30 | 0.3420175 | 0.2984425 | 0.000002007 | 0.000001751 |
| 7 | 35 | 0.3695825 | 0.2093525 | 0.000002169 | 0.000001228 |
| 8 | 40 | 0.3726975 | 0.2495725 | 0.000002187 | 0.000001464 |
| 9 | 45 | 0.41093 | 0.21096 | 0.000002411 | 0.000001238 |
| 10 | 50 | 0.345465 | 0.244115 | 0.000002027 | 0.000001432 |
| 11 | 55 | 0.356255 | 0.294585 | 0.000002090 | 0.000001729 |
| 12 | 60 | 0.33245 | 0.3096275 | 0.000001951 | 0.000001817 |
| 13 | 65 | 0.39244 | 0.24605 | 0.000002303 | 0.000001444 |
| 14 | 72.5 | 0.3527625 | 0.19245 | 0.000002070 | 0.000001129 |
| 15 | 80 | 0.394455 | 0.2244 | 0.000002315 | 0.000001317 |
| 16 | 87.5 | 0.3709525 | 0.2355625 | 0.000002177 | 0.000001382 |
| 17 | 95 | 0.34738 | 0.2651075 | 0.000002038 | 0.000001556 |
| 18 | 102.5 | 0.2598025 | 0.2608675 | 0.000001524 | 0.000001531 |
| 19 | 110 | 0.2118125 | 0.2221025 | 0.000001243 | 0.000001303 |
| 20 | 117.5 | 0.2737375 | 0.2716225 | 0.000001606 | 0.000001594 |
| 21 | 125 | 0.243105 | 0.2778175 | 0.000001427 | 0.000001630 |
| 22 | 132.5 | 0.22229 | 0.25171 | 0.000001304 | 0.000001477 |
| 23 | 140 | 0.218225 | 0.337855 | 0.000001281 | 0.000001982 |
| 24 | 147.5 | 0.2511675 | | 0.000001474 | |

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Massa pada $Re = 4789$

| Titik | Jarak (mm) | Arus _{mean} (mA) | | Koefisien massa _{mean} (m/s) | |
|-------|------------|---------------------------|-----------|---------------------------------------|-------------|
| | | $V_r = 0.7$ | $V_r = 1$ | $V_r = 0.7$ | $V_r = 1$ |
| 1 | 5 | 0.205 | 0.224395 | 0.000001203 | 0.000001317 |
| 2 | 10 | 0.380255 | 0.1625675 | 0.000002231 | 0.000000954 |
| 3 | 15 | 0.450228 | 0.1482125 | 0.000002642 | 0.000000870 |
| 4 | 20 | 0.626838 | 0.153675 | 0.000003678 | 0.000000902 |
| 5 | 25 | 0.356725 | 0.162895 | 0.000002093 | 0.000000956 |
| 6 | 30 | 0.39849 | 0.27804 | 0.000002338 | 0.000001631 |
| 7 | 35 | 0.41475 | | 0.000002434 | |
| 8 | 40 | 0.413563 | 0.2409375 | 0.000002427 | 0.000001414 |
| 9 | 45 | 0.480655 | 0.21506 | 0.000002820 | 0.000001262 |
| 10 | 50 | 0.447578 | 0.1896375 | 0.000002626 | 0.000001113 |
| 11 | 55 | 0.42647 | 0.20287 | 0.000002502 | 0.000001190 |
| 12 | 60 | 0.46644 | 0.195975 | 0.000002737 | 0.000001150 |
| 13 | 65 | 0.3968 | 0.2466275 | 0.000002328 | 0.000001447 |
| 14 | 72.5 | 0.37703 | 0.2737825 | 0.000002212 | 0.000001607 |
| 15 | 80 | 0.407118 | 0.3049875 | 0.000002389 | 0.000001790 |
| 16 | 87.5 | 0.369822 | 0.20644 | 0.000002170 | 0.000001211 |
| 17 | 95 | 0.38068 | 0.18615 | 0.000002234 | 0.000001092 |
| 18 | 102.5 | 0.373555 | 0.2343225 | 0.000002192 | 0.000001375 |
| 19 | 110 | 0.296973 | 0.2442275 | 0.000001743 | 0.000001433 |
| 20 | 117.5 | 0.37039 | 0.3086475 | 0.000002173 | 0.000001811 |
| 21 | 125 | 0.326008 | 0.319975 | 0.000001913 | 0.000001878 |
| 22 | 132.5 | 0.33112 | 0.273315 | 0.000001943 | 0.000001604 |
| 23 | 140 | 0.437038 | 0.353435 | 0.000002564 | 0.000002074 |
| 24 | 147.5 | 0.382833 | | 0.000002246 | |

4.2.1 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 (2.8), 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 2418.

4.2.2 Perhitungan Bilangan Tak Berdimensi Sherwood

Bilangan tak berdimensi Sherwood menjelaskan perpindahan massa konvektif (konsentrasi) yang terjadi di permukaan lapisan batas. Untuk menghitung nilai bilangan tak berdimensi Sherwood digunakan persamaan (2.9).

