



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

OPTIMASI PANJANG DAN KEDALAMAN *CHANNEL PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL* (PEMFC) TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN TEKANAN DAN LAJU ALIRAN H_2 MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

**IYANDO ADITIYAWAN
NRP. 02511640000083**

**Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Dr.Widyastuti, S.Si., M.Si.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL 184834

OPTIMASI PANJANG DAN KEDALAMAN *CHANNEL* *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)* TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN TEKANAN DAN LAJU ALIRAN H₂ MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

IYANDO ADITYAWAN
NRP. 02511640000083

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**OPTIMIZATION LENGTH AND DEPTH CHANNEL OF
PROTON EXCHANGE MEMBRANE *FUEL CELL* (PEMFC)
IN PARALEL FLOW FOR *PRESSURE DROP* AND
VELOCITY OF H₂ USING COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS**

IYANDO ADITIYAWAN
NRP. 02511640000083

Supervisor
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**OPTIMASI PANJANG DAN KEDALAMAN CHANNEL
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL
(PEMFC) TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN
TEKANAN DAN LAJU ALIRAN H₂ MENGGUNAKAN
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

IYANDO ADITIYAWAN

NRP 0251164000083

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P.Hidayat, S.T.,M.Sc., Ph. D.....(Pembimbing I)
2. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. (Pembimbing II)



URABAYA
Oktober 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**OPTIMASI PANJANG DAN KEDALAMAN CHANNEL
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)
TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN
TEKANAN DAN LAJU ALIRAN H₂ MENGGUNAKAN
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

Nama : Iyando Aditiyawan
NRP : 0251164000083
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si

Abstrak

Sumber bahan bakar fosil yang memiliki sifat yang tidak dapat diperbarui yang keberadaannya kini semakin menurun. Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell merupakan teknologi yang memanfaatkan sumber energi alternatif dan energi yang dapat diperbarui. Namun, dibalik keunggulan yang ditawarkan PEM fuel cell sendiri memiliki tantangan-tantangan yang akan memengaruhi peforma dan waktu pakai. Manajemen air yang ada pada sel-sel ini sangatlah penting untuk diberikan perhatian dan konsumsi hidrogen yang digunakan untuk efisiensi. Untuk itu pemilihan dari tipe dan desain flow channel akan menjadi krusial. Optimasi dilakukan pada panjang dan kedalaman channel dengan menggunakan komputasi dinamika fluida (CFD). Dari penelitian ini dihasilkan panjang dan kedalaman channel akan mempengaruhi nilai pressure drop dan laju aliran. Dihasilkan nilai pressure drop dan laju aliran dengan nilai optimal pada panjang 10 cm dan kedalaman 0,8 mm yaitu sebesar 436,18 Pa dan 10,8 m/s.

Kata Kunci: *Energi, PEM fuel cell, flow channel design.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION LENGTH AND DEPTH CHANNEL OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE *FUEL CELL* (PEMFC) IN PARALEL FLOW FOR *PRESSURE DROP* AND VELOCITY OF H₂ USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Student Name : Iyando Aditiyawa
NRP : 0251164000083
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Co-Supervisor : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Fossil fuel sources that have non-renewable properties that are preferred are now increasing. Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell is technology that requires alternative energy and renewable energy. However, behind the advantages offered by the PEM fuel cell itself has challenges that will affect performance and lifetime. Existing water management in these cells is given important attention and hydrogen consumption for efficiency. For this reason, the selection of the type and design of the flow channel will be crucial to being able to manage the flooding that occurs in cells. Optimization is carried out on the channel length and depth by using fluid dynamics competence (CFD). From this research, a long and high channel will increase the value of pressure drop and flow rate. The resulting pressure drop and flow rate with an optimal value of 10 cm length and 0.8 mm height is 436.18 Pa and 10.8 m/s

Keywords: *Energy, PEM fuel cell, flow channel design.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini. Penulisan laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar sarjana teknik (S.T) departemen teknik material dan metalurgi fakultas teknologi industri dan rekayasa sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa
2. Terima kasih kepada orang tua saya, kakak saya dan juga keluarga saya.
3. Terima kasih kepada Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T. M.Sc., Ph.D dan Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. sebagai dosen pembimbing saya.
4. Terima kasih kepada seluruh anggota tim Antasena atas dukungan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan meminta untuk pembaca memberikan saran dan kritik demi kemajuan dalam bidang penelitian.

Surabaya, 24 Juli 2020
Penulis

Iyando Aditiyawan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxviii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Fuel cell</i>	5
2.1.1 Prinsip Kerja <i>Fuel cell</i>	10
2.1.1 <i>Proton Exchange Membrane Fuel cell</i>	13
2.2 <i>Bipolar Plate</i>	19
2.3 <i>Flow Channels</i>	21
2.3.1 Parameter Desain <i>Flow Channels</i>	25
2.3.2 Manajemen Air.....	26
2.3.3 <i>Pressure drop</i>	27
2.4 Komputasi Dinamika Fluida.....	30
2.5 Penelitian Sebelumnya.....	36
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir.....	47
3.2 Desain Penelitian.....	49
3.3 Peralatan.....	50
3.4 Spesifikasi <i>Flow Channels</i> dan Fluida.....	51
3.5 Rancangan Penelitian.....	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Proses Pemodelan.....	57

4.2	Analisa Pengaruh Panjang Channel terhadap <i>Pressure drop</i> dan Laju Aliran.....	61
4.3	Analisa Pengaruh Kedalaman Channel terhadap <i>Pressure drop</i> dan Laju Aliran.....	67
4.4	Analisa Pengaruh Panjang dan Kedalaman Channel terhadap Profil Kecepatan dan Laju Aliran	73
4.5	Optimasi Geometri <i>Flowchannel Fuel cell</i>	84

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	89
5.2	Saran	89

DAFTAR PUSTAKA 91

LAMPIRAN 95

UCAPAN TERIMA KASIH..... 97

BIODATA PENULIS 99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prinsip Kerja <i>Fuel cell</i>	9
Gambar 2.2	Struktur pada <i>Fuel cell</i> , Baterai, dan Mesin Pembakaran Dalam.....	9
Gambar 2.3	Proses Elektrokimia pada <i>Fuel cell</i>	11
Gambar 2.4	Kurva Polarisasi <i>Fuel cell</i>	12
Gambar 2.5	Susunan dari PEMFC	14
Gambar 2.6	Klasifikasi dari Material Bipolar Plate	20
Gambar 2.7	Penempatan Bipolar Plate pada <i>Fuel cell</i>	21
Gambar 2.8	Tipe Desain dari Flow Channels a) Single Serpentine; b) Multi Serpentine; c) Parallel; d) Interdigitated.....	22
Gambar 2.9	Penampang Melintang Bidang Aliran Flow Channels	25
Gambar 2.10	Perpaduan Bidang Ilmu CFD	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	48
Gambar 3.2	(a) Tampak Atas Flow Channels; (b) Tampak Samping Flow Channels.....	48
Gambar 3.3	Software yang Digunakan (a) Solidworks ; (b) Ansys 17.1	51
Gambar 3.4	Geometri Flow Channels.....	52
Gambar 3.5	Diagram Alir Simulasi.....	53
Gambar 3.6	Model 3D Flow Channels.....	54
Gambar 3.7	Hasil Meshing Geometri.....	55
Gambar 3.8	Perbesaran Daerah Meshing	55
Gambar 3.9	Kualitas Proses Meshing pada Fluent.....	55
Gambar 4.1	Model geometri <i>flowchannel</i> tampak depan.....	58
Gambar 4.2	Model geometri <i>flowchannel</i> tampak trimetri	59
Gambar 4.3	Input data laju aliran masuk.....	61
Gambar 4.4	Pengaruh panjang channel terhadap <i>pressure drop</i> dengan kedalaman a) 0,6 mm b) 0,8 mm c) 1,0 mm.....	63

Gambar 4.5	Pengaruh panjang channel terhadap laju aliran dengan kedalaman a) 0,6 mm b) 0,8 mm c) 1,0 mm	66
Gambar 4.6	Pengaruh kedalaman channel terhadap <i>pressure drop</i> dengan panjang a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm	69
Gambar 4.7	Pengaruh kedalaman channel terhadap laju aliran dengan panjang a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm	71
Gambar 4.8	Profil tekanan pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 0,6 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm.....	75
Gambar 4.9	Profil tekanan pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 0,8 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm.....	76
Gambar 4.10	Profil tekanan pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 1,0 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm	78
Gambar 4.11	Profil laju aliran pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 0,6 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm.....	79
Gambar 4.12	Profil laju aliran pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 0,8 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm.....	80
Gambar 4.13	Profil laju aliran pada <i>flowchannel</i> dengan kedalaman channel 1,0 mm dan panjang channel a) 10 cm b) 15 cm c) 20 cm.....	81
Gambar 4.14	Ilustrasi pembentukan boundary layer	83
Gambar 4.15	Diagram hasil simulasi terhadap <i>pressure drop</i> yang terjadi pada panjang channel dengan variasi kedalaman channel	85
Gambar 4.16	Diagram hasil simulasi terhadap laju aliran yang terjadi pada panjang channel dengan variasi kedalaman channel.....	86
Gambar 4.17	Perbandingan desain a) sebelum b) sesudah.....	87

Gambar 4.18 Perbandingan laju aliran a) sebelum b)
sesudah88

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandinagn <i>fuel cell</i> dengan sumber energi lainnya.....	7
Tabel 2.2	Perbandingan antara beberapa sumber emisi	7
Tabel 2.3	Keuntungan dan kerugian tipe-tipe <i>fuel cell</i>	15
Tabel 2.4	Perbandingan jenis-jenis dari <i>fuel cell</i>	17
Tabel 2.5	Perbandingan reaksi pada jenis-jenis <i>fuel cell</i>	18
Tabel 2.6	Fungsi dan sifat material bipolar plate.....	19
Tabel 2.7	Perbandingan konfigurasi daerah aliran pada bipolar plate	23
Tabel 2.8	Literatur penelitian tentang desain flow channels	35
Tabel 3.1	Desain Penelitian	50

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global, penurunan kualitas lingkungan hidup dan bahaya kesehatan dari emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan permasalahan yang dihadapi untuk bisa mengembangkan energi alternatif dan sumber energi yang dapat dikembangkan secara terus menerus sebagai solusi serta dapat menurunkan penggunaan bahan bakar fosil adalah menjadi agenda untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. *Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell* menjadi salah satu jalan yang dianggap memiliki potensi sebagai energi yang ramah lingkungan untuk transportasi, generator stasioner cadangan, aplikasi portabel serta untuk pengembangan yang dapat dilakukan secara terus menerus dan merupakan energi yang aman untuk digunakan. *Fuel cell* merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengkonversi reaksi kimia yang terjadi untuk menghasilkan energi listrik dengan sisa hasil reaksi berupa air.

Sehingga menjaga keseimbangan air sebagai hasil dari reaksi dalam PEM sel yang berubah-ubah secara dinamik dan cara memanajemennya merupakan salah satu tantangan teknis yang dihadapi dalam mendesain bidang aliran gas dan pengoperasian dari sistem PEM *fuel cell*. Hal ini dapat menimbulkan efek secara langsung terhadap performa dan waktu pakai dari PEM *fuel cell*.

Beberapa penelitian telah melakukan analisis mengenai desain geometri dan bidang aliran pada *fuel cell* untuk mendapatkan performa yang optimal dari *fuel cell*. Biasanya fungsi dari sebuah PEM meliputi jenis transport yang kompleks, reaksi kimia, panas, dan proses elektrokimia. Tahanan dari transport jenis gas yang memenuhi pada saluran dan pori-pori pada elektroda telah dipelajari yang membawa istilah konsentrasi potensial berlebih (Mahmud, 2009). Konsentrasi lokal dari *fuel cell* dan oksidan dipengaruhi oleh pencampuran bermacam gas yang memenuhi daerah saluran. Untuk performa yang tinggi pada PEMFC,

pemilihan tipe saluran dengan konfigurasi yang baik dapat memungkinkan sebagai cara yang dapat mengurangi permasalahan air yang berlebih. Parameter desain dengan memadukan rasio lebar rib dan lebar saluran pada serpentine dan *interdigitated* yang telah dipelajari oleh Varadharajan dan Palniswamy (2015) menunjukkan bahwa tipe aliran serpentine dan *interdigitated* memiliki pengaruh yang besar pada performa *fuel cell*. Sementara itu pada konfigurasi paralel, desain semacam ini mencakup banyak saluran paralel yang menghubungkan antara aliran masuk dan aliran keluar. Desain ini cukup sederhana dan menghasilkan nilai penurunan tekanan yang rendah dengan distribusi tekanan yang merata pada jalur paralel (Diep, 2018).

Sisi penting dari keseimbangan air dan manajemennya muncul dari fakta bahwa membran elektrolit polimer yang digunakan pada PEM *fuel cell* membutuhkan proses hidrasi yang penuh dalam rangka untuk memelihara performa dan waktu pakai, dan juga untuk menjamin proses hidrasi dari membran dibawah kondisi pengoperasian yang dinamik terpenuhi dengan derajat kesuksesan yang baik dapat diperoleh dengan cara mensuplai secara terus menerus suatu reaktan yang dapat menciptakan kondisi yang lembab pada sisi anoda dan katoda. Meskipun kelebihan air yang terjadi pada anoda lebih jarang terjadi dibandingkan pada katoda, namun laju hidrogen yang kurang akan menyebabkan air yang tercipta pada anoda akan semakin banyak. Sebagai akibat jika cairan air tidak diangkut secara memadai adalah akan terjadi kelebihan air pada sel khususnya pada bagian anoda. Keadaan air yang berlebih ini akan membuat performa dari PEM *fuel cell* akan menjadi tidak dapat diprediksi, tidak nyata dan tidak dapat berulang dalam kondisi operasi yang sama secara nominal dan memerlukan diagnosa dan skema eksperimen yang rumit untuk bisa mendapatkan hasil yang konsisten dengan performa yang rendah dan pembatasan densitas arus. Untuk itu manajemen air telah menjadi sesuatu yang sulit apabila terlalu banyak maupun terlalu sedikit dapat memiliki dampak merugikan terhadap performa dan waktu pakai dari *fuel cell*. Pengelolaan yang sempurna dari

keseimbangan air dibawah pengoperasian yang dinamis memiliki tantangan yang signifikan untuk desain dan operasi dari PEM *fuel cell* dan oleh karena itu manajemen air menjadi isu yang kritical untuk PEM *fuel cell* (Xianguo, 2006).

Pada penelitian ini akan menganalisis pengaruh dari geometri desain dari bidang aliran pada anoda *fuel cell* untuk melihat penurunan tekanan yang terjadi dan laju aliran yang mengalir. Hal ini untuk bisa mengatasi masalah manajemen air yang ada pada *fuel cell*. Proses Analisa dilakukan pada panjang aliran channel dan kedalaman channel dengan tipe aliran paralel.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini terdapat rumusan masalah yang digunakan dari latar belakang yang telah disusun sebelumnya. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh dari panjang dan kedalaman *flow channel* pada sisi anoda *bipolar plate* terhadap *Pressure drop* dan laju aliran hidrogen PEM *fuel cell*?
2. Bagaimana menentukan desain optimum dari *flowchannel* terhadap *Pressure drop* dan laju aliran dari gas hidrogen pada *fuel cell* dengan menggunakan *computational fluid dynamics*?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan untuk mencapai penelitian yang diinginkan. Batasan masalah pada penelitian ini adalah

1. Hidrogen yang mengalir merupakan hidrogen murni.
2. Permukaan daerah aliran halus.
3. Hidrogen tidak bereaksi pada membran.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah yang telah dirumuskan diatas didapat tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menganalisis pengaruh panjang dan kedalaman *flow channel* pada sisi anoda *bipolar plate* terhadap aliran hidrogen.
2. Menganalisis desain optimum dari *flow channel* terhadap *Pressure drop* dari aliran hidrogen pada *fuel cell* dengan menggunakan *computational fluid dynamics*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan analisis secara komputasi terhadap aliran hidrogen pada *flow channel* dari proton exchange membrane *fuel cell* untuk bisa mendapatkan desain yang optimum sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam proses fabrikasi *fuel cell* tim Antasena ITS dalam aplikasi mobil hemat energi untuk kemajuan bangsa dan negara Indonesia.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fuel cell*

Fuel cell merupakan sebuah alat elektrokimia yang memiliki konsep yang hampir sama dengan sebuah baterai yang memanfaatkan unsur kimia dengan tujuan untuk memperoleh suatu aliran listrik (breeze,2017). Sebuah baterai didesain untuk menyimpan energi listrik secara sementara melalui senyawa kimia yang ada pada sebuah baterai, namun ketika energi listrik yang ada dalam baterai digunakan maka energi yang tersimpan pada senyawa kimia yang ada di dalam baterai tidak akan bertahan lama. Namun pada sebuah *fuel cell*, tidak ada senyawa kimia yang digunakan untuk menyimpan energi listrik. *Fuel cell* secara sederhana adalah tempat untuk senyawa kimia melakukan reaksi sehingga menghasilkan energi listrik. Dimana reaktan kimia berasal dari luar *fuel cell*. Sehingga selama masih ada reaktan kimia yang bisa direaksikan oleh *fuel cell*, maka *fuel cell* dapat menghasilkan energi listrik. Reaktan tersebut berupa gas hidrogen dan oksigen.