Nilai koefisien perpindahan massa konvektif didapat yang digunakan yaitu nilai koefisien perpindahan massa tertinggi dari setiap bilangan Reynolds dan rasio kecepatan yang berbeda. Tabel 4.5 dibawah menunjukkan nilai bilangan Sherwood untuk beberapa variasi bilangan Reynolds dan rasio kecepatan.

Tabel 4.5 Data-data untuk memenuhi bilangan Sherwood

| Reynold | Rasio | Max Km_{mean} | d_{jet} | D | schmidt | Sherwood |
|---------|-------|-----------------|-----------|-----------------|---------|-------------|
| 1513.00 | 2 | 0.000002107 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 42.27295276 |
| 1513.00 | 2.2 | 0.000001733 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 34.78294436 |
| 1513.00 | 2.6 | 0.000001261 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 25.30725662 |
| 2137 | 1.5 | 0.000002704 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 54.25119695 |
| 2137 | 2.1 | 0.000001982 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 39.77893244 |
| 4789 | 0.7 | 0.000003678 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 73.8036334 |
| 4789 | 1 | 0.000003074 | 0.0089 | $4,43.10^{-10}$ | 2418 | 61.67852826 |

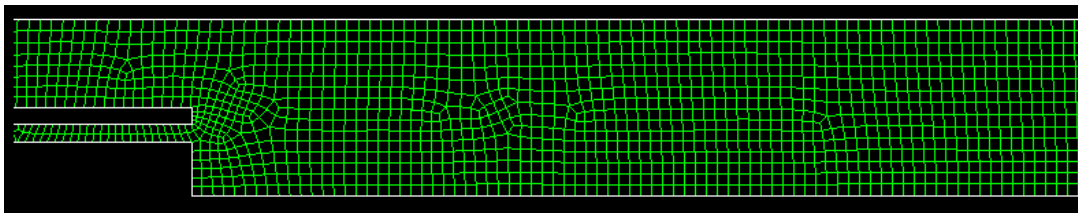
4.3 Permodelan CFD

Dalam simulasi ini model yang dipakai sesuai dengan model fisik yang telah dibuat yaitu kanal aliran berbentuk persegi panjang dengan adanya pembesaran mendadak dan aliran tambahan dari jet turbulensi dibawah *step*.



Gambar 4.1 Model kanal

Kerapatan grid sangat penting, semakin rapat grid yang dihasilkan maka hasil simulasi yang dihasilkan lebih sesuai dengan keadaan sebenarnya namun waktu running menjadi semakin lama. Pada simulasi ini menggunakan grid automatic seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grid domain

Kondisi simulasi ditunjukkan pada table 4.6 sementara itu model turbulensi yang digunakan bervariasi disesuaikan dengan kondisi aliran utama yang dinyatakan dalam bilangan Reynolds seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.7.

Tabel 4.6 Kondisi simulasi aliran

| Computation Condition | | |
|------------------------------|-------------------|------------------------|
| Model settings | 2D, Steady state | |
| Fluid | Electrolite CuSO4 | |
| Fluid Properties | Density | 1072 kg/m ³ |
| | Viscosity | 0.001149 kg/m-s |
| Boundary Conditions | inflow1 | Velocity Inlet |
| | inflow2 | Velocity Inlet |
| | Outflow | Outflow |
| | Wall | Wall |

Tabel 4.7 Model turbulensi

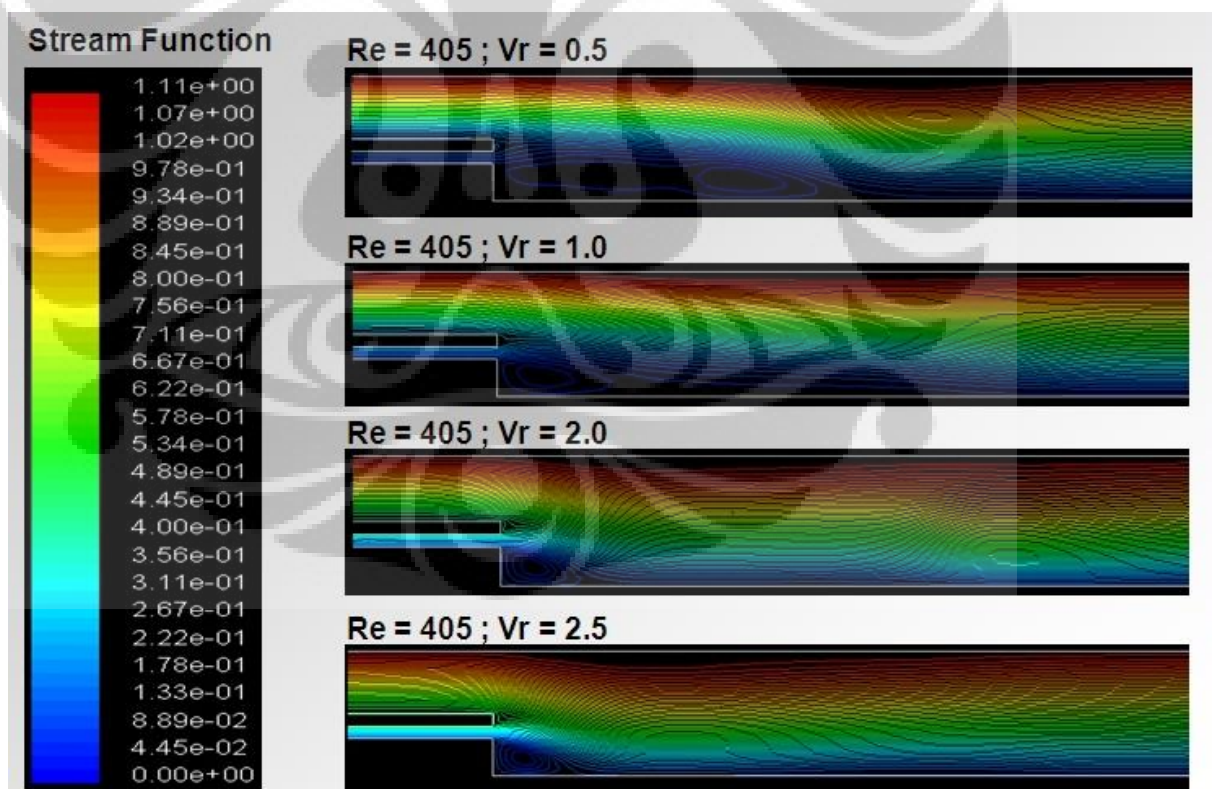
| Re | Turbulence Model |
|-----------|------------------------------------|
| 1515 | RNG k- ϵ (transitional) |
| 2137 | RNG k- ϵ turbulence model |
| 4789 | RNG k- ϵ turbulence model |

C1-Epsilon = 1.42 dan C2- ϵ = 1.68 ,Swirl factor = 0,07.

BAB 5 ANALISA DAN PEMBAHASAN

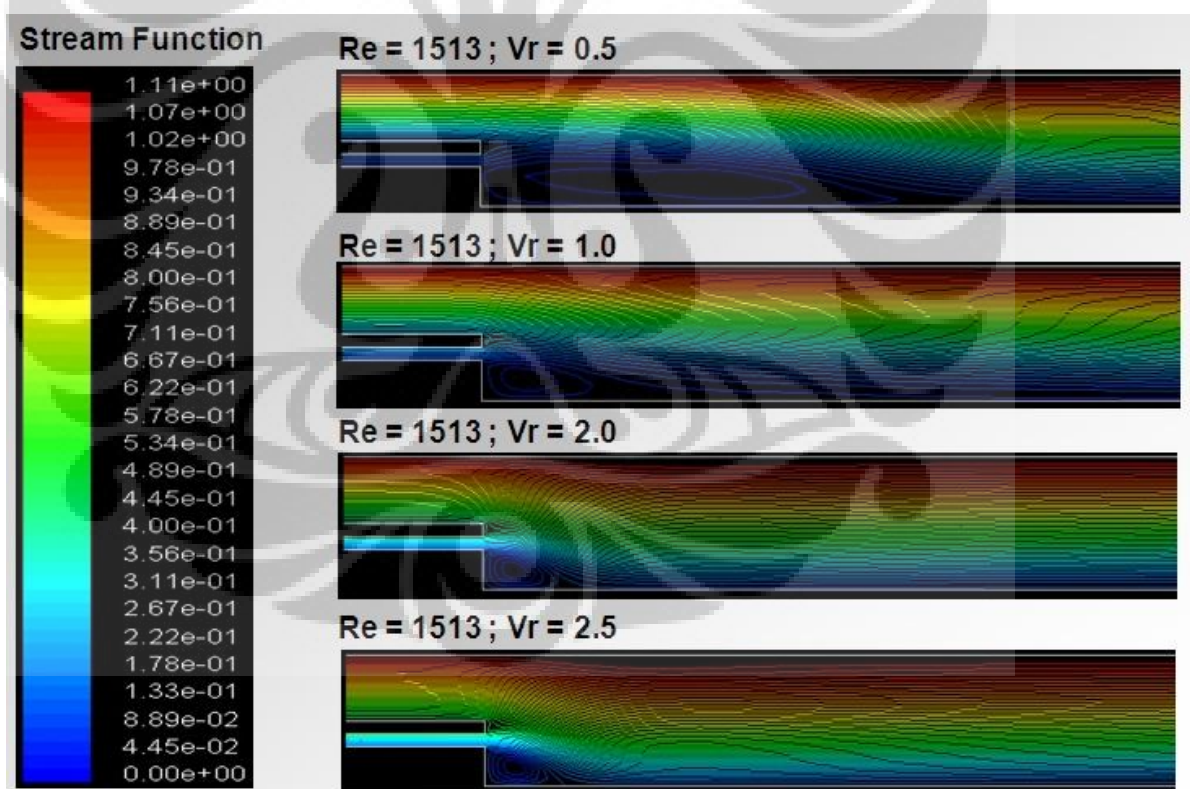
5.1 Medan Aliran

Untuk melihat karakteristik fenomena aliran yang terjadi dalam penelitian ini, dapat kita modelkan dengan bantuan computational fluid dynamic (CFD) yang merupakan teknik komputasi yang telah banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan fluida di bidang engineering yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia. Melalui pendekatan metode volum hingga dengan berbagai persamaan-persamaan yang mengaturnya. Penggunaan CFD pada penelitian ini dimaksudkan untuk memvisualisasikan aliran didalam kanal aliran dan memberikan informasi karakteristik aliran yang sulit diperoleh secara menyeluruh pada eksperimen.