Terdapat beberapa keuntungan yang didapat dalam penggunaan *fuel cell* diantaranya (Barbir,2013).

1. Menghasilkan efisiensi yang sangat tinggi.
2. Menjanjikan dalam menghasilkan emisi yang rendah.
3. Dapat menjawab isu masalah ketahanan energi nasional.
4. Sederhana dan menjanjikan dalam penggunaan yang murah.
5. Tidak menghasilkan getaran dan memiliki umur yang panjang.
6. Tidak menghasilkan suara dalam pengoperasian.
7. Memiliki ukuran dan berat yang kecil.

Fuel cell sendiri merupakan sebuah alat yang menakjubkan dari sebuah perkembangan teknologi (Behling, 2013). *Fuel cell* memiliki potensi dengan nilai efisiensi energi yang tinggi dalam mengkonversikan suatu reaksi kimia menjadi energi listrik. Efisiensi ini didapat karena *fuel cell* sendiri mengubah energi kimia

menjadi energi listrik dalam satu tahap secara bersamaan. Berbeda dari mesin pembakaran dalam yang memerlukan beberapa tahapan dalam mengkonversikan energi kimia. Seperti mengubah bensin menjadi energi panas melalui suatu pembakaran, lalu energi panas ini digunakan untuk menekan gas yang ada di ruang pembakaran untuk menggerakkan piston yang selanjutnya akan berubah menjadi energi mekanik. *Fuel cell* sendiri tidak hanya memiliki efisiensi yang tinggi dari mesin pembakaran dalam tetapi juga dapat memberikan efisiensi tinggi terhadap pembebanan parsial. Tabel 2.1 merupakan perbandingan antara *fuel cell* dengan sumber energi lainnya dan Tabel 2.2 merupakan perbandingan sumber polusi emisi dari beberapa sumber polusi.

Reaksi yang sederhana yang terjadi pada *fuel cell* merupakan reaksi yang ramah lingkungan karena menghasilkan produk sisa hasil reaksi berupa air dan dianggap sebagai *green technology*. Selain dari keramahan lingkungan yang dimiliki oleh *fuel cell*, keunggulan lain yang membuat *fuel cell* memiliki nilai lebih yaitu pada beberapa tipe *fuel cell* tidak memiliki bagian yang bergerak pada saat operasi yang dapat menimbulkan kebisingan yang biasanya ada pada mesin pembakaran dalam (Barbir,2013) . Prinsip mengenai teknologi *fuel cell* diawali pada pertengahan abad 19 dan pada pertengahan abad 20 *fuel cell* mulai berhasil dibangun sebagai alat teknologi tinggi. Pada Gambar 2.1 ditunjukkan skematik diagram dari prinsip kerja *fuel cell*.

Sehingga pertama kali *fuel cell* dikenalkan memiliki biaya yang mahal untuk membuat dan mengoperasikannya. Namun seiring dengan pengembangan penelitian ditemukan beberapa pengembangan untuk memperbarui teknologi dari *fuel cell*.

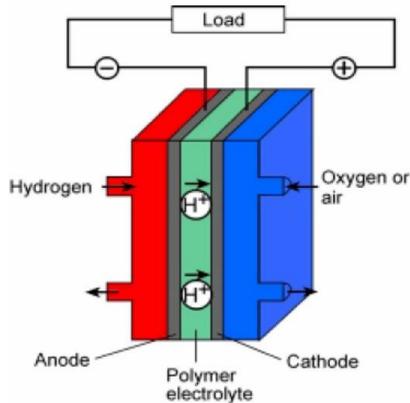
Tabel 2.1 Perbandinagn *Fuel cell* dengan Sumber Energi Lainnya (Sharaf, 2014)

Teknologi Propulsi Transportasi	Tingkatan Daya (kW)	Efisiensi (%)	Daya Spesifik (kW/kg)	Densitas Daya (kW/L)	Jangkauan Kendaraan (km)	Biaya Modal (\$/kW)
PEMFC	10-300	50-55	400-1000	600-2000	200-300	100
Mesin Bensin	10-300	15-25	>1000	>1000	600	20-50
Mesin Diesel	10-200	30-35	>1000	>1000	800	20-50
Hybrid Diesel/Baterai	50-100	45	>1000	>1000	>800	50-80
Hybrid Bensin/baterai	10-100	40-50	>1000	>1000	>800	50-80
Pb/Ni hybrid baterai	10-100	65	100-400	250-750	100-300	>100

Tabel 2.2 Perbandingan antara Beberapa Sumber Polusi Emisi (Tanwil, 2008)

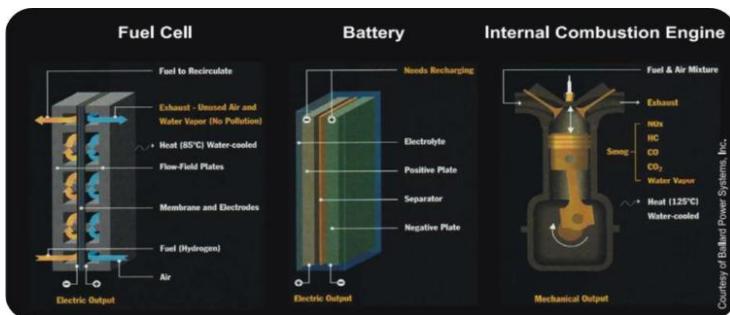
Sumber Polusi	Emisi CO ₂ (ton-C/tahun)	Emisi NO _x (ppm)	Emisi SO _x (ppm)	Kebisingan (dB)
Mesin Diesel	350	1400	250	100~110
Turbin Gas	310	<42	~0	110
Mesin Bensin	290	<100	~0	90~100
<i>Fuel cell</i>	230	1~2	~0	65

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



Gambar 2.1 Prinsip Kerja *Fuel cell* (Tawil, 2008)

Sehingga pertama kali *fuel cell* dikenalkan memiliki biaya yang mahal untuk membuat dan mengoperasikannya. Namun seiring dengan pengembangan penelitian ditemukan beberapa pengembangan untuk memperbarui teknologi dari *fuel cell*. Harga yang semula masih tinggi tetapi dengan dilanjutkannya riset dapat menurunkan harga teknologi ini. Pada Gambar 2.2 disajikan struktur secara umum pada struktur dari energi propulsi yang digunakan pada transportasi.



Gambar 2.2 Struktur pada *Fuel cell*, Baterai, dan Mesin Pembakaran Dalam (Sharaf, 2014)

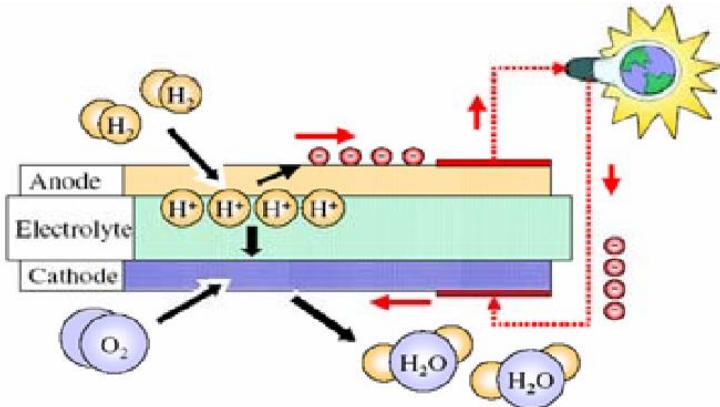
2.1.1 Prinsip Kerja *Fuel cell*

Fuel cell menghasilkan listrik secara langsung dari proses elektrokimia sama seperti halnya pada kebanyakan baterai secara umum (Tawil, 2008). Tidak seperti baterai, pada *fuel cell* bahan bakar disalurkan secara terus menerus untuk mengisi *fuel cell*. Reaktan yang digunakan adalah hidrogen dan oksigen yang mengisi reaktor pada *fuel cell* dan daya akan dihasilkan selama reaktan ini terus disalurkan. Hidrogen (H_2) biasanya dihasilkan dari bahan bakar hidrokarbon seperti gas alam atau LPG dan oksigen (O_2) berasal dari udara sekitar. Setiap *fuel cell* terdiri dari 3 bagian utama yaitu :

1. *Fuel cell* stack yang menghasilkan listrik arus searah.
2. Prosesor bahan bakar yang mengubah gas alam menjadi aliran yang kaya hidrogen.
3. Kondisioner daya yang memproses energi listrik menjadi arus bolak balik ataupun searah.

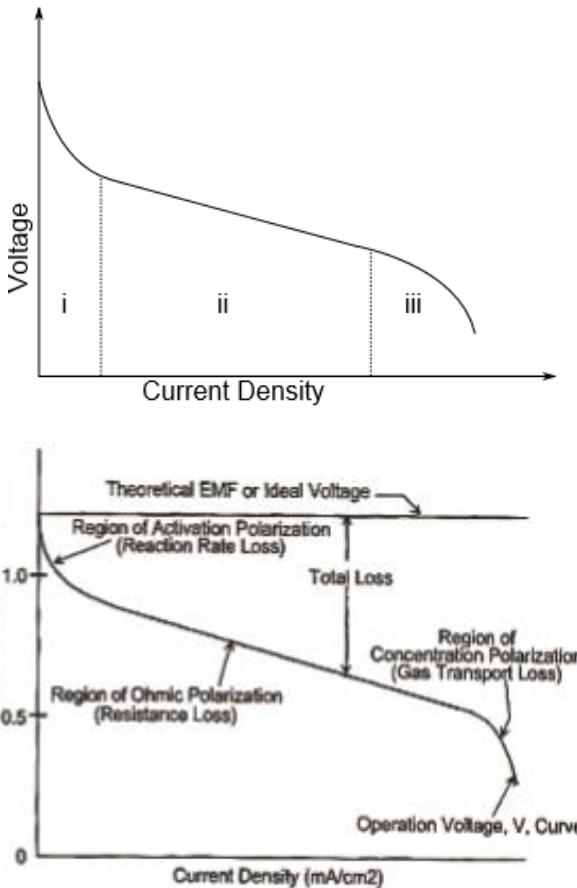
Sebuah *fuel cell* terdiri dari katoda, anoda, elektrolit, dan beban eksternal. Anoda sebagai penyedia tempat antarmuka antara bahan bakar dan elektrolit, mengkatalisasi reaksi, dan menyediakan jalur untuk elektron mengalir menuju sirkuit luar. Katoda menyediakan tempat antarmuka antara oksigen dan elektrolit, mengkatalisasi reaksi oksigen, dan menyediakan jalur untuk elektron dari eksternal sirkuit menuju elektroda oksigen. Elektrolit merupakan sebuah media konduktif ionic yang berperan sebagai pemisah antara hidrogen dan oksigen untuk mencegah pencampuran dan pembakaran langsung. Hidrogen dan oksigen masing masing-masing mengisi pada anoda dan katoda. Selanjutnya hidrogen yang berada di anoda akan mulai teroksidasi dengan dibantu oleh katalis pada waktu tertentu. Karena reaksi yang berlangsung terkontrol dan pada tingkat molekular sehingga peluang terjadinya reaksi pembentukan NO_x dan polutan lainnya tidak terjadi. Pada anoda, hidrogen akan terpecah menjadi ion positif (H^+) dan ion negatif (e^-). Sedangkan pada katoda oksigen akan bertemu dan berikatan secara elektrokimia dengan ion hidrogen dan elektron bebas

menjadi air. Secara skematik prinsip kerja dalam *fuel cell* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proses Elektrokimia pada *Fuel cell* (Tawil, 2008)

Dalam kondisi ideal, kondisi tersebut secara terus menerus akan berjalan sampai sirkuit eksternal terputus ataupun gas reaktan yang sudah mulai habis. Voltase ideal yang dihasilkan oleh suatu *fuel cell* berkisar 1,23 V (Catlin, 2013). Beberapa faktor menyebabkan voltase yang didapat mengalami penurunan sampai 0,6 V. Titik optimal dari pengoperasian *fuel cell* dapat dilihat dari kurva polarisasi dan daya. Kurva polarisasi didapatkan pada saat proses pengoperasian sembari menurunkan tegangan pada sirkuit tegangan terbuka yang dilakukan secara seragam dengan terus melihat arus yang dihasilkan dari sel. Keluaran arus dari sel ini dinormalisasikan dengan jumlah luasan dari sel untuk perhitungan kerapatan arus. Kerapatan arus ini sangat berguna untuk membandingkan sel yang berbeda pada besaran yang berbeda. Gambar 2.4 menunjukkan skema dari kurva polarisasi secara umum.



Gambar 2.4 Kurva polarisasi *Fuel cell* (Jaruwasant, 2011)

Pada kurva polarisasi dapat dibedakan menjadi tiga bagian dimana masing-masing bagian mengalami mekanisme kehilangan (*loss*) voltase yang berbeda. Sehingga sangat penting untuk bisa memahami proses kehilangan ini supaya bisa mengoptimasi kondisi operasi yang diinginkan dari sebuah sel. Pada bagian (i) dari kurva polarisasi dipengaruhi oleh hilangnya gaya aktivasi yang membuat reaksi kinetik lambat. Hal ini dapat dikurangi dengan

penggunaan katalis yang efektif, menambah jumlah katalis, menambah temperatur operasi, dan meningkatkan konsentrasi dari oksigen. Pada bagian (ii) banyak dipengaruhi oleh hilangnya tahanan listrik/ohmik. Hal ini dipengaruhi oleh tahanan listrik dari *bipolar plate* dan tahanan pada proton ketika melewati membran. Hal ini dapat dikurangi dengan penggunaan material pada *bipolar plate* yang memiliki konduktifitas yang tinggi, memastikan setiap lapisan yang berdekatan telah membuat kontak listrik yang cukup, menjaga hidrasi dari elektrolit, dan membuat lapisan elektrolit setipis mungkin.

Pada bagian (iii) dikenal sebagai bagian hilangnya transfer massa dari reaktan. Transfer massa yang berkurang pada kerapatan arus tinggi disebabkan oleh kelebihan air yang terjadi sebagai akibat dari banyaknya air yang terdapat pada lapisan difusi gas dan menghambat jalan dari gas reaktan. Sehingga diperlukan desain dari saluran yang dapat menghilangkan kelebihan air yang ada pada daerah lapisan difusi gas. Desain yang efektif akan menimbulkan pengaruh secara langsung dalam proses penghantaran reaktan. Kebanyakan *fuel cell* beroperasi didekat daerah (iii) dari kurva polarisasi yang sedapat mungkin untuk bisa diminimalisir semua tipe kehilangan (loss).

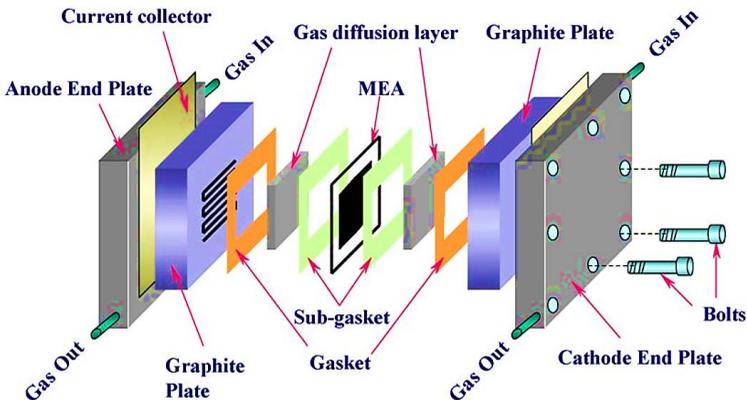
2.1.2 Proton Exchange Membrane Fuel cell

Saat ini ditemukan beberapa teknologi dari *fuel cell* yang dijadikan pengganti dari teknologi yang sebelumnya sudah ada seperti pada bidang otomotif, pada bidang pembangkit listrik dan yang dapat secara mudah untuk difungsikan. Sehingga *fuel cell* sendiri dibedakan menjadi beberapa tipe sesuai dengan penggunaan teknologinya.

Proton exchange membrane *fuel cell* (PEMFC) adalah salah satu jenis *fuel cell* dimana elektrolit sel adalah polimer terhidrasi yang berbeda dari jenis cairan yang biasanya (Breeze,2017). Nama dari PEM sendiri diambil dari nama polimer yang digunakan yaitu sebuah membrane dari asam yang apabila mengalami kontak dengan air akan menghantarkan muatan positif dari ion hidrogen.

Membran yang digunakan memiliki beberapa keunggulan diantaranya yaitu berat yang ringan dan proses fabrikasi yang relatif mudah. Keunggulan ini yang akhirnya dapat diaplikasikan dalam bidang otomotif yang sebelumnya *fuel cell* jenis ini digunakan dalam bidang militer. Tabel 2.3 menunjukkan keuntungan dan kerugian dari beberapa jenis *fuel cell* pada penggunaannya.