Gambar 5.1 Pengaruh jet turbulen terhadap garis arus di medan aliran elektrolit pada Reynolds 405 dan berbagai rasio kecepatan

Dari gambar 5.1 dapat kita lihat terbentuknya daerah sirkulasi yang terjadi didepan *backstep*, dengan adanya gangguan yang diberikan oleh jet turbulen dapat mempengaruhi kondisi daerah separasi tersebut. Daerah sirkulasi yang terjadi semakin mengecil seiring dengan semakin besarnya rasio kecepatan yang diberikan. Semakin besar rasio maka akan menarik aliran bagian atas menuju kebawah, ini dikarenakan kecepatan aliran diatas lebih rendah dari yang di bawah sehingga aliran utama tertarik ke aliran yang mempunyai kecepatan lebih besar (aliran jet turbulen). Hal ini berbanding terbalik pada kondisi rasio kecepatan kecil ($V_r = 0.5$) aliran pada nosel malah tertarik keatas sehingga tidak terlalu mempengaruhi daerah sirkulasi pada depan *backstep*. Pada kondisi ini, aliran yang bersirkulasi berjalan cukup lambat. Jet turbulen berfungsi untuk mempercepat aliran sirkulasi yang terjadi, semakin cepat aliran pada jet turbulen (rasio tinggi) maka aliran sirkulasi menjadi cepat karena daerah resirkulasi menjadi lebih kecil.



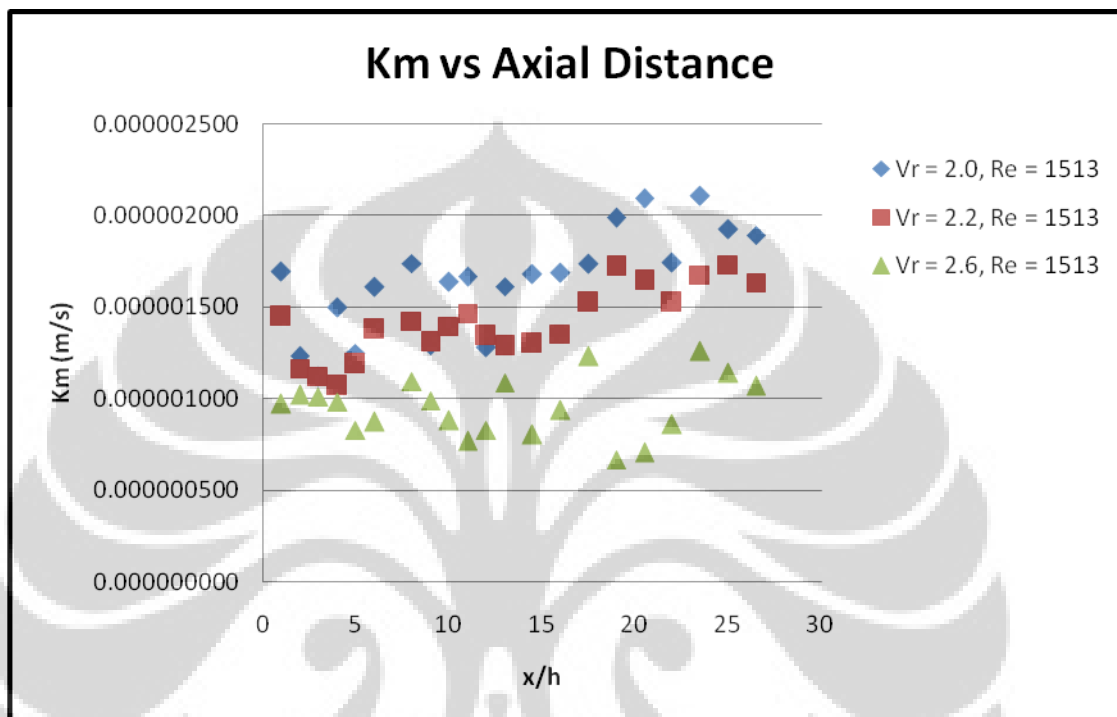
Gambar 5.2 Pengaruh jet turbulen terhadap garis arus di medan aliran elektrolit pada Reynolds 1513 dan berbagai rasio kecepatan.

Gambar 5.2 menunjukkan karakteristik aliran pada Re 1513 dan berbagai rasio kecepatan. Sebagian besar karakteristik garis arus yang terjadi mirip dengan dengan gambar 5.1, hal ini dikarenakan perbedaan bilangan Reynolds kurang mempengaruhi garis aliran yang terjadi, perbedaan dapat dilihat di daerah sirkulasi pada rasio kecil ($V_r=0.5$) tampak lebih besar dibandingkan dengan gambar 5.1, ini dikarenakan kecepatan yang diberikan lebih besar sehingga posisi terjadinya lapisan geser dan reattachment point berada lebih jauh.