Penggunaan PEM *fuel cell* selanjutnya dijadikan investasi sebagai salah satu kandidat untuk menjadi suplai dari kendaraan listrik. Energi listrik yang terjadi adalah sebuah hasil dari reaksi kimia yang dapat digunakan secara eksternal dari sebuah pembebanan komponen elektrik atau juga bias digunakan secara internal untuk disimpan secara sementara yang digunakan untuk nanti. Bagian-bagian penting dari sebuah PEMFC tersusun sebagai bagian-bagian yang berlapis. Secara skematik susunan secara umum PEMFC ditunjukkan pada Gambar 2.5 .



Gambar 2.5 Susunan dari PEMFC (Shimpalee, 2006)

Tabel 2.3 Keuntungan dan Kerugian Tipe-Tipe *Fuel cell*
(Tawil, 2008)

Tipe <i>Fuel cell</i>	Keuntungan	Kerugian
Proton Exchange Membrane (PEMFC)	Densitas daya tinggi, siklus pakai yang panjang, untuk keperluan otomotif (kendaraan).	Kurangnya tolesansi terhadap CO, manajemen air dan panas, katalis yang mahal.
Alkaline (AFC)	Material yang tidak terlalu mahal, toleransi CO, kinetic yang cepat pada katoda.	Cairan elektrolit yang korosif, kurangnya toleransi terhadap CO ₂ .
Phosphoric Acid (PAFC)	Ketersediaan untuk komersialisasi, keberadaan pasar.	Relatif memiliki efisiensi yang rendah, lifetime yang terbatas.
Molten Carbonate (MCFC)	Efisiensi tinggi, pemrosesan bahan bakar secara internal, sisa panas yang baik.	Lifetime yang tidak dapat ditentukan, elektrolit yang tidak dtabil, CO ₂ yang dapat membuat keracunan.
Solid Oxide (SOFC)	Efisiensi tinggi, pemrosesan bahan bakar secara internal, sisa panas yang baik.	Temperatur operasi yang tinggi (berkaitan dengan material). Biaya yang tinggi.

Pada pengoperasiannya, sebuah PEMFC sangat sensitif dengan keberadaan dari air yang dihasilkan dari reaksi yang terjadi. Reaksi yang menghasilkan air pada katoda harus dibawa keluar dari sel. Karena hal ini akan menyebabkan kelebihan air pada sel terjadi pada sel yang mengakibatkan terganggunya reaksi pada membran. Untuk mengalirkan air keluar dari sel biasanya menggunakan bantuan udara dari luar untuk bisa mengangkut air

agar bisa keluar dari sel. Meskipun sangat penting sekali untuk tidak mengeluarkan air sepenuhnya dari sel karena ini juga akan mempengaruhi performa dari *fuel cell* sendiri. Voltase dari sebuah sel dari PEM sel adalah berkisar diantara 0,7-0,8 V pada energi maksimal (Behling,2013). Perkembangan awal sebuah stack *fuel cell* diharapkan dapat memiliki kapasitas 250kW.

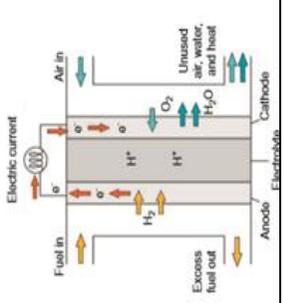
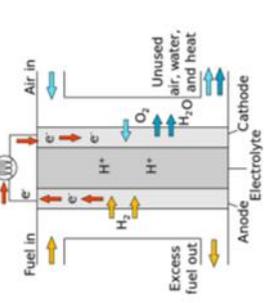
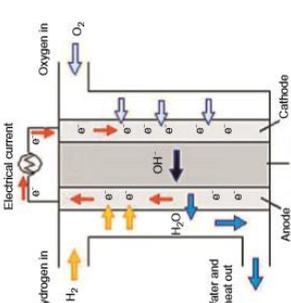
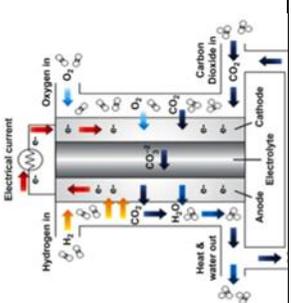
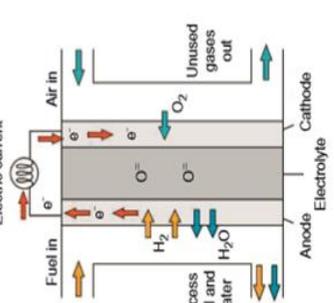
Namun sekarang ini unit paling besar adalah dengan kapasitas 100kW. Sementara itu perusahaan banyak mengembangkan unit yang lebih kecil. Sel PEM yang lebih kecil digunakan sebagai cadangan dan energi yang dapat digunakan setiap saat. Aplikasi yang lain dari bentuk yang kecil sebagai sumber listrik yang mudah untuk dibawa kemana-mana. Unit yang lebih kecil juga menghasilkan keuntungan dengan efisiensi tinggi dalam penggunaan ketika pengoperasian untuk memberikan harga lebih murah dan efisiensi yang tinggi.

Pada Tabel 2.4 dapat dilihat perbandingan tipe-tipe dari *fuel cell* dan pada Tabel 2.5 merupakan proses reaksi yang terjadi pada tiap jenis *fuel cell* yang ditampilkan sebagai berikut.

Tabel 2.4 Perbandingan jenis-jenis dari *fuel cell* (US. Departement of Energy, 2004)

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	Membrane penukar ion polimerik terhidrasi	Potassium hidroksida yang dimobilisasi ataupun tidak oleh matriks asbestos	Asam fosfat yang tidak termobilisasi pada SiC	Karboonat cair yang tidak termobilisasi pada LiAlO ₂	keramik
Elektroda	Karbon	Logam transisi	Karbon	Nikel dan Nikel Oksida	Keramik dan keramik logam
Katalis	Platinum	Platinum	Platinum	Material elektroda	Material elektroda
Interkoneksi	Karbon atau logam	Logam	Grafit	Baja tahan karat atau nikel	Nikel, keramik, atau baja
Temperatur operasi	40-80 °C	65-220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Pembawa muatan	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ⁻
Komponen utama sel	Berbasis karbon	Berbasis karbon	Berbasis grafit	Berbasis baja tahan karat	Keramik
Produk dari manajemen air	Menguap	Menguap	Menguap	Berupa gas	Berupa gas
Manjemen panas produk	Proses gas + media pendingin cair	Proses gas + sirkulasi elektrolit	Proses gas + media pendingin cair atau turunan uap	Reformasi internal + proses gas	Reformasi internal + proses gas
Konversi perpindahan eksternal CO ke hidrogen	Ya, ditambah dengan pemurnian untuk menghilangkan bekas CO	Ya, ditambah dengan pemurnian untuk menghilangkan CO dan CO ₂	ya	tidak	tidak
Reformator eksternal untuk bahan bakar hidrokarbon	ya	ya	ya	Tidak, untuk beberapa bahan bakar	Tidak, untuk beberapa bahan bakar dan desain sel

Tabel 2.5 Perbandingan Reaksi pada Jenis-Jenis Fuel cell

Fuel cell	Reaksi Anoda	Reaksi Katoda	Skema Gambar
Proton Exchange Membrane (PEMFC)	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	
Phosphoric Acid (PAFC)	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	
Alkaline (AFC)	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$	
Molten Carbonate (MCFC)	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	
Solid (SOFC)	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	

2.2 Bipolar Plate

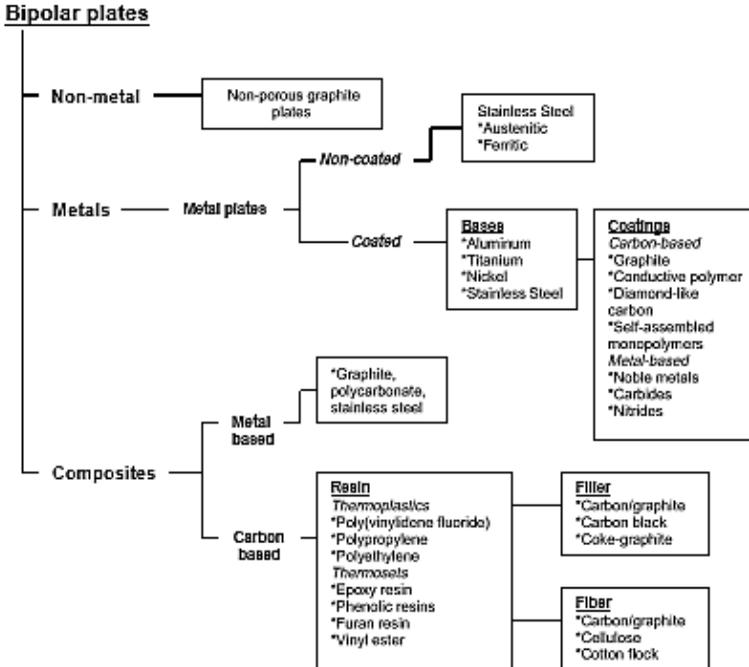
Setelah membrane electrode assemble dari *fuel cell* telah tersusun maka perlu ditempatkan pada suatu tempat dalam tumpukan *fuel cell* untuk bisa mendistribusikan hidrogen dan oksidan untuk bisa mengumpulkan arus untuk bisa memberikan daya pada perangkat yang diinginkan. Pada *fuel cell* yang menggunakan satu sel tidak terdapat suatu *bipolar plate*, tapi pada *fuel cell* yang menggunakan lebih dari satu sel maka setidaknya terdapat satu *bipolar plate*. Terdapat beberapa fungsi yang dilakukan oleh *bipolar plate*. *Bipolar plate* menjadi komponen kunci dari PEM *fuel cell* dan susunannya (Zhang,2013). Adapaun fungsi dan sifat yang harus dimiliki oleh suatu *bipolar plate* ditunjukkan pada Tabel 2.6 sebagai berikut ini.

Tabel 2.6 Fungsi dan Sifat Material dari *Bipolar Plate* (Hermann, 2005)

Fungsi	Sifat Fisika dan Kimia
Distribusi dan Manajemen bahan bakar dan juga oksidan serta gas residu dan cairan.	Permeabilitas H_2 : $<10^{-4} \text{cm}^3/\text{s cm}^2$, ketahanan terhadap korosi: $<0.016 \text{mA}/\text{cm}^2$
Mengalirkan arus listrik.	Konduktivitas elektrik: $<0.01 \Omega \text{cm}^2$
Manajemen panas.	Konduktivitas panas : setinggi mungkin
Pemisah antara sel di dalam stack	Densitas: $<5 \text{gm}/\text{cm}^2$, kekuatan kompresi: $>22 \text{lb}/\text{in}^2$

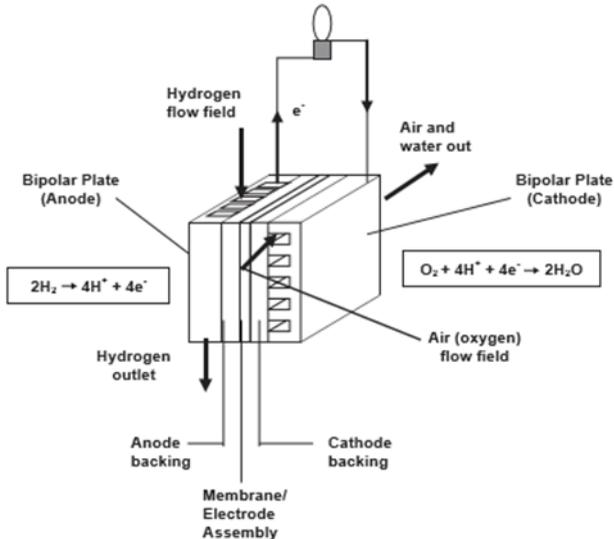
Biasanya untuk bisa menjalankan fungsi ini secara bersamaan, sebuah *bipolar plate* dirancang dengan menggunakan material yang khusus dan desain dari plat yang baik. Desain pola aliran yang biasanya digunakan pada permukaan *bipolar plate* adalah desain aliran *serpentine*, paralel, *interdigitated*, atau tipe pin. Sedangkan material yang digunakan biasanya adalah material *stainless steel*, titanium, grafit berpori, dan juga doped polimer. Pada Gambar 2.6

ditunjukkan klasifikasi dari material yang biasa digunakan dalam *bipolar plate*.



Gambar 2.6 Klasifikasi dari Material *Bipolar Plate* (Hermann, 2005)

Kebanyakan dari *bipolar plate* dari PEM *fuel cell* menggunakan resin yang diimpregmentasi dengan grafit. Keberadaan dari *bipolar plate* menyumbang massa dan juga volume paling banyak dalam *stack fuel cell* sehingga sangat dibutuhkan untuk bisa membuat plat yang memiliki dimensi lebih kecil untuk kebutuhan portable dan bidang otomotif. Di dalam *fuel cell* penempatan dari *bipolar plate* ditunjukkan pada Gambar 2.7 dibawah ini.



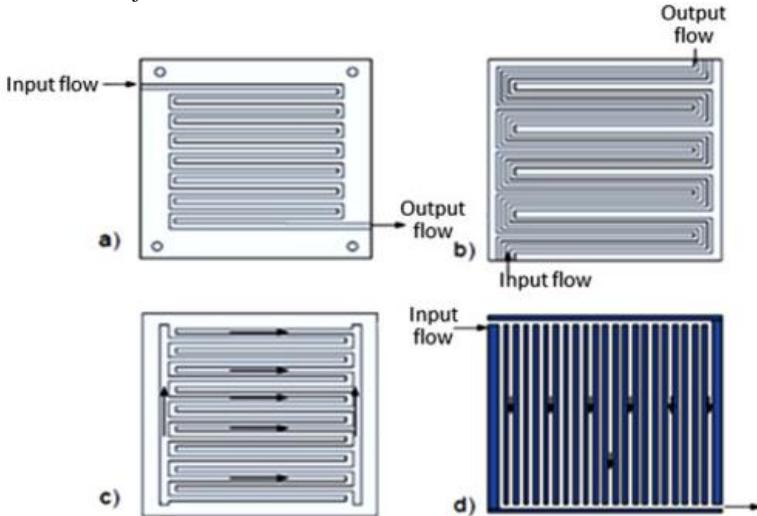
Gambar 2.7 Penempatan *bipolar plate* pada *Fuel cell* (Hermann, 2005)

Pada Tabel 2.7 disajikan perbandingan dari penggunaan susunan aliran yang digunakan pada *bipolar plate*.

2.3 Flow Channels

Desain *flow channel* merupakan hal penting dalam manajemen air pada PEMFC untuk meningkatkan performa dari *fuel cell* (Manshoor, dkk, 2017). Terdapat beberapa variasi dari susunan bidang aliran pada *bipolar plate* yang telah dikembangkan dan dipatenkan (Xianguo, 2006). Susunan atau rancangan dari bidang aliran ini memainkan peranan penting dalam desain bidang aliran yang akan menimbulkan pengaruh pada distribusi gas dan juga pengeluaran air. Dari jenis desain bidang aliran yang ada, paralel dan serpentine line yang saat ini banyak digunakan (Zhang, 2013). Dalam *fuel cell*, suatu bidang aliran harus memiliki geometri desain

yang baik untuk bisa meminimalisir *Pressure drop* dan memberikan transfer massa yang memadai dan merata melalui gas diffusion layer menuju permukaan katalis agar bisa melangsungkan reaksi. Pada Gambar 2.8 ditunjukkan beberapa tipe desain dari *flow channel*.



Gambar 2.8 Tipe Desain dari *Flow Channel*. a) Single Serpentine; b) Multi Serpentine; c) Parallel; d) *Interdigitated* (Sivakumar, 2016)

Jalur aliran serpentine memiliki daerah yang berkelanjutan dari saat dimulai aliran sampai dengan berakhirnya sebuah aliran. Keuntungan dari aliran serpentine ini adalah dapat mencapai seluruh daerah aktif dari elektroda dan mengurangi aliran tetap dalam *flow channel*. Kerugian dari jalur aliran serpentine adalah kenyataan bahwa reaktan akan berkurang dengan sering panjangnya jalur aliran dari *channel* (Spiegel, 2008). *Pressure drop* yang terjadi pada serpentine *channel* sangat tinggi dikarenakan kecepatan aliran dengan kuadrat dari ukuran fitur *channel* dan panjang dari *channel* yang berbanding terbalik dengan ukuran fitur dari itu sendiri. Untuk penggunaan dengan

Tabel 2.7 perbandingan perbedaan konfigurasi daerah aliran pada bipolar plate.