Pemasangan jet turbulen menimbulkan gangguan terhadap aliran didalam kanal. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya *wake region* yang mengandung *vortex* sehingga aliran mengalami separasi. *Vortex* ini akan meningkatkan akumulasi *vorticity* pada *down stream* setelah aliran mengalami relaksasi yang mempunyai kontribusi terhadap perkembangan *boundary layer* dan mengakibatkan terjadinya *losses* pada aliran yang diwujudkan dengan adanya *pressure drop* sepanjang dinding saluran. Penambahan jet turbulen ini menimbulkan *drag force* pada *up stream* sehingga aliran mengalami separasi pada daerah *down stream*. Meskipun *vortex* dapat dihilangkan, *vorticity* yang ditimbulkan mempunyai kontribusi terhadap perkembangan *boundary layer*. Semakin kecil diameter jet turbulen, semakin besar *vortex* yang terjadi dan akumulasi *vorticity* pun semakin besar yang mana hal ini mengakibatkan *boundary layer* semakin cepat berkembang.

5.2 Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif

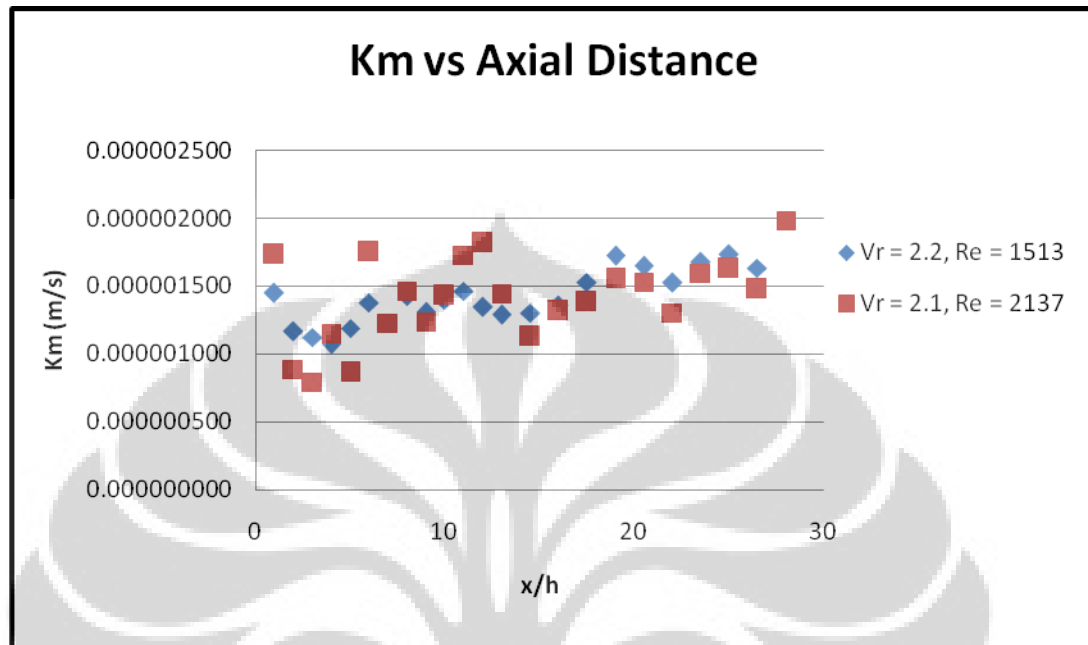
Perubahan rasio kecepatan dapat mempengaruhi distribusi koefisien perpindahan massa konvektif pada sepanjang arah aksial seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.3.



Gambar 5.3 Distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, k_m sepanjang arah aksial pada beberapa rasio kecepatan, V_r jet turbulensi ($Re = 1513$)

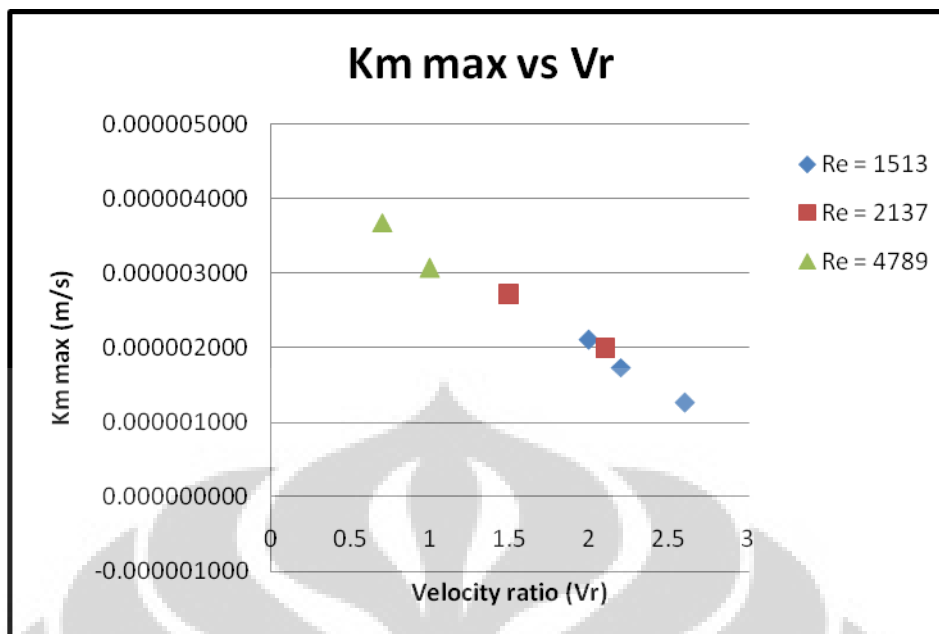
Dari gambar 5.3 terlihat bahwa kenaikan nilai k_m seiring dengan penurunan rasio kecepatan yang diberikan. karakteristik ini disebabkan oleh perpindahan massa konvektif berpengaruh kepada tingkat turbulensi yang terjadi sebagian besar di daerah separasi. Luasan daerah separasi dipengaruhi oleh rasio kecepatan yang diberikan. semakin besar V_r , maka daerah separasi semakin kecil oleh karena itu jika dilihat dari penyebaran nilai perpindahan massa pada $V_r = 2.6$ terlihat cukup merata pada bagian depan saja namun k_m yg dihasilkan cukup kecil, sama halnya dengan $V_r = 2.2$, perpindahan massa tersebar secara merata mulai memanjang ke bagian tengah, untuk $V_r = 2$ terlihat nilai juga merata dan nilai k_m tinggi, pada ketiga grafik terlihat pada data bagian belakang terdapat mempunyai nilai perpindahan massa yang lebih tinggi, ini dikarenakan oleh daerah yang kita kenal dengan *time averaged reattachment point*. Pada daerah