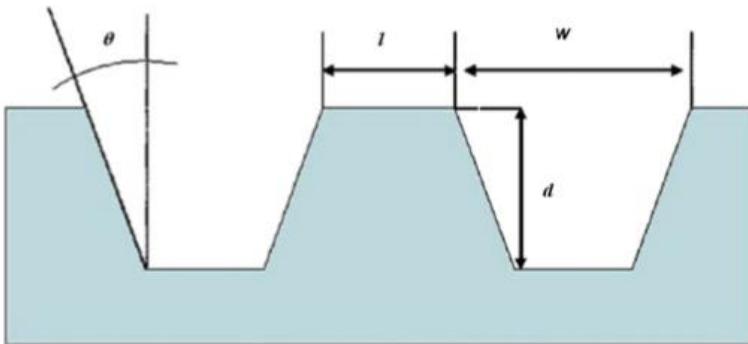
No	Desain	Deskripsi	Keuntungan	Kerugian
1.	Tipe Paralel (Lurus)	Fluida mengalir melalui saluran paralel	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Pressure drop</i> rendah - Distribusi gas merata 	<ul style="list-style-type: none"> - Penyumbatan air pada jalur dapat menghalangi aliran atau menyebabkan daerah mati - Tidak dapat memenuhi penghilangan air - Penurunan tekanan yang tidak memadai pada outlet akan mengakibatkan distribusi yang tidak seragam
2.	Paralel Serpentine	Fluida mengalir melalui beberapa jalur kontinu dari awal hingga akhir	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Pressure drop</i> yang lebih rendah dibanding single serpentine - Pembuangan air yang memadai - Dapat mencakup seluruh luasan aktif 	<ul style="list-style-type: none"> - Masih memiliki nilai relative tinggi dari <i>pressure drop</i> berdasar pada panjang dari saluran - Penipisan reaktan di sepanjang saluran menyebabkan distribusi yang tidak merata
3.	Single Serpentine	Fluida mengalir melalui jalur kontinu dari awal hingga akhir	<ul style="list-style-type: none"> - Pembuangan air yang baik berdasar pada kecepatan aliran yang tinggi - Dapat mencakup seluruh luasan aktif - Penggunaan sering pada luasan aktif yang kecil 	<ul style="list-style-type: none"> - Penipisan reaktan di sepanjang saluran menyebabkan aliran yang tidak merata - <i>Pressure drop</i> yang tinggi - Masalah terhadap oksidan udara - Kelebihan air yang berbahaya pada saat kerapatan arus yang tinggi - Penumpukan air pada saluran yang berbelok menyebabkan reduksi kerapatan arus lokal terjadi
4.	Interdigitated	Menggunakan saluran terputus yang diskontinu untuk memaksa gas melalui GDL dibawah rib untuk beralih dari aliran masuk yang berlipat ganda menuju aliran keluar	<ul style="list-style-type: none"> - Pembuangan air yang baik berdasar pemaksaan gas melalau GDL - Memiliki transfer massa yang baik 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Pressure drop</i> yang tinggi, tergantung pada porositas dan ketebalan GDL - Kemungkinan kerusakan jangka panjang pada GDL - Tidak banyak digunakan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

menghasilkan kerapatan arus tinggi, penggunaan ukuran plat yang lebih besar, atau ketika menggunakan udara sebagai oksidan maka desain alternative bisa dijadikan langkah lain dengan perpaduan yang didasarkan pada serpentine line. Pada penggunaan bidang aliran paralel distribusi dari gas dan tekanan sepanjang aliran dari *channel* mengalami *Pressure drop* yang tidak beraturan.

2.3.1 Parameter Desain Flow Channel

Ukuran dari *channel* akan secara signifikan berpengaruh pada performa dari sel karena akan memiliki dampak pada aliran dari reaktan gas dan distribusinya, serta pengelolaan air yang ada pada bidang aliran. Pada Gambar 2.9 ditunjukkan penampang melintang dari daerah aliran *flow channel*.



Gambar 2.9 Penampang melintang bidang aliran *flow channel* (Zhang, 2013)

Parameter utama dari geometri *flow channel* yaitu lebar *channel* (w), kedalaman *channel* (d), rib/lebar gunungan (l), dan sudut dinding (α). Panjang *channel* (L) adalah parameter geometri lain dimana panjang *channel* sendiri tergantung pada ukuran dari pengaplikasian tertentu. Pengoptimasian dari parameter geometri dari *flow channel* dapat membuat daerah distribusi dari reaktan gas semakin teratur sehingga pengelolaan dari air dan panas semakin baik dan akan membawa performa dari *fuel cell* menjadi semakin

baik. Parameter geomtri ini juga akan berpengaruh pada aliran yang terjadi pada daerah aliran. Aliran yang biasa terjadi adalah berupa aliran laminar dan aliran turbulen. Pada aliran turbelen meskipun aliran ini dapat meningkatkan pengangkutan massa dari reaktan dan panas dari reaksi, namun pada aliran turbulen juga akan meningkatkan nilai dari *Pressure drop* yang terjadi.

Pada tipe aliran yang lain yaitu aliran laminar, Sudah cukup untuk bisa menghantarkan massa reaktan menuju elektroda untuk melangsungkan reaksi elektrokimia dari *fuel cell* walaupun berada pada kondisi yang ekstrim dari pengoperasian *fuel cell*. Aliran turbulen juga mangalami perubahan yang tidak menentu yang akan mempengaruhi peforma dari PEM *fuel cell* disamping PEM *fuel cell* dapat merespon perubahan konsentrasi reaktan yang terjadi hampir secara instan. Oleh karena itu, secara umum untuk merancang desain dari *flow channel* pada anoda maupun katoda juga harus dipertahankan bahwa aliran yang mngalir merupakan aliran laminar dengan nilai Reynold number yang rendah (Xianguo, 2006).

2.3.2 Manajemen Air

Manajemen air merupakan salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam meneliti soal *fuel cell* karena akan berpengaruh sangat besar terhadap peforma dan durabilitas dari sebuah *fuel cell* utamanya dalam *fuel cell* jenis PEMFC. Karena membrane yang digunakan dalam *fuel cell* merupaka membrane terhidrasi. Air dihasilkan dari reaksi elektrokimia pada katoda yang akan berdifusi menuju anoda untuk menghidrasi membrane. Efek elektro-osmotik terjadi ketika air yang ada pada anoda disalurkan menuju katoda ketika proton berdifusi melalui membran. Akibatnya, kelebihan air akan terjadi yang akan terakumulasi pada saluran dan akan menghalangi jalannya reaktan. pada sebuah *fuel cell*, kelebihan akan menyebabkan *water flooding* dan kekurangan air akan menyebabkan dehidrasi pada membran. Reaktan yang terhalang pada saluran akan menyebabkan distribusi arus yang tidak merata dan penurunan peforma pada *fuel cell* (lim, 2016).

Saluran didesain untuk bisa menghantarkan reaktan untuk berdifusi secara merata pada lapisan katalis untuk bereaksi. Geometri saluran akan mempengaruhi dari manajemen air yang ada dan performa dari *fuel cell*.

Kelebihan air pada anoda tidak sebanyak pada katoda, namun laju aliran hidrogen yang rendah akan menyebabkan lebih banyak air yang ada pada anoda yang akan menurunkan kinerja *fuel cell* (Wei, 2009). Kelebihan air pada anoda ini biasanya dipengaruhi oleh beberapa kondisi operasi tertentu seperti berikut.

1. laju reaktan yang rendah dan juga temperature operasi yang rendah.
2. Difusi balik air dari katoda yang secara simultan dengan keadaan hidrasi yang rendah dari reaktan gas *fuel cell*.
3. Injeksi dari cairan air untuk pendinginan dan pelembapan sel yang dapat menyebabkan akumulasi air pada anoda.

2.3.3 *Pressure drop*

Pada beberapa jenis *fuel cell* terdapat beberapa jenis daerah aliran yang berbeda tergantung pada orientasi dari jumlah *channel* yang sebuah *flowchannel*. Sehingga *Pressure drop* yang terjadi di sepanjang *channel* merupakan penurunan tekanan pada semua daerah aliran. Pada tipikal suatu *flow channel* aliran dari suatu gas bergerak dari ujung satu ke ujung lainnya dengan kecepatan rata-rata yang sama. Aliran yang bergerak berasal dari perbedaan tekanan yang terjadi pada jalur masuk dan jalur keluar. Dengan menambah perbedaan tekanan atau *Pressure drop* yang terjadi diantara jalur masuk dan jalur keluar, kecepatan aliran akan meningkat. Aliran yang mengalir pada *channel bipolar plate* biasanya memiliki tipikal aliran laminar dan proposional dari aliran rata-rata. *Pressure drop* yang terjadi pada aliran yang ada dapat diketahui melalui persamaan sebagai berikut.

$$\Delta P = f \frac{L_{Chan}}{D_H} \rho \frac{v^2}{2} + \Sigma K_L \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.1)$$

Dimana f merupakan faktor gesekan, L_{chan} merupakan panjang dari *channel* (m), D_H merupakan diameter hidrolis (m), ρ merupakan densitas dari fluida (kg/m^3), v merupakan kecepatan rata-rata (m/s), dan K_L merupakan tahanan local.

Dimana untuk panjang *channel* dapat ditentukan melalui persamaan sebagai berikut.

$$L_{chan} = \frac{A_{sel}}{N_{ch}(w_c + w_l)} \quad (2.2)$$

Dimana A_{sel} merupakan luasan aktif dari sel, N_{ch} merupakan jumlah dari *channel* yang parallel, w_c merupakan lebar dari *channel*, dan w_l merupakan jarak antar *channel* yang berdekatan.

Faktor gesekan pada *channel* dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$f = \frac{56}{Re} \quad (2.3)$$

Kecepatan aliran yang masuk dalam daerah aliran *fuel cell* dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$v = \frac{Q_{stack}}{N_{sel}N_{ch}A_{ch}} \quad (2.4)$$

Dimana v merupakan kecepatan pada *channel* (m/s), Q_{stack} merupakan aliran udara rata-rata pada jalur masuk stack *fuel cell* (m^3/s), N_{sel} adalah jumlah dari sel dari satu rangkaian *fuel cell*, N_{ch} merupakan jumlah *channel* yang parallel, dan A_{ch} merupakan luas penampang dari *channel*.

Jumlah total aliran yang memasuki stack rata-rata adalah sebagai berikut.

$$Q_{stack} = \frac{I}{4F} \frac{S_{O_2}}{r_{O_2}} \frac{RT_{in}}{P_{in} - \varphi P_{sat}(T_{in})} N_{sel} \quad (2.5)$$

Dimana Q merupakan volume aliran rata-rata (m^3/s), I merupakan arus listrik pada stack *fuel cell*, F merupakan konstanta faraday, S_{O_2}

merupakan rasio stokiometri dari oksigen, r_{O_2} merupakan jumlah oksigen yang ada di udara, R merupakan konstanta gas ideal, T_{in} merupakan temperatur jalur masuk dari stack, P_{in} merupakan tekanan pada jalur masuk dari stack, ϕ merupakan kelembapan relative lingkungan, P_{sat} merupakan tekanan jenuh pada saat diberikan temperatur pada jalur masuk, dan N_{sel} merupakan jumlah dari sel pada stack *fuel cell*.

Dengan mengkombinasikan dengan persamaan-persamaan sebelumnya, kecepatan dari jalur masuk dari stack *fuel cell* dapat didefinisikan secara sederhana sebagai berikut.

$$v = \frac{i}{4F} \frac{S_{O_2} (w_c + w_l) L_{chan}}{r_{O_2} w_c d_c} \frac{RT}{P - \phi P_{sat}} \quad (2.6)$$

Aliran dari gas yang terdapat pada *flow channel* dapat berupa aliran laminar, turbulen ataupun aliran transisi yang dapat diketahui kriteria aliran tersebut melalui sebuah nilai yang dikenal sebagai Reynold's number (Re). Nilai ini merupakan rasio antara inertial force terhadap viscous forces yang dapat dituliskan menjadi persamaan berikut.

$$Re = \frac{\rho v_m D_{ch}}{\mu} = \frac{v_m D_{ch}}{\nu} \quad (2.7)$$

Dimana v_m merupakan karakteristik dari kecepatan aliran (m/s), D_{ch} merupakan diameter dari *channel* ataupun panjang dari *channel* (m), ρ merupakan kerapatan dari fluida yang mengalir (kg/m^3), μ merupakan viskositas dari fluida yang mengalir ($kg/m.s$) dan ν merupakan viskositas kinematika (m^2/s). Untuk Re yang bernilai kecil (<2300) maka aliran yang terjadi adalah aliran laminar, namun ketika nilai dari Re besar (>4000) maka aliran yang terjadi merupakan aliran turbulen yang berarti akan terjadi fluktuasi yang berubah-ubah. Nilai Re yang berada diantara 2300 dan 4000 disebut sebagai aliran transisional, dimana kebanyakan aliran yang terjadi adalah aliran laminar.

Untuk Reynold's number pada *channel* yang memiliki geometri persegi maka persamaannya sebagai berikut.

$$Re_h = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad \text{dimana } D_h = \frac{4 A_c}{P} \quad (2.8)$$

Dari hubungan diatas melalui *channel* dengan geometri segi empat dapat diberikan persamaan untuk faktor gesekan yang terjadi dengan hubungan Re diatas.

$$fRe = 24(1 - 1.3553 \times \alpha^* + 1.9467 \times \alpha^{*2} - 1.7012 \times \alpha^{*3} + 0.9564 \times \alpha^{*4} - 0.2537 \times \alpha^{*5}) \quad (2.9)$$

dimana α^* merupakan aspek rasio dari perpotongan dari geometri segi empat dan $\alpha^* = w/d$. dari persamaan diatas untuk saluran bidang segi empat nilai fRe tergantung pada aspek rasio saluran, w_c/d_c sehingg persamaan dapat dijadikan sebagai berikut.

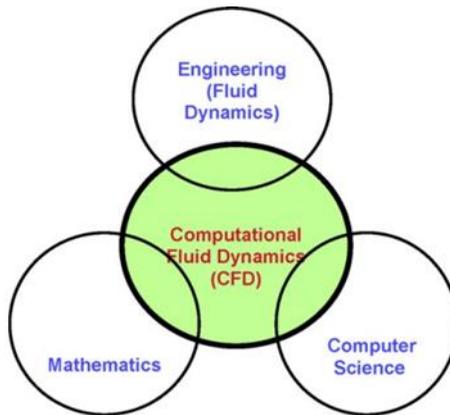
$$fRe = 55 + 41.5 \exp\left(\frac{-3.4}{w_c/d_c}\right) \quad (2.10)$$

Untuk saluran segi empat nilai dari $fRe \sim 56$

2.4 Komputasi Dinamika Fluida

Computational fluid dynamics (CFD) telah menjadi metode matang yang digunakan pada penerepan pada bidang industri dan juga pada penelitian akademis. Pada awalnya, penggunaan metode ini hanya terbatas pada bidang teknik berteknologi tinggi seperti pada bidang aeronautika dan astronotika, tetapi bidang ilmu ini sudah banyak diadopsi sebagai metode untuk menyelesaikan masalah kompleks lainnya di bidang teknik modern (Liu, 2008). CFD berasal dari berbagai disiplin ilmu seperti mekanika fluida dan juga perpindahan panas. Pada proses penerapannya tidak hanya menggunakan disiplin ilmu mekanika fluida dengan matematika tetapi juga dipadukan ilmu komputer yang

diilustrasikan pada Gambar 2.10 dibawah ini. Mekanika fluida pada dasarnya adalah ilmu yang mempelajari tentang fluida yang bergerak dan dalam keadaan diam. CFD selanjutnya didedikasikan untuk memelajari fluida yang bergerak dan bagaimana proses aliran fluida tersebut mempengaruhi daerah disekitarnya seperti perpindahan panas dan reaksi kimia pada aliran pembakaran. Hal ini yang secara langsung dapat menjelaskan deskripsi dari dinamika fluida yang ada pada istilah diatas.



Gambar 2.10 Perpaduan disiplin ilmu CFD (Liu, 2008)

Dalam hal untuk menyelesaikan persamaan matematika maka akan dikonversikan menjadi bahasa computer tingkat tinggi untuk bisa masuk dalam program computer atau perangkat lunak. Bagian komputasi berarti pendalaman yang berkaitan dengan aliran fluida yang disimulasikan secara numerik dimana akan melibatkan penggunaan program computer atau perangkat lunak yang dilakukan pada komputer untuk mencapai solusi numerik. Proses untuk bisa mendapat solusi komputasi terdiri dari dua tahap yaitu tahap pertama melibatkan konversi dari persamaan diferensial parsial dan tahap kedua kondisi auxiliary (batas dan mulai) menjadi sistem persamaan aljabar diskrit (Tu, 2013). CFD juga menjadi

salah satu dari tiga dasar metode penyelesaian dari dinamika fluida dan perpindahan panas. CFD menjadi salah satu alat yang banyak digunakan baik untuk penelitian murni atau pengaplikasian pada bidang penelitian dan juga pada penerapan di bidang industry. Simulasi komputasi dan analisisnya semakin banyak dilakukan pada aplikasi rekayasa fluida yang mencakup pesawat (rekayasa bidang aerospace), kendaraan bermotor (rekayasa bidang otomotif), pernapasan dan aliran darah (rekayasa bidang kimia), sungai dan polutan (rekayasa bidang sipil dan lingkungan), turbin dan furnace (rekayasa bidang listrik), serta olahraga renang dan golf (rekayasa bidang olahraga). Dengan adanya metode CFD ini dapat meningkatkan pemahaman tentang bagaimana suatu komponen sistem akan berjalan pada sistem tersebut. Sehingga dapat dilakukan perbaikan desain dan juga optimasi terhadap desain komponen tersebut.

Terdapat persamaan-persamaan dasar yang dapat menjelaskan tentang perilaku fluida untuk memperdalam dari makna dinamika fluida. Persamaan ini didasarkan pada penyelidikan pergerakan interaktif dari partikel individu dalam jumlah yang besar dan dapat diartikan sebagai pergerakan dari atom-atom. itu berarti bahwa dapat diasumsikan bahwa kerapatan yang terjadi pada fluida cukup tinggi sehingga dapat diperkirakan sebagai sesuatu yang kontinum. Kontinum ini berarti elemen fluida ini berukuran sangat kecil namun masih mengandung sejumlah partikel yang cukup sehingga kita dapat menentukan kecepatan rata-rata dan energi kinetic rata-rata. Sehingga dapat ditentukan kecepatan, tekanan, temperatur, kerapatan dan hal penting lainnya yang dapat menentukan besaran angka yang terjadi pada titik-titik aliran fluida. Derivasi dari persamaan utama dinamika fluida didasarkan pada hukum konservasi yang mencakup :

1. Konservasi massa
2. Konservasi momentum
3. Konservasi energi

Hukum konservasi ini membawa pada gagasan untuk membedakan bidang aliran menjadi volume dan konsentrasi pada

proses memodelkan sifat fluida pada suatu wilayah yang telah dibatasi. Untuk menganalisa aliran fluida dapat dengan mengasumsikan dalam beberapa kondisi batas seperti steady state, aliran kompresibel, dan bentuk aliran turbulen. Sehingga persamaan dapat dituliskan sebagai berikut.

1. Persamaan konversi massa

Apabila kita membatasi pandangan terhadap cairan atau fluida yang memiliki satu fasa, hukum konversi massa menunjukkan fakta bahwa massa tidak dapat dibuat dalam sistem fluida seperti itu dan juga tidak dapat dihilangkan. Karena untuk fluida yang diam, variasi dari massa akan mengakibatkan perpindahan dari partikel fluida. Aliran massa dari suatu fluida melalui suatu permukaan yang telah ditentukan dalam ruang adalah sama dengan hasil dari perkalian antara kerapatan, luas permukaan dan komponen kecepatan yang tegak lurus terhadap permukaan. Oleh karena itu, kontribusi fluks konvektif fluks di setiap elemen permukaan yang berpotongan dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\rho(v \cdot n)dS. \quad (2.11)$$

Dengan konveksi n selalu menunjukkan dari control volume, dan apabila berbicara tentang aliran masuk jika hasil dari $(v \cdot n)$ adalah negative, dan jika aliran keluar bernilai positif dan sebab itu massa meninggalkan volume control. Seperti yang dinyatakan diatas, tidak ada sumber volume atau permukaan yang ada. Jadi persamaan umum akan didapatkan sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho(v \cdot n)dS = 0 \quad (2.12)$$

Persamaan diatas merupakan bentuk integral dari persamaan kontiunitas dari hukum konversi massa.

2. Persamaan konversi momentum

Derivasi dari persamaan konversi momentum dapat melihat kembali mengenai hukum kedua yang menyatakan bahwa variasi momentum disebabkan oleh gaya total yang bekerja pada elemen massa. Untuk momentum dari bagian yang sangat kecil dari sebuah kontrol volume terdapat persamaan sebagai berikut.

$$\rho \cdot v \cdot d\Omega \quad (2.13)$$

Variasi waktu pada momentum dalam volume kontrol sama dengan

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \cdot v \cdot d\Omega \quad (2.14)$$

Oleh karena itu, nilai yang dianggap tetap dari hasil persamaan ini adalah kerapatan dan kecepatan. Sebagai contoh adalah seperti persamaan berikut.

$$\rho v = [\rho v, \rho v, \rho \omega]^T \quad (2.15)$$

Tensor fluks konvektif yang menggambarkan transfer momentum yang melintasi batas volume kontrol terdiri dalam sistem koordinat kartesius dari tiga komponen berikut.

x-komponen : $\rho v \cdot v$

y-komponen : $\rho v \cdot v$

z-komponen : $\rho \omega \cdot v$

Terdapat beberapa gaya yang bekerja pada suatu fluida yang dapat diidentifikasi menjadi dua jenis gaya yang bekerja pada volume kontrol yaitu :

1. External volume atau body forces seperti gravitasi, gaya sentrifugal, dan gaya apung.
2. Surfaces force seperti distribusi tekanan dan gaya gesek pada fluida.

Sehingga dari persamaan yang ada dapat disimpulkan untuk menjadi sebuah persamaan umum yang menunjukkan hukum konservasi momentum yang ditunjukkan oleh persamaan berikut ini.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho v \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho v (v \cdot n) \, dS = \int_{\Omega} \rho f_e \, d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p n \, dS + \oint_{\partial\Omega} (\tau \cdot n) \, ds \quad (2.16)$$

3. Hukum konversi energi

Prinsip dasar yang akan diterapkan dalam derivasi persamaan energi adalah hukum termodinamika pertama. Pada penerapan volume kontrol menyatakan bahwa setiap perubahan waktu dari total energi di dalam volume disebabkan oleh laju kerja dari gaya yang bekerja pada volume dan oleh fluks panas yang masuk ke dalam. Total energi per unit dari massa E dari sebuah fluida dapat diperoleh dari penambahan internal energi per unit massa (e) ke energi kinetik per unit massa $|v|^2/2$. sehingga kita dapat menulis persamaan dari energi total sebagai berikut.

$$E = e + \frac{|v|^2}{2} = e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \quad (2.17)$$

Dan juga dinyatakan diatas bahwa laju perubahan energi dari partikel fluida adalah sama dengan laju dari kerja yang partikel fluida ditambah dengan laju fluks panas fluida. Sehingga persamaan juga dapat ditulis sebagai berikut.

$$E = Q + W \quad (2.18)$$

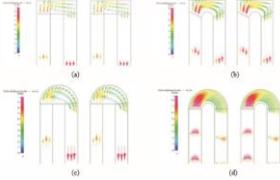
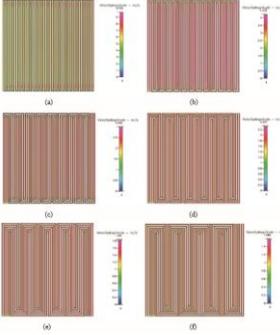
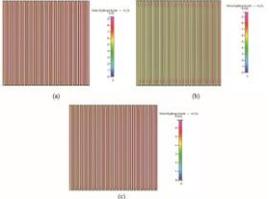
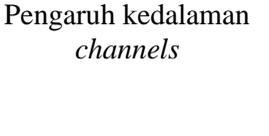
Karena pada proses penelitian ini tidak memerhatikan soal perubahan temperature, maka persamaan konversi energi dapat tidak dipakai.

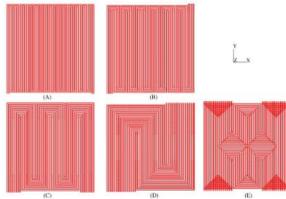
2.5 Penelitian Sebelumnya

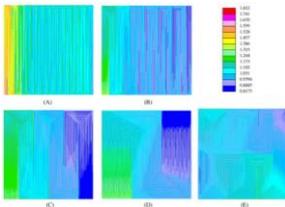
Beberapa penelitian mengenai optimalisasi desain dari *flow channel* telah dilakukan. Tabel 2.8 berikut merupakan beberapa penelitian sebelumnya yang dapat membantu penelitian ini:

Tabel 2.8 Literatur penelitian tentang desain *flow channel*

No	Peneliti	Metode	Ringkasan
1.	Nattawut Jaruwasupant dan Yottana Khunatorn (2011)	<p>Variabel tetap</p> <ul style="list-style-type: none"> -Luas <i>Channel</i> : 10 cm x 10 cm -Lebar <i>Channel</i> : 1 mm -Lebar Rib : 1 mm -Tekanan pengoperasian : 1 atm -Temperatur : 323 K <p>Variabel proses</p> <ul style="list-style-type: none"> -Kedalaman <i>Channel</i> : 0.8mm , 1.0mm , 1.2 mm -Aliran rata-rata gas masuk : 200, 300, 400, 500 cm³/min -Jenis lengkungan <i>channel</i> : lengkungan tajam, fillet dalam lengkungan, fillet luar lengkungan, lengkungan halus. -Multi serpentine line 1-6 <i>channels</i> 	<p>Permodelan numerical 3-D digunakan untuk memprediksi kecepatan distribusi dan <i>Pressure drop</i> yang terjadi. Pengaruh dari panjang <i>channel</i>, <i>channel</i> curvature dan kedalaman <i>channel</i> telah diinvestigasi. - <i>Channel</i> curvature terbaik dari distribusi gas adalah lengkungan tajam karena kecepatan yang dihasilkan rendah.</p> <p>- Distribusi kecepatan dan <i>Pressure drop</i> pada <i>channel</i> dengan jumlah 1,2,3,4,5 dan 6 pada aliran rata-rata 300cm³/min adalah 1 <i>channel</i> : 4 m/s dan 12.380 N/m²</p>

		<p>Hasil</p>  <p>Pengaruh Kelengkungan</p>  <p>Pengaruh panjang channel multi serpentine 1-6 channels</p>  <p>Pengaruh kedalaman channels</p> 	<p>2 channel : 3,5 m/s dan 3.138 N/m² 3 channel : 2,25 m/s dan 1.385 N/m² 4 channel : 2 m/s dan 798,5 N/m² 5 channel : 1,5 m/s dan 489,4 N/m² 6 channel : 1,2 m/s dan 359,5 N/m²</p> <p>Dari data tersebut <i>channel</i> dengan jumlah 4, 5 dan 6 memiliki nilai <i>Pressure</i> yang rendah dibandingkan <i>channel</i> dengan jumlah 1.</p> <p>- Distribusi kecepatan dan <i>Pressure drop</i> pada 3 variasi kedalaman <i>channel</i> yang berbeda pada aliran rata-rata 300 cm³/min diketahui</p> <p>0,8 mm : 7,5 m/s dan 19.470 N/m² 1,0 mm : 6 m/s dan 12.380 N/m² 1,2 mm : 5,5 m/s dan 9.410 N/m²</p>
--	--	--	--

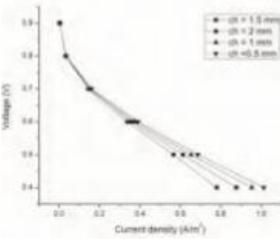
			Dari hasil penelitian konfigurasi terbaik adalah 6 <i>channel</i> serpentine line dengan lengkungan tajam dan kedalaman <i>channel</i> 1 mm.
2.	S. Shimpale, S. Greenway, J.W van zee (2006)	<p>Variabel tetap Lebar <i>channel</i> : 0,9 mm Kedalaman <i>channel</i> : 0,55 mm Lebar Rib : 0,9 mm Tekanan keluar : 101 kPa Temperature gas masuk : 80 °C</p> <p>Variabel proses Panjang <i>channel</i> : 3700, 1800, 840, 420 mm Jumlah <i>channel</i> pada konfigurasi serpentine line : 3, 6, 13, 26 <i>channel</i> dan 26 kompleks <i>channel</i>.</p> 	<p>Efek dari panjang dan susunan terhadap distribusi arus, temperature telah dipelajari dengan hasil</p> <ol style="list-style-type: none"> 13 <i>channel</i> memberikan peforma terbaik untuk single 200cm² PEMFC. 26 <i>channel</i> bisa menjadi opsi terbaik berdasar pada keseragaman densitas arus dan <i>Pressure drop</i> yang rendah.

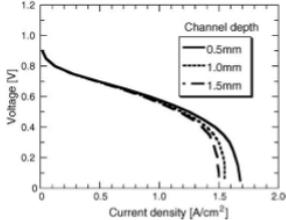
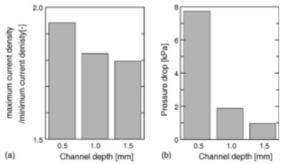
		<p>Hasil Voltase sel : 3 <i>channel</i> : 0,575 V 6 <i>channel</i> : 0,590 V 13 <i>channel</i> : 0,620 V 26 <i>channel</i> : 0,605 V</p> <p>Densitas arus : 3 <i>channel</i> : 840 mA/cm² 6 <i>channel</i> : 700 mA/cm² 13 <i>channel</i> : 430 mA/cm² 26 <i>channel</i> : 370 mA/cm²</p> 	
3.	Dyi-Huey Chang dan Jung-Chung Hung (2012)	<p>Variabel tetap Lebar Rib : 0,5 mm Lebar <i>channel</i> : 0,5 mm Luas aktif : 4 cm² Tekanan operasi sel : 1 atm</p> <p>Variabel proses Kedalaman <i>channel</i> : 0.2 , 0.4 dan 0.6 mm Aliran rata-rata : 40, 60 dan 80 cc/min</p>	<p>Efek dari aliran rata-rata dan kedalaman <i>channel</i> sebagai berikut :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Penggunaan aliran rata-rata semakin besar akan meningkatkan laju aliran yang mengganggu manajemen air pada MEA.

		<p>Hasil Efek dari aliran rata-rata :</p> <p>80 cc/min : densitas daya 590mW/cm² dengan kedalaman <i>channel</i> 0,2 mm</p> <p>40 cc/min : densitas daya 596mW/cm² dengan kedalaman <i>channel</i> 0,6 mm</p> <p>Efek dari kedalalaman <i>channel</i> :</p> <p>0,2 mm : memberikan aliran terlalu cepat, sehingga waktu reaksi yang tidak mencukupi.</p> <p>0,4 mm : memberikan hasil yang terbaik.</p> <p>0,6 mm : memberikan jarak vertical yang jauh bagi aliran.</p>	<p>2. Kedalaman <i>channel</i> 0,2 mm memberikan hasil terburuk dari yang lain.</p> <p>3. Kedalaman <i>channel</i> 0,4 mm memberikan hasil yang terbaik untuk peforma sel.</p> <p>4. Kedalaman <i>channel</i> 0,6 mm memberikan jarak vertical yang jauh bagi aliran.</p>
4.	Varadhar ajan.L, Palanisw amy.K (2015)	<p>Variabel tetap Luas aktif : 25 cm² Tipe aliran <i>channel</i> : Serpentine line dan <i>Interdigitated</i>. Kedalaman <i>channel</i> : 1 mm</p> <p>Variabel proses</p>	<p>Hasil dari optimisasi dengan 4 parameter yang berbeda dari rasio lebar Rib dan <i>channel</i> menghasilkan</p> <p>1. Densitas daya 0,27852 W/cm² pada serpentine <i>channel</i> dengan</p>

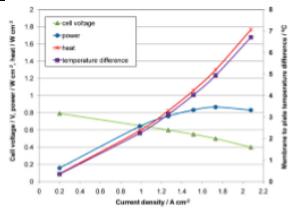
		<p>Perbandingan lebar Rib dan Lebar <i>channel</i> : 1:1 , 1:2 , 2:1 , 2:2 Tekanan : 1, 1.5, 2 dan 2.5 bar Temperatur :323, 333, 343 dan 353 K</p> <p>Hasil densitas daya Serpentine L/C 1:1 = 0,27853 W/cm² 1:2 = 0,27457 W/cm² 2:1 = 0,24781 W/cm² 2:2 = 0,27258 W/cm² <i>Interdigitated</i> L/C 1:1 = 0,28955 W/cm² 1:2 = 0,29737 W/cm² 2:1 = 0,25483 W/cm² 2:2 = 0,29237 W/cm²</p>	<p>luas permukaan aktif 25cm². 2. Densitas tersebut pada rasio L/C 1:1 dengan potensial sel 0,4V dan densitas arus 0,696319 A/cm². 3. Densitas daya 0,297367 W/cm² pada interdigitataed dengan luas permukaan aktif 25 cm². 4. Densitas tersebut pada rasio L/C 1:2 dengan potensial sel 0,45V dan densitas arus 0,660817 A/cm².</p>
5.	Atul Kumar dan Ramana	Variabel tetap Steady state Kondisi Isothermal 350 K	1. Semakin kecil lebar Rib akan meningkatkan