tersebut adalah tempat terjadinya aliran baru yang mulai berkembang penuh, dan memiliki kecepatan paling tinggi setelah *backstep* sehingga perpindahan massa di daerah ini cukup besar.



Gambar 5.4 Pengaruh bilangan Reynolds, Re pada distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, km sepanjang arah aksial ($V_r=2.1-2.2$)

Pada gambar 5.4 menunjukkan pengaruh koefisien perpindahan massa terhadap perubahan bilangan Reynolds. Terlihat kondisi bilangan Reynold yang berbeda memberikan pengaruh yang cukup besar pada koefisien perpindahan massa. Perbedaan rasio kedua aliran yang kecil dianggap tidak terlalu mempengaruhi perpindahan massa. Pada $Re = 1513$, aliran perpindahan massa yang terjadi cukup merata, hal ini berbanding terbalik dengan aliran pada $Re = 2137$. Karakteristik ini disebabkan oleh tipe aliran masuk pada kanal yang berbeda. Pada $Re = 2137$, aliran mulai mengalami transisi sehingga sebelum masuk ke kanal sudah mulai terjadi turbulensi lalu setelah melewati *backstep*, aliran yang terjadi lebih acak jika dibandingkan dengan aliran pada $Re = 1513$ yang laminar. Dari gambar 5.4 dapat disimpulkan bahwa peningkatan bilangan Reynolds dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa namun perpindahan massa yang terjadi kurang merata.



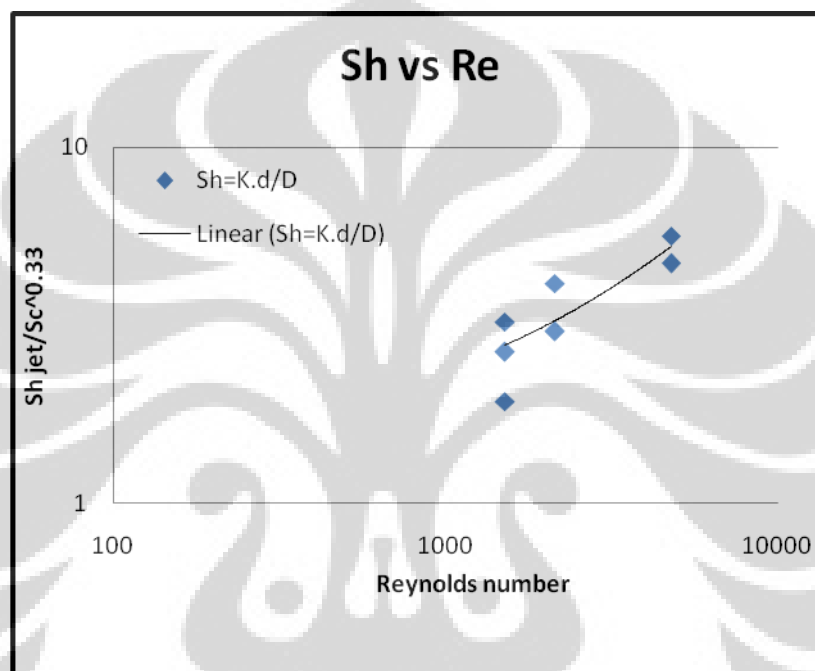
Gambar 5.5 Pengaruh rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi terhadap koefisien perpindahan massa maksimum, K_m max pada berbagai bilangan Reynolds

Gambar 5.5 menunjukkan pengaruh dari variasi rasio kecepatan dan bilangan Reynolds pada nilai koefisien perpindahan massa maksimum yang terjadi. Dapat disimpulkan bahwa peningkatan bilangan Reynolds dengan rasio kecepatan yang kecil memberikan nilai koefisien perpindahan massa yang tinggi. Ini dikarenakan semakin besar bilangan Reynolds yang digunakan maka tipe aliran semakin acak sehingga ketika melewati backstep turbulensi yang dihasilkan menjadi cukup besar jika dibandingkan dengan bilangan Reynolds yang rendah. Oleh karena itu perpindahan massa akan membesar pada suatu titik yang terkena turbulensi hebat tersebut, namun karena alirannya acak maka hasil perpindahan massa yang dihasilkan menjadi tidak merata.