	<p>G. Reddy (2002)</p>	<p>Panjang <i>channel</i> 40 mm Tekanan operasi 2 atm Aliran rata-rata inlet $2.5 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$</p> <p>Variabel proses Lebar <i>channel</i> : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 dan 4.0 Lebar Rib : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 dan 4.0 Kedalaman <i>channel</i> : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 dan 4.0</p> <p>Hasil</p> <ul style="list-style-type: none"> - Maksimum konsumsi hidrogen sebesar 84,8% didapat pada kedalaman <i>channel</i> 1.5 mm , lebar Rib 0.5 mm dan lebar <i>channel</i> 1.5 mm. - Luas penampang segitiga dan setengah lingkaran akan menambah konsumsi hidrogen daripada luas penampang segi empat. 	<p>konsumsi dari hidrogen.</p> <p>2. Ketika kedalaman <i>channel</i> dibawah atau diatas nilai 1.5 mm maka konsumsi hidrogen akan menurun.</p> <p>3. Bentuk segitiga dan setengah lingkaran pada <i>channel</i> meningkatkan konsumsi hidrogen sebesar 9% pada lebar Rib mendekati 0.</p>
6.	<p>P. Ramesh, S.S. Dimble,</p>	<p>Variabel tetap Kecepatan inlet : 0,2 m/s</p>	<p>Permodelan 3D dari PEMFC yang tervalidasi oleh</p>

	<p>S.P. Duttagupta (2011)</p>	<p>Kedalaman <i>channel</i> : 1 mm Panjang <i>channel</i> 1 mm Rasio lebar Rib : 1:1</p> <p>Variabel proses Lebar <i>channel</i> : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm</p> <p>Hasil - Semakin lebar <i>channel</i>, densitas arus menurun. - <i>Pressure drop</i> semakin besar dengan semakin kecilnya lebar <i>channel</i>.</p> 	<p>percobaan menunjukkan :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Performa <i>fuel cell</i> menurun seiring bertambahnya lebar <i>channel</i>. 2. <i>Pressure drop</i> meningkat dengan semakin mengecilnya lebar <i>channel</i>.
<p>7.</p>	<p>Gen Inoue, Yosuke Matsukuma dan Masaki Minemo (2005)</p>	<p>Variabel tetap Lebar <i>channel</i> : 1 mm Lebar Rib : 1 mm Jumlah <i>channel</i> : 15 Aliran rata-rata : 16,67 m³/s</p> <p>Variabel Proses</p>	<p>Dengan Analisa numerik didapatkan</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kedalaman <i>channel</i> 0.5 mm memiliki nilai densitas arus tinggi. 2. Kedalaman <i>channel</i> 0.5

		<p>Kedalaman <i>channel</i> : 0.5, 1.0, 1.5 mm</p> <p>Hasil Kedalaman <i>channel</i> 0.5 : densitas arus 1,95 mA/cm² dan <i>Pressure drop</i> 7,8 kPa. Kedalaman <i>channel</i> 1.0 : densitas arus 1,82 mA/cm² dan <i>Pressure drop</i> 2 kPa. Kedalaman <i>channel</i> 1.5 : densitas arus 1,8 mA/cm² dan <i>Pressure drop</i> 1 kPa.</p>  <p>Kurva polarisasi</p> 	<p>memiliki nilai <i>Pressure drop</i> tinggi.</p> <p>3. Densitas arus naik dengan semakin kecilnya kedalaman <i>channel</i> dan juga diikuti oleh <i>Pressure drop</i> yang meningkat.</p>
8.	Steven G. Goebel (2011)	<p>Variabel tetap Luas aktif : 50 cm²</p> <p>Variapen proses</p>	<p>Dari penelitian dihasilkan:</p> <p>1. Kedalaman <i>channel</i> perlu</p>

		<p>Lebar Rib : 0.25, 0.50, 1.0 mm Lebar <i>channel</i> : 0.25, 0.50, 1.0 mm Kedalaman <i>channel</i> : 0.34, 0.25, 0.44, 0.28 mm Jumlah <i>channel</i> : 12, 16, 24, 32, 48 Temperature operasi : 50, 70 dan 80°C</p> <p>Hasil</p> <ul style="list-style-type: none"> - Penurunan tekanan minimum terjadi pada lebar Rib 1 mm dan lebar <i>channel</i> 0,5 mm. - Temperature optimal adalah 70 °C  <p>Desain aliran <i>bipolar plate</i></p>	<p>diperhitungkan ketika lebar dari <i>channel</i> dan Rib berubah. Untuk bisa mengkompensasikan efek hidrolis pada <i>Pressure drop</i>.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Untuk peforma pada saat densitas arus besar, lebar Rib memiliki pengaruh besar. 3. Lebar <i>channel</i> tidak harus terlalu lebar (lebih dari 1mm).
--	--	--	---

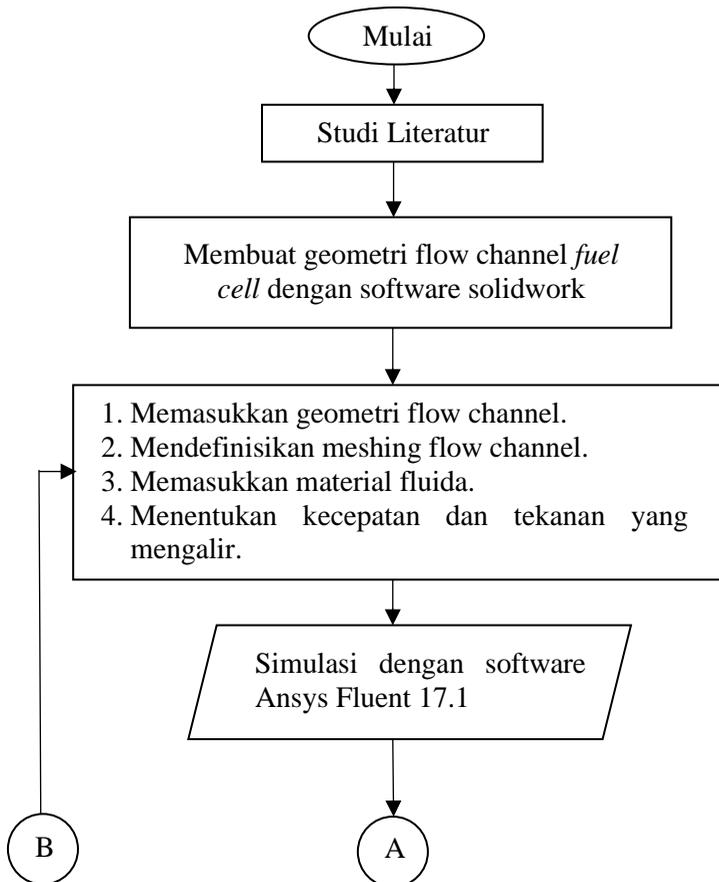


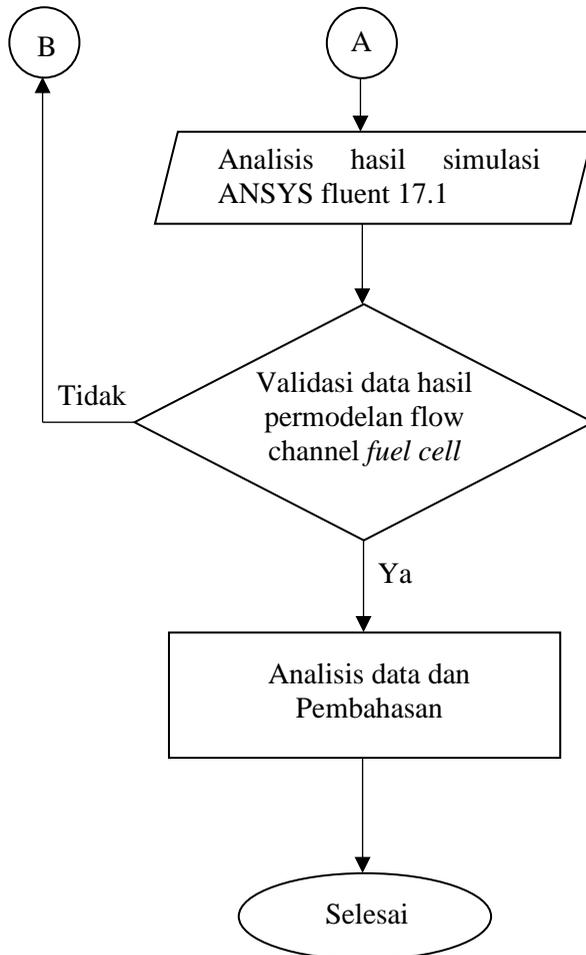
Grafik lebar rib dan
channel 1.0/0.5 mm

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian

Pada analisa penurunan tekanan ini, didalamnya ada beberapa langkah-langkah yang ditempuh secara runtun agar menghasilkan analisa akhir yang sesuai. Adapun langkah-langkah ditunjukkan pada skema Gambar 3.1 sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Desain Penelitian

Nilai-nilai yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan teori tentang desain aliran pada *flow channel fuel cell* dan penelitian sebelumnya. Adapun penjabaran desain penelitian yang meliputi variable respon dan proses.

3.1.1 Variabel Respon

Variable respon adalah variabel dimana nilai dari variabel ini dipengaruhi oleh variabel proses, dimana hasilnya didapatkan setelah melakukan simulasi dan validasi. Variabel respon dalam penelitian ini adalah.

- *Pressure drop*

Nilai *Pressure drop* yang diharapkan dari aliran fluida pada *flow channel* memiliki nilai paling kecil.

- Laju Aliran

Laju aliran dari gas yang mengalir pada *flow channel* diharapkan memiliki pola yang baik.

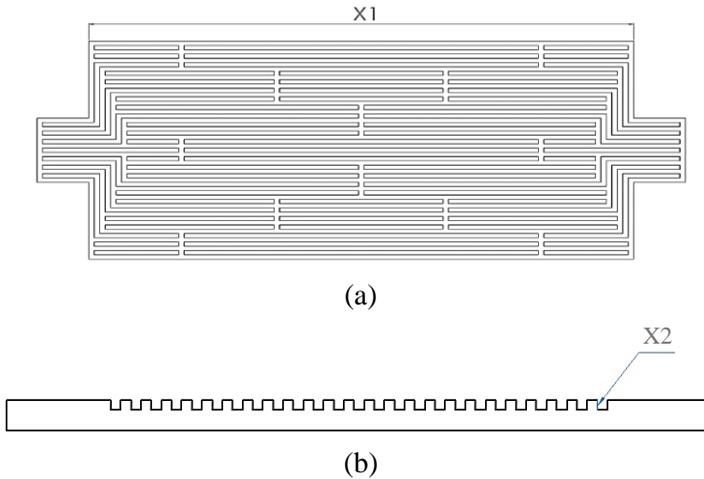
3.1.2 Variabel Proses

Variabel proses adalah variabel yang nilainya ditentukan dan divariasikan dengan tujuan mendapatkan hasil dan Analisa tentang pengaruh variabel proses terhadap variabel respon. Variabel proses yang akan dianalisa dalam penelitian ini adalah :

X_1 : Panjang dari *flow channel* dari *fuel cell* (mm)

X_2 : Kedalaman dari *flow channel fuel cell* (mm)

Adapun bagian dari *flow channel* yang disebutkan diatas dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 (a) Tampak Atas *Flowchannel*, (b) Tampak Samping *Flowchannel*

Tabel 3.1 berikut merupakan desain penelitian dari seluruh penelitian ini.

Tabel 3.1 Desain Penelitian

No	Kode <i>Flow Channel</i>	Variabel Proses		Variabel Respon	
		X_1	X_2	<i>Pressure drop</i>	Kecepatan
1	FC 15.8	10	0.6	√	√
2	FC 15.1	10	0.8	√	√
3	FC 15.12	10	1.0	√	√
4	FC 20.8	15	0.6	√	√
5	FC 20.1	15	0.8	√	√
6	FC 20.12	15	1.0	√	√
7	FC 25.8	20	0.6	√	√
8	FC 25.1	20	0.8	√	√
9	FC 25.12	20	1.0	√	√

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat keras (hardware) yaitu satu buah laptop yang digunakan untuk menggambar desain dan geometri dengan spesifikasi RAM 4096 MB, CPU Intel® Core i3 @ 2.00 GHz, dan Windows 10 Pro x64 bit dan juga satu buah Personal Computer (PC) yang digunakan untuk simulasi numerik dengan spesifikasi RAM 8GB, CPU Intel® Pentium® CPUG2030 @ 3.00 GHz (2 CPUs) ~3.0 GHz dan Windows 7 Home Premium 64-bit sistem. Juga digunakan perangkat lunak (software) yaitu Solidworks, ANSYS dan MATLAB. Solidworks digunakan untuk mendesain geometri dari *flow channel*. ANSYS merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan interaksi dari banyak disiplin ilmu fisika, struktural, getaran, dinamika fluida, perpindahan panas, dan elektromagnetik untuk engineer. Versi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ANSYS 19.1 dan tipe solver yang digunakan dalam ANSYS Workbench adalah Fluid Flow (Fluent). Sedangkan Matlab digunakan untuk perhitungan dari dari *Pressure drop* yang terjadi.



(a)

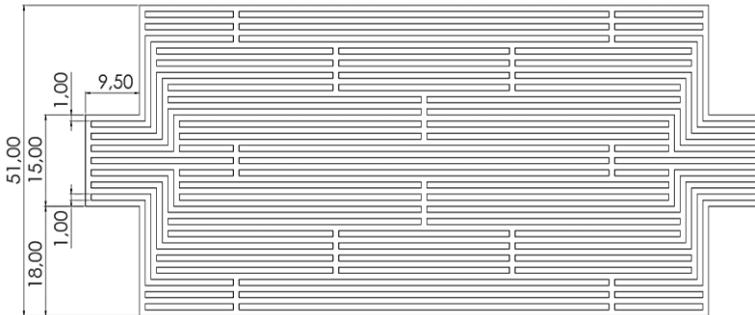


(b)

Gambar 3.3 Software yang digunakan (a) Solidworks (b) Ansys 17.1 Academic

3.4 Pengujian

3.4.1 Geometri *Flow Channel*



Gambar 3.4 Geometri *Flowchannel*

Dengan beberapa parameter tetap seperti

1. Lebar channel : 1 mm
2. Lebar land : 1 mm
3. Sudut channel : 0°

3.4.2 Sifat Fisik dan Mekanik Bipolar Plate

Material	:	Isomolded grafit
Densitas	:	1,82 gr/cm ³
Kekerasan	:	65 psi
Kekuatan kompresi	:	127,6 MPa
Kekuatan flexural	:	57,9 MPa

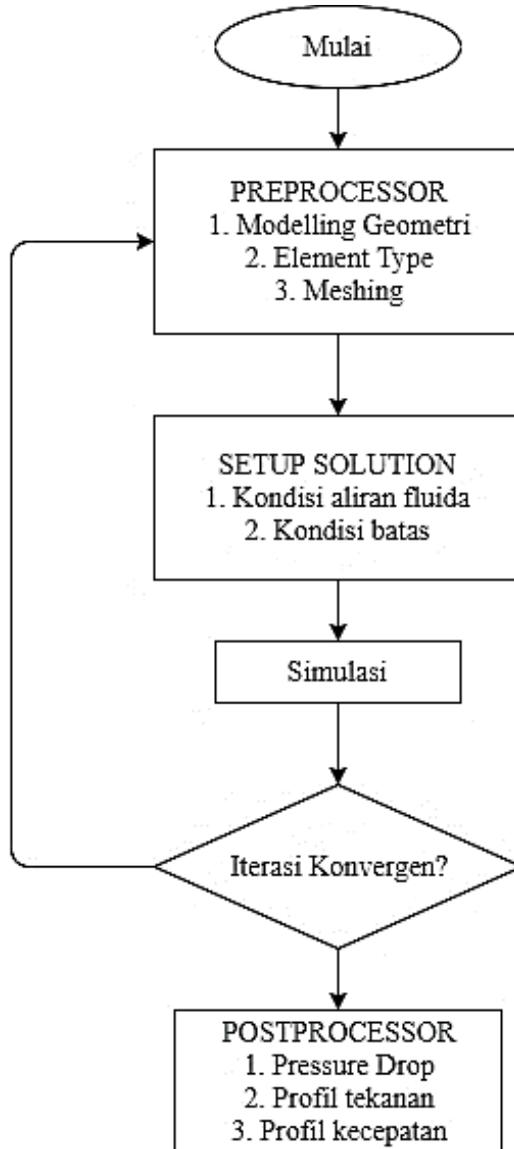
3.4.3 Kondisi Fluida

Fluida yang digunakan merupakan hidrogen dalam keadaan ideal gas yang mengalir pada *channel-channel* pada *flow channel fuel cell* dengan spesifikasi sebagai berikut.

Kepadatan : 0,0763 g/cm³
Viskositas : 0,2244 N.s/m²

3.5 Rancangan Penelitian

Diagram alir dari simulasi CFD dengan menggunakan ANSYS Fluent 19.1 yaitu pada Gambar 3.5 sebagai berikut

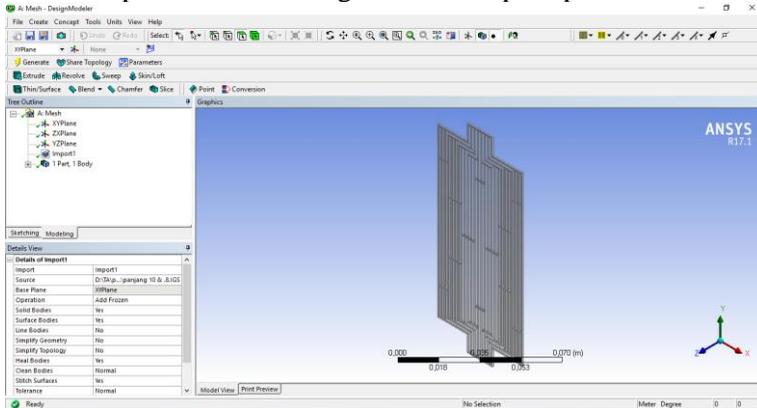


Gambar 3.5 Diagram alir simulasi

Penjelasan tentang alur simulasi tersebut yaitu sebagai berikut :

(a) Membuat model 3D dari *flow channel*

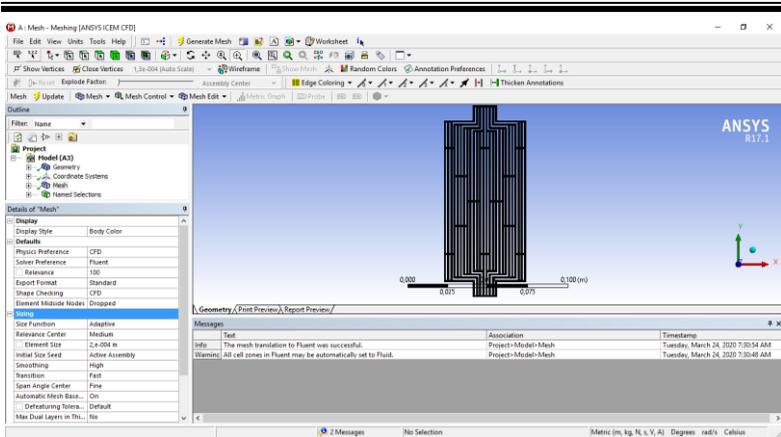
Dalam membuat model 3D dari *flow channel* digunakan software solidworks yang kemudian dilakukan import ke dalam design modeler seperti pada Gambar 3.6



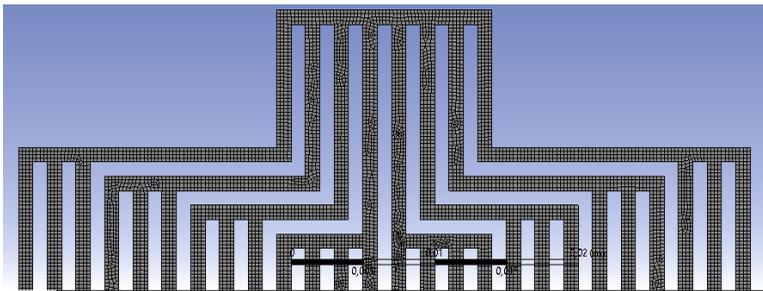
Gambar 3.6 Model 3D *Flow Channel*

(b) Meshing

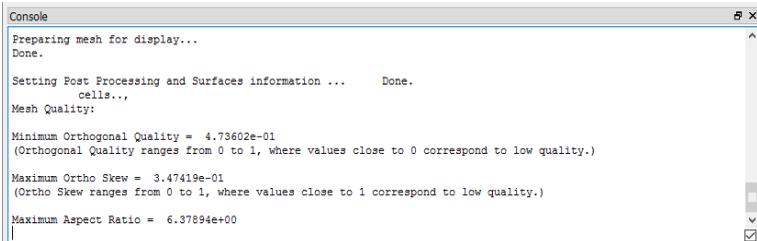
Proses meshing adalah suatu proses penyatuan segmen-segmen gambar sehingga seluruh bagian gambar dapat dilakukan simulasi. Proses meshing apabila berhasil dapat dilanjutkan ke proses simulasi, tetapi apabila gagal maka harus dilakukan pengulangan atau pembenaran pada desain. Kualitas meshing pada penelitian ini dilakukan secara default sesuai dengan aplikasi. Total elemen yang dihasilkan pada proses meshing ini memiliki 186.712 elemen dan 288.455 titik. Metode yang dalam proses meshing adalah *sweep method* dan *face sizing* untuk memperhalus meshing. Pada modul fluent juga dapat dilihat kualitas dari meshing yang dihasilkan untuk menentukan keakuratan proses meshing. Hasil meshing dapat dilihat pada Gambar 3.7 sampai 3.9 seperti berikut



Gambar 3.7 Hasil Meshing Geometri



Gambar 3.8 Pebesar Daerah Meshing



Gambar 3.9 Kualitas Proses Meshing pada Fluent

(c) Penentuan kondisi aliran fluida dan kondisi batas

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan pada kondisi aliran internal sehingga karakteristik dari aliran fluida akan sangat dipengaruhi oleh geometri dari *flow channel*. Kondisi batas juga ditentukan pada bagian inlet, outlet, dan dinding model. Kemudian untuk proses iterasi, kriteria konvergensi dibuat sesuai dengan kriteria default dari ANSYS Fluent 18.1 sebesar 1×10^{-4} . Jika hasil iterasi berada diatas nilai tersebut, berarti proses iterasi belum konvergen dan harus diulang kembali.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

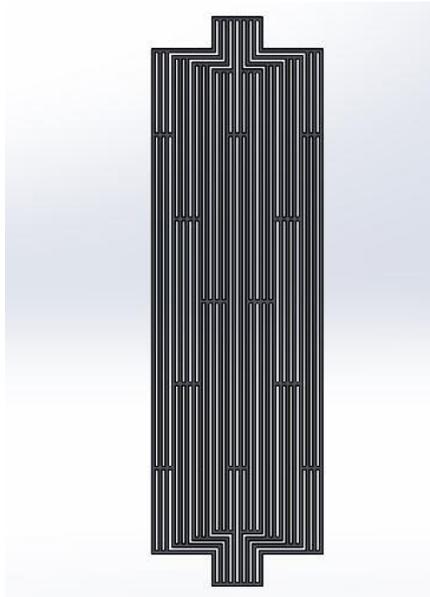
4.1 Proses Permodelan

Dalam proses mendapatkan nilai *pressure drop* dan laju aliran hidrogen dari *flowchannel* diperlukan analisis permodelan dengan metode yang diterapkan adalah computational fluid dynamics atau CFD. Metode CFD sendiri adalah Teknik numerikal yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan dari sebuah aliran fluida dan perpindahan panas di dalam sebuah geometri aliran yang terdefiniskan (Albaali, 2006). Proses permodelan dengan metode CFD dilakukan dengan perhitungan terhadap kontrol dimensi, luas, dan juga volume dengan menggunakan komputasi komputer untuk bisa dilakukan perhitungan pada setiap elemen pembagiannya. Pada dasarnya adalah sebuah ruang yang ditempati oleh fluida akan dibagi menjadi beberapa bagian dimana hal ini biasanya disebut sebagai proses meshing (Sugita, 2017). Penggunaan software ANSYS 17.1 dengan modul fluent dapat diaplikasikan pada metode CFD ini.

Terdapat beberapa perhitungan dalam penggunaan komputasi dinamika fluida. Pada proses permodelan ini penggunaan persamaan dari konversi momentum diterapkan untuk menganalisa dari aliran fluida yang terjadi. Persamaan momentum yang digunakan merupakan prinsip dasar dari hukum Newton kedua yang menyatakan bahwa gaya yang bekerja pada benda bergerak akan ekuivalen dengan nilai dari perubahan momentumnya. Persamaan konvesri momentum secara umum telah ditunjukkan pada persamaan 2.16. pada persamaan momentum tersebut terdapat dua faktor gaya yang bekerja. Faktor pertama merepresentasikan *body forces* yang berkaitan dengan gaya gravitasi, gaya sentrifugal, dan gaya elektromagnetik. Faktor yang kedua adalah *surface force*, dimana secara tipikal hal ini merujuk pada gaya tekan dan gaya viskositas.

Proses simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan membuat objek *flowchannel* sebagai ruang untuk fluida hidrogen mengalir.

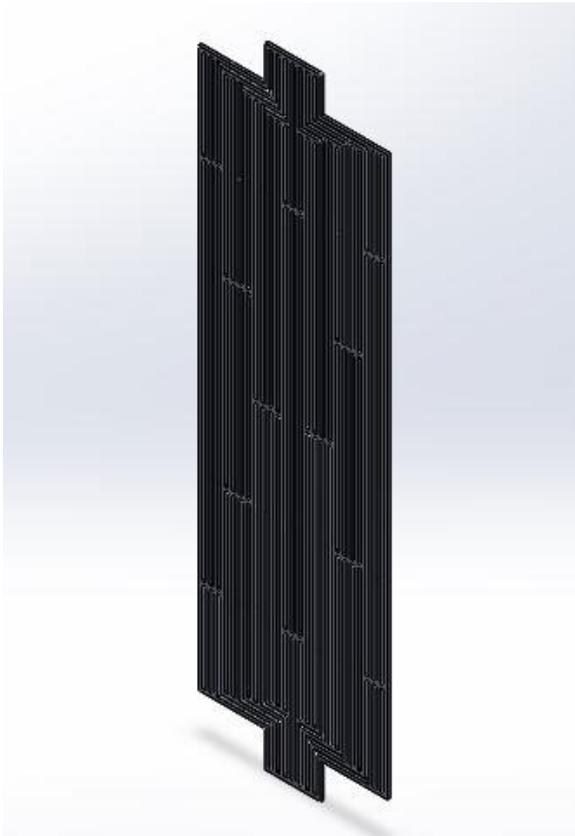
Ruang aliran hidrogen memiliki dimensi yang telah disesuaikan dengan variable penelitian yang ada. Proses pembuatan flowchannel sebagai ruang fluida untuk mengalir ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan 4.2 sebagai berikut. Tipe aliran yang digunakan sebagai ruang aliran *flowchannel* adalah tipe paralel. Pemilihan tipe ini dikarenakan memiliki keunggulan dalam manajemen air yang baik dan nilai *pressure drop* yang rendah yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Setelah proses pembuatan objek selesai dan telah dilakukan meshing terhadap objek 3D dari *flowchannel*, selanjutnya ialah melakukan pengaturan terhadap perhitungan yang akan dilakukan seperti kondisi batas dan kondisi fluida. Setelah pengaturan terhadap perhitungan selesai, dilakukan proses perhitungan ataupun simulasi terhadap objek. Setelah simulasi menemukan hasil yang konvergen maka dilakukan analisa terhadap hasil simulasi yang telah dilakukan.



Gambar 4.1 Model geometri *Flowchannel* tampak depan

Terdapat beberapa asumsi utama yang digunakan dalam proses permodelan adalah seperti berikut.

1. Kondisi steady state (waktu dan ruang tidak berpengaruh).
2. Aliran laminar (nilai Reynold number <2300).
3. Tidak terjadi perpindahan massa.
4. Tidak terjadi perpindahan energi.
5. Isotermal.



Gambar 4.2 Model geometri *flowchannel* tampak trimetric

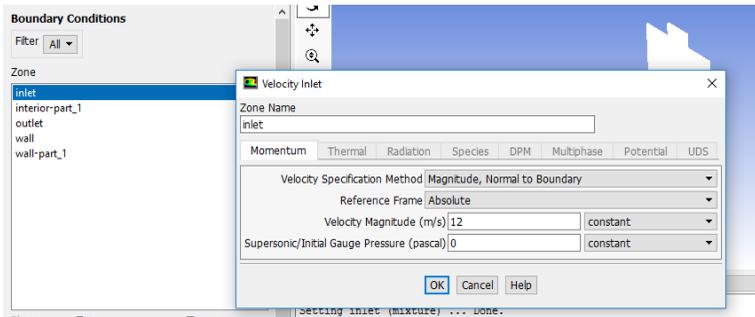
4.1.1 Perhitungan *Pressure drop*

Agar dapat diperoleh nilai dari *pressure drop* dari beberapa desain penelitian yang telah ada dapat dilakukan melalui persamaan 2.1. Persamaan ini selanjutnya akan dibandingkan dengan proses simulasi pada software ANSYS yang akan melakukan perhitungan secara otomatis nilai dari *pressure drop* yang dihasilkan pada model geometri yang telah dimasukkan. Simulasi akan dilakukan dengan modul fluent untuk menganalisa aliran fluida yang terjadi. Dalam proses perhitungannya diperlukan references value sebagai dasar dari keadaan normal yang dimasukkan secara manual. Terdapat beberapa data yang dimasukkan pada reference value dalam proses simulasi ANSYS yaitu gaya gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$, tekanan 1 atm, viskositas dari fluida yang mengalir 0,2244 (gas hidrogen), dan juga temperatur operasi 333,15 K. Proses perhitungan dilakukan dengan 50 kali iterasi sampai didapatkan hasil yang konvergen. Terdapat beberapa data variabel penelitian yang akan dijadikan parameter dalam perhitungan dengan model geometri berbeda seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Nilai parameter yang digunakan adalah 3 variasi panjang dan 3 variasi kedalaman yang selanjutnya dilakukan 9 kali simulasi sesuai dengan parameter yang ada. Seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Nattawut, dkk (2017) dengan memvariasikan 3 kedalaman channel berbeda dan Panjang channel yang berbeda dengan menggunakan tipe aliran serpentine line. Untuk penelitian ini tipe aliran yang digunakan adalah tipe aliran parallel. Hal ini dikarenakan pada penelitian Spiegel (2008) tipe aliran serpentine memiliki *pressure drop* yang tinggi dibandingkan dengan tipe aliran parallel. Untuk mendapatkan hasil dengan tingkat error yang kecil maka hasil simulasi akan divalidasi dengan perhitungan teori secara manual untuk mendapatkan nilai *pressure drop* yang mendekati secara teori atau memiliki error yang kecil.

4.1.2 Perhitungan Laju Aliran

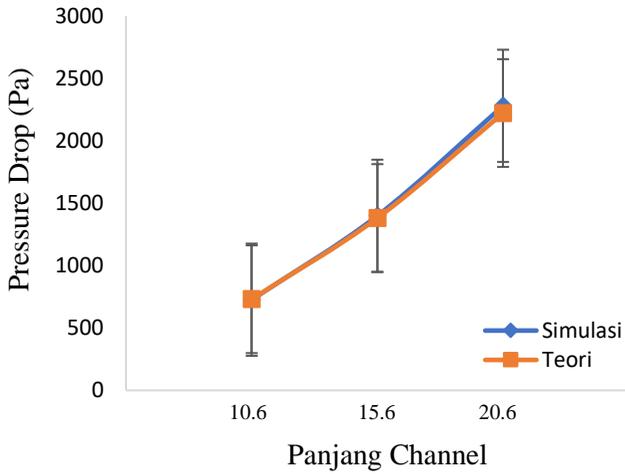
Dalam hal mengetahui nilai laju aliran yang masuk pada saluran inlet *flowchannel* dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.4. nilai yang didapatkan dari hasil perhitungan akan dimasukkan sebagai input data untuk nilai kecepatan yang masuk pada saluran inlet. Kemudian akan dianalisa secara simulasi laju aliran rata-rata yang terjadi pada *flowchannel* fuelcell. Pada Gambar 4.3 ditunjukkan proses input data laju aliran pada *flowchannel*. Nilai aliran rata-rata selanjutnya akan digunakan sebagai penentuan seberapa besar nilai volume debit hydrogen yang mengalir pada *fuel cell* untuk menentukan seberapa efisien hydrogen yang digunakan pada sebuah *fuel cell*. Nilai yang semakin tinggi maka tingkat efisiensi dari *fuel cell* juga semakin rendah.