5.3 Korelasi Bilangan Tak berdimensi

Korelasi bilangan Sherwood dapat juga 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 (2.10), 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 4.5 dapat diplot hubungan bilangan tak berdimensi Sherwood, Schmidt dan Reynolds ke dalam suatu persamaan. Persamaan korelasi yang terbentuk adalah $Sh = 0.033Re^{0.5983}Sc^{0.33}$



Gambar 5.6 Plot skala log dari $Sh/Sc^{0.3}$ puncak terhadap bilangan Reynolds

BAB 6 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian proses elektroplating dengan studi kontrol aktif turbulensi aliran melalui *backstep* dengan ketinggian 5 mm menggunakan metode jet turbulensi pada bilangan Reynolds, $Re = 1513 - 4789$ dengan rasio kecepatan aliran utama terhadap aliran jet, $Vr = 0.7 - 2.6$. dapat disimpulkan hal-hal berikut ini:

1. Daerah sirkulasi yang terjadi semakin mengecil dan bergeser mendekati *backstep* seiring dengan semakin besarnya rasio kecepatan aliran utama terhadap aliran jet yang diberikan
2. Nilai Reynolds yang lebih tinggi menghasilkan koefisien perpindahan massa maksimum yang lebih tinggi
3. Besarnya rasio kecepatan aliran utama terhadap aliran jet yang diberikan akan menurunkan massa konvektif yang mengalir.
4. Pada rentang $1500 < Re < 4800$ dan $0.7 < Vr < 2.6$ dengan ketinggian *backstep* 5mm, relasi perpindahan massa yang dihasilkan adalah $Sh=0.033Re^{0.598}Sc^{0.33}$

DAFTAR REFERENSI

- Akrom, H. (2008). Perpindahan massa konvektif dengan kontrol turbulensi aliran menggunakan metode wall recess pada sel elektrokimia plat sejajar.
- Chen, L. (2001). Method for electrolytically depositing copper on a semiconductor workpiece, *U.S Patent No. 6290833*.
- Eaton, J.K. and Johnston, J.P. (1981). *AIAA Journal*, 19, pp. 1093 - 1099.
- Harinaldi. (2003). *Proceeding of The 8th Indonesia Toray Science Foundation Semnar on Science and Technology*.
- Harinaldi. (2007). *Laporan Penelitian Hibah PHK A3-DTM FTUI*.
- Kim, J., Kline, S.J., and Jonston, J.P. (1980). Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step, Vol 102
- Kline, S.J. (1985). The purpose of uncertainty analysis. *Journal of Fluids Engineering*. Vol.107, pp. 153-164.
- Noulty, R.A., Leaist, D.G. (1987). *Journal of Solution Chemistry*, 16, 10, , pp. 813 - 825.
- Oduoza, C.F., Wragg, A.A., and 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.
- Yang, Y.T., and 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.
- Incropera, Frank P., De Witt, and David P. (2002). *Fundamental of heat and mass transfer* (4th edition). Singapore : Wiley and Son
- Munson, B.R., Young, D.F., and Okiishi, T.H. (2004) *Mekanika fluida* (Harinaldi & Budiarmo, Penerjemah, edisi 4, jilid 2). Jakarta : Erlangga

Lampiran 1 : Data Penelitian

Data Penelitian Untuk Bilangan Reynolds 1513

| Titik | Arus _{mean} (mA) | | |
|-------|---------------------------|-----------|-----------|
| | Vr = 2 | Vr = 2.2 | Vr = 2.6 |
| 1 | 0.288815 | 0.2467 | 0.1658625 |
| 2 | 0.2101 | 0.1984125 | 0.1742425 |
| 3 | 0.19042 | 0.1912775 | 0.17238 |
| 4 | 0.25537 | 0.18245 | 0.16763 |
| 5 | 0.2129275 | 0.20253 | 0.1409225 |
| 6 | 0.2739975 | 0.23461 | 0.1489025 |
| 7 | | | |
| 8 | 0.29624 | 0.242735 | 0.1866975 |
| 9 | 0.21984 | 0.2229125 | 0.168875 |
| 10 | 0.2793425 | 0.2381 | 0.1502275 |
| 11 | 0.283605 | 0.2496675 | 0.1310475 |
| 12 | 0.2184325 | 0.2287825 | 0.14114 |
| 13 | 0.2749275 | 0.219435 | 0.18534 |
| 14 | 0.285995 | 0.2219125 | 0.136765 |
| 15 | 0.2873975 | 0.23079 | 0.1597825 |
| 16 | 0.2956575 | 0.2603 | 0.20978 |
| 17 | 0.3386775 | 0.2933175 | 0.1139075 |
| 18 | 0.356755 | 0.2805475 | 0.12034 |
| 19 | 0.2971025 | 0.2597225 | 0.1461925 |
| 20 | 0.3590375 | 0.2856975 | 0.2149425 |
| 21 | 0.32804 | 0.2954225 | 0.1941925 |
| 22 | 0.3226375 | 0.278585 | 0.1820825 |
| 23 | | | |
| 24 | | | |
| 25 | 0.3052675 | 0.16869 | 0.2504925 |
| 26 | | | |
| 27 | 0.342665 | | |
| 28 | 0.3466175 | 0.138585 | 0.3464975 |
| 29 | 0.28413 | 0.1389375 | 0.2435575 |
| 30 | | | |
| 31 | | | |
| 32 | 0.3702475 | 0.14416 | 0.2911575 |
| 33 | 0.34712 | 0.18587 | 0.3317075 |
| 34 | 0.314525 | 0.2098525 | 0.2966925 |
| 35 | | | |
| 36 | | | |
| 37 | 0.2747475 | | |
| 38 | 0.281255 | 0.1923775 | 0.311975 |

Data Penelitian Untuk Bilangan Reynolds 2137

| Titik | Arus _{mean} (mA) | |
|-------|---------------------------|----------------------|
| | V _r = 1.5 | V _r = 2.1 |
| 1 | 0.1924475 | 0.2950925 |
| 2 | 0.2563075 | 0.15094 |
| 3 | 0.3109275 | 0.135325 |
| 4 | 0.4607725 | 0.1962575 |
| 5 | 0.31045 | 0.147595 |
| 6 | 0.3420175 | 0.2984425 |
| 7 | 0.3695825 | 0.2093525 |
| 8 | 0.3726975 | 0.2495725 |
| 9 | 0.41093 | 0.21096 |
| 10 | 0.345465 | 0.244115 |
| 11 | 0.356255 | 0.294585 |
| 12 | 0.33245 | 0.3096275 |
| 13 | 0.39244 | 0.24605 |
| 14 | 0.3527625 | 0.19245 |
| 15 | 0.394455 | 0.2244 |
| 16 | 0.3709525 | 0.2355625 |
| 17 | 0.34738 | 0.2651075 |
| 18 | 0.2598025 | 0.2608675 |
| 19 | 0.2118125 | 0.2221025 |
| 20 | 0.2737375 | 0.2716225 |
| 21 | 0.243105 | 0.2778175 |
| 22 | 0.22229 | 0.25171 |
| 23 | 0.218225 | 0.337855 |
| 24 | 0.2511675 | |
| 25 | 0.2949175 | 0.32363 |
| 26 | 0.300295 | 0.3728875 |
| 27 | 0.323525 | 0.4508825 |
| 28 | 0.3024225 | 0.4171575 |
| 29 | 0.302385 | 0.4366125 |
| 30 | 0.32316 | 0.276635 |
| 31 | 0.3100625 | 0.3325875 |
| 32 | 0.325315 | 0.33197 |
| 33 | 0.3325575 | 0.3196725 |
| 34 | 0.355755 | 0.335875 |
| 35 | 0.3116575 | |
| 36 | 0.283345 | 0.3084925 |
| 37 | 0.2557675 | 0.2673525 |
| 38 | 0.24892 | 0.18424 |

Data Penelitian Untuk Bilangan Reynolds 4789

| Titik | Arus _{mean} (mA) | |
|-------|---------------------------|--------------------|
| | V _r = 0.7 | V _r = 1 |
| 1 | 0.205 | 0.224395 |
| 2 | 0.380255 | 0.1625675 |
| 3 | 0.4502275 | 0.1482125 |
| 4 | 0.6268375 | 0.153675 |
| 5 | 0.356725 | 0.162895 |
| 6 | 0.39849 | 0.27804 |
| 7 | 0.41475 | |
| 8 | 0.4135625 | 0.2409375 |
| 9 | 0.480655 | 0.21506 |
| 10 | 0.4475775 | 0.1896375 |
| 11 | 0.42647 | 0.20287 |
| 12 | 0.46644 | 0.195975 |
| 13 | 0.3968 | 0.2466275 |
| 14 | 0.37703 | 0.2737825 |
| 15 | 0.4071175 | 0.3049875 |
| 16 | 0.3698225 | 0.20644 |
| 17 | 0.38068 | 0.18615 |
| 18 | 0.373555 | 0.2343225 |
| 19 | 0.2969725 | 0.2442275 |
| 20 | 0.37039 | 0.3086475 |
| 21 | 0.3260075 | 0.319975 |
| 22 | 0.33112 | 0.273315 |
| 23 | 0.4370375 | 0.353435 |
| 24 | 0.3828325 | |
| 25 | 0.42198 | 0.3512425 |
| 26 | 0.43654 | 0.3343125 |
| 27 | 0.4987425 | 0.3501925 |
| 28 | 0.4638275 | 0.35254 |
| 29 | 0.42339 | 0.3068825 |
| 30 | 0.4744575 | 0.3338875 |
| 31 | 0.44641 | 0.365025 |
| 32 | 0.4101625 | 0.328335 |
| 33 | 0.3972625 | 0.2971125 |
| 34 | 0.4327725 | 0.4079875 |
| 35 | 0.42614 | |
| 36 | 0.3743525 | 0.31093 |
| 37 | 0.3071875 | 0.234245 |
| 38 | 0.3480275 | 0.3225125 |

Lampiran 2 : Gambar Kerja Apparatus Penelitian