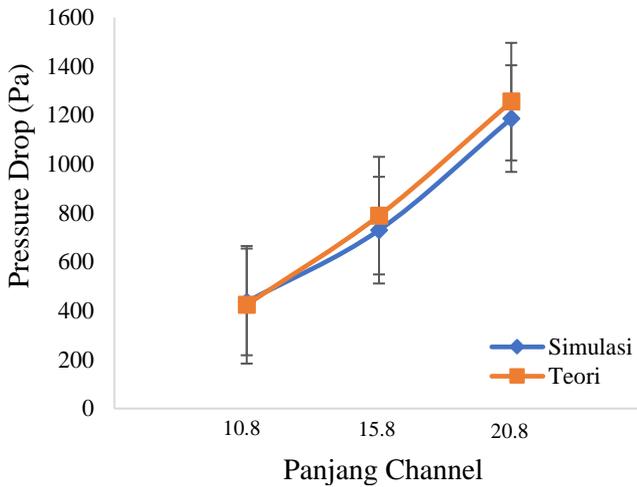
Gambar 4.3 Input data laju aliran masuk

4.2 Analisa Pengaruh Panjang Channel terhadap Nilai *Pressure drop* dan Laju Aliran

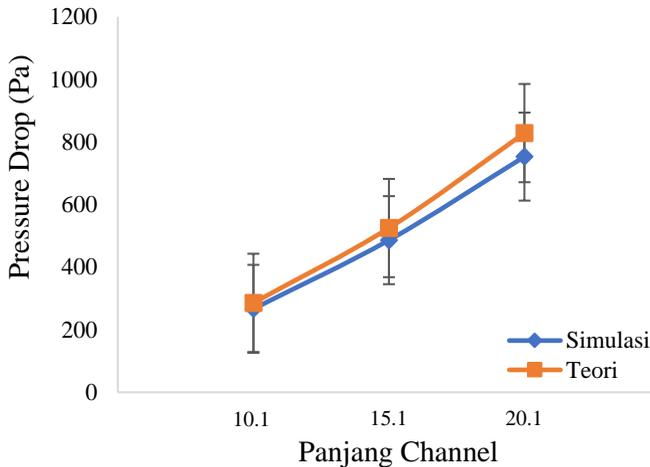
Dari proses simulasi yang telah dilakukan didapatkan nilai dari *pressure drop* dengan memvariasikan panjang dari channel. Hasil tersebut ditunjukkan melalui Gambar 4.4 sebagai berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4 Pengaruh Panjang channel terhadap *pressure drop* dengan kedalaman (a) 0,6mm (b) 0,8mm (c) 1,0mm

Pada hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 nilai dari *pressure drop* memiliki grafik dengan tren yang naik. Tren kenaikan ini didapatkan pada variasi panjang channel yang meningkat. Pada *flowchannel* dengan panjang 10 cm nilai *pressure drop* didapatkan yang paling rendah dan meningkat seiring dengan bertambahnya panjang channel. Nilai *pressure drop* paling minimum ini diperoleh pada Panjang 10 cm dengan variasi kedalaman dari channel yaitu pada kedalam 1,0 mm sebesar 266,60 Pa, pada kedalaman 0,8mm sebesar 436,18 Pa, dan pada kedalaman 0,6 mm sebesar 726,15 Pa. Nilai *pressure drop* pada panjang channel 15 cm dengan variasi kedalaman dari channel yaitu pada kedalaman 1,0 mm sebesar 486,15 Pa, pada kedalaman 0,8 mm sebesar 729,64 Pa, pada kedalaman 0,6 mm 1398,5 Pa. Dan nilai *pressure drop* dengan panjang channel 20 cm dengan variasi kedalaman channel yaitu 1,0 mm didapat sebesar 753,23 Pa, pada kedalaman 0,8 mm sebesar 1186,06 Pa, pada kedalaman 0,6 mm

sebesar 2279,36 Pa. Hasil simulasi secara numerikal divalidasi menggunakan perhitungan secara teoritikal yang ditunjukkan pada grafik. Hasilnya nilai antara hasil simulasi dengan perhitungan memiliki perbedaan yang tidak signifikan dan memiliki nilai eror dibawah 10%.

Dari ketiga panjang yang divariasikan memiliki kenaikan *pressure drop* dimana nilai minimum didapatkan pada panjang channel 10 cm dengan kedalaman 1 mm. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh nattawut, dkk (2011). dimana semakin bertambahnya jumlah channel atau semakin pendek dari sebuah channel maka nilai *pressure drop* yang terjadi akan semakin kecil dan akan naik seiring dengan berkurangnya jumlah channel atau semakin panjang sebuah channel. Hal ini karena pada channel yang panjang maka lintasan yang akan dilewati oleh gas hidrogen akan semakin jauh sehingga membutuhkan perbedaan tekanan yang tinggi untuk bisa mencapai titik keluar dari channel (Spiegel, 2008).

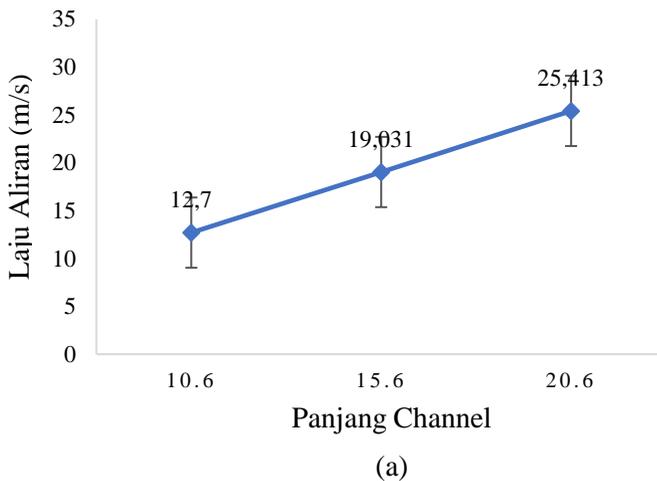
Kenaikan nilai *pressure drop* pada panjang channel yang semakin bertambah adalah kenyataan bahwa aliran fluida digerakkan dari perbedaan tekanan antara inlet dan outlet (Spiegel, 2008), besarnya perbedaan tekanan yang mendorong suatu fluida untuk berjalan dari inlet menuju ke outlet juga dipengaruhi jarak tempuh yang dilalui oleh fluida tersebut dan juga kecepatan dari fluida untuk mengalir. Hal ini didukung oleh persamaan rumus *pressure drop* pada persamaan 2.1 yang menyatakan bahwa perbedaan tekanan antara inlet dan outlet akan berbanding lurus dengan panjang dari channel yang dipakai pada *flowchannel*. Pada saat fluida bergerak, maka fluida tersebut juga akan mengalami gesekan antar partikel fluida dengan permukaan dinding channel yang akan menimbulkan kehilangan tekanan pada saat fluida bergerak, sehingga untuk jarak tempuh yang semakin panjang maka dibutuhkan tekanan yang semakin tinggi untuk menggerakkan fluida. Tujuannya adalah agar aliran bisa mencapai

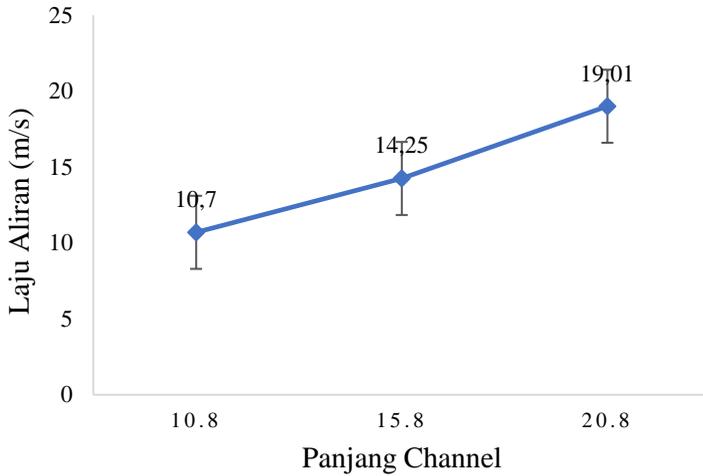
pada outlet sehingga reaktan bisa bereaksi pada seluruh permukaan daerah aktif dari membran.

Pada penelitian yang dilakukan oleh jaruwasupat (2011), dengan variasi panjang yang dilakukan dengan cara menambahkan jumlah channel pada tipe aliran serpentine line. Penambahan dengan tujuan untuk memendekkan panjang dari channel serpentine line dan didapatkan hasil jumlah channel yang semakin banyak akan menurunkan nilai *pressure drop*. Hal ini relevan dengan penelitian ini, dimana nilai *pressure drop* semakin menurun seiring dengan pemendekkan channel pada tipe aliran parallel.

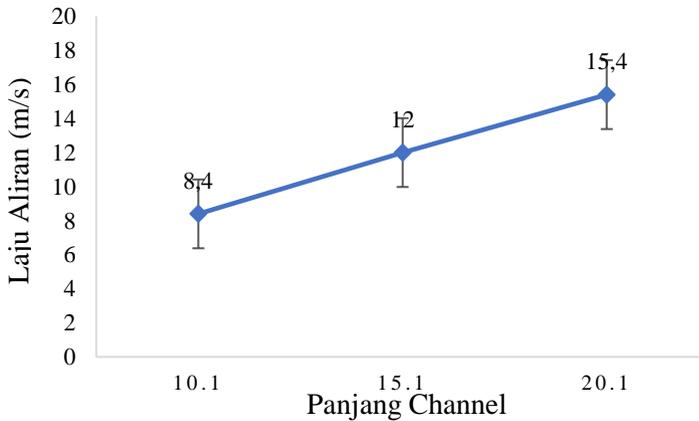
Nilai *pressure drop* akan memiliki kenaikan sebanding dengan perpanjangan dari channel aliran. Dibutuhkan perbedaan tekanan yang tinggi antara inlet dan outlet untuk menggerakkan aliran dengan panjang saluran yang semakin panjang.

Adapun pengaruh panjang dari channel terhadap laju aliran masuk pada *flowchannel* ditunjukkan pada Gambar 4.5 sebagai berikut.





(b)



(c)

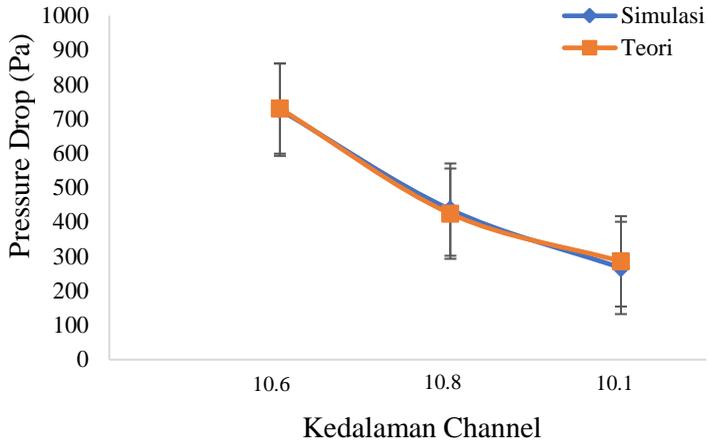
Gambar 4.5 Pengaruh Panjang Channel terhadap Laju Aliran dengan kedalaman (a) 0.6 mm (b) 0.8 mm dan (c) 1.0 mm

Pada Gambar 4.5 terdapat kurva yang menunjukkan nilai laju aliran pada masing-masing panjang channel. Nilai laju aliran dengan nilai terendah adalah pada panjang 10 cm dengan variasi kedalaman 1,0 mm yaitu sebesar 7,6 m/s. Laju aliran akan semakin bertambah dengan seiring bertambahnya nilai dari panjang channel. Pada panjang channel 15 cm dengan variasi kedalaman 1,0 mm nilai laju aliran sebesar 11,4 m/s. Dan pada panjang channel 20 cm dengan variasi kedalaman 1,0 mm nilai dari laju aliran sebesar 15,2 m/s. Nilai laju aliran maksimum didapatkan pada panjang channel 20 cm dengan variasi kedalaman 0,6 mm yaitu sebesar 25,34 m/s.

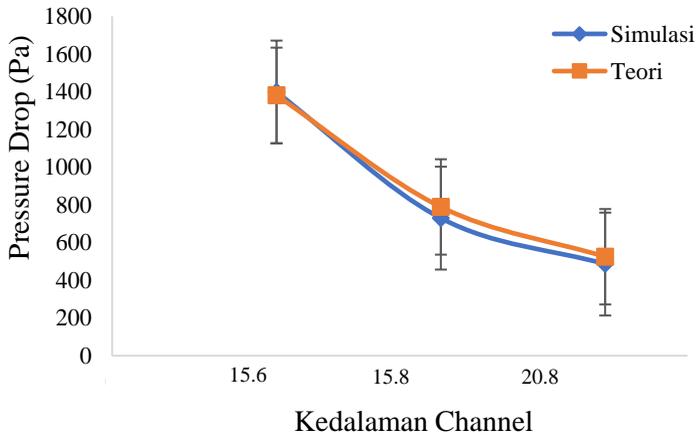
Dari hasil simulasi didapatkan bahwa nilai dari laju aliran akan semakin bertambah dengan bertambahnya nilai dari panjang channel. Hal ini disebabkan karena ada perbedaan tekanan yang terjadi antara inlet dan outlet *flowchannel* yang telah dijelaskan sebelumnya. Nilai perbedaan yang besar pada inlet dan outlet akan mengakibatkan semakin tinggi nilai laju aliran yang terjadi.

4.3 Analisa Pengaruh Kedalaman Channel terhadap Pressure drop dan Laju Aliran

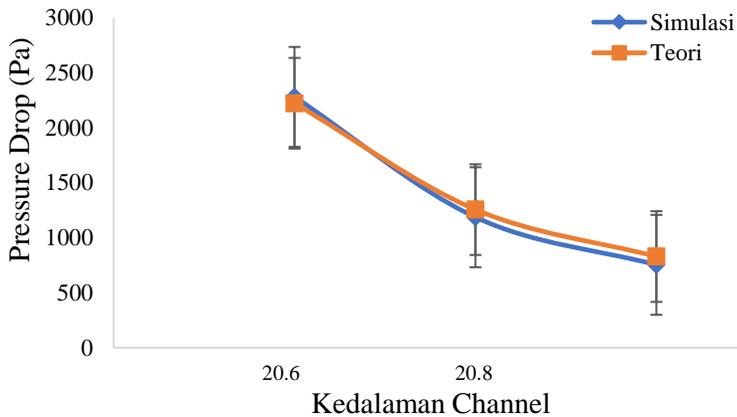
Dari simulasi yang telah dilakukan untuk menganalisa variasi kedalaman channel terhadap *pressure drop* dari *flowchannel* dihasilkan data yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 sebagai berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Pengaruh nilai kedalaman channel terhadap *pressure drop* pada *flowchannel* dengan panjang (a) 10 cm; (b) 15 cm; (c) 20 cm

Dari grafik yang disajikan pada Gambar 4.6 terlihat bahwa nilai *pressure drop* memiliki tren yang menurun ke nilai minimum. Penurunan ini terjadi dengan semakin bertambahnya nilai kedalaman aliran. Pada channel dengan kedalaman 1,0 mm memiliki nilai minimum dari kedalaman channel lainnya. Pada kedalaman channel 1,0 mm dengan panjang channel 10 cm didapat nilai *pressure drop* sebesar 266,06 Pa, pada panjang channel 15 cm didapat nilai *pressure drop* sebesar 486,15 Pa, pada panjang channel 20 cm didapat nilai *pressure drop* sebesar 753,23 Pa. Nilai *pressure drop* akan semakin naik dengan berkurangnya ukuran dari kedalaman channel. Pada variasi kedalaman 0,8 mm dengan panjang channel 10 cm didapatkan nilai dari *pressure drop* sebesar 436,18 Pa, pada panjang channel 15 cm nilai *pressure drop* didapatkan sebesar 729,64 Pa, pada panjang 20 cm nilai *pressure drop* didapatkan sebesar 1186,08 Pa. Pada variasi kedalaman sebesar 0,6

mm dengan panjang channel 10 cm didapatkan nilai *pressure drop* adalah sebesar 726,15 Pa, pada panjang channel 15 cm didapat nilai *pressure drop* sebesar 1398,5 Pa, pada panjang channel 20 cm didapat nilai *pressure drop* sebesar 2279,36 Pa. Dari grafik tersebut nilai minimum terjadi pada variasi kedalaman 1,0 mm dengan panjang channel 10 cm dan nilai tertinggi adalah pada variasi kedalaman 0,6 mm dengan panjang channel 20 cm. Hasil simulasi juga divalidasi dengan perhitungan secara teori yang ditunjukkan pada grafik. Dihasilkan perbedaan nilai yang tidak terlalu signifikan dan memiliki nilai error tidak mencapai nilai 10%.

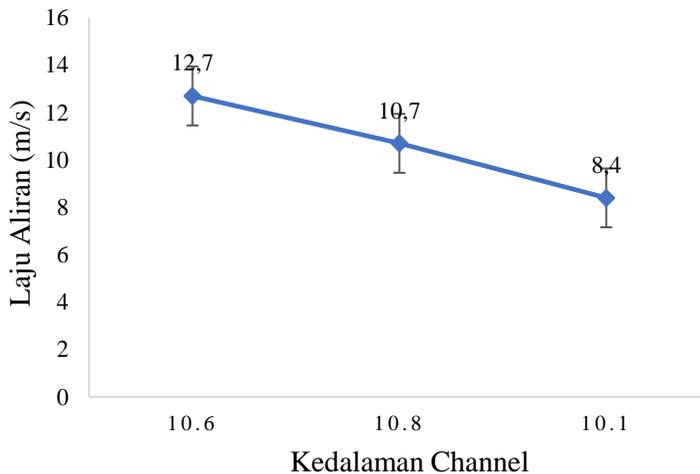
Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Inoue (2005) dimana nilai dari *pressure drop* akan semakin naik dengan semakin kecilnya kedalaman channel yang ada. Pada penelitian tersebut menggunakan variasi kedalaman 0,6 mm, 1,0 mm dan 1,5 mm. Didapatkan hasil bahwa nilai *pressure drop* tertinggi ada pada kedalaman channel 0,6 mm dan semakin kecil diikuti dengan bertambahnya besar dari kedalaman channel.

Pada kedalaman channel yang kecil memiliki luas penampang channel yang lebih kecil juga. Tekanan yang bekerja akan berbanding terbalik terhadap luas penampang saluran, ketika luas penampang semakin mengecil maka tekanan yang bekerja akan semakin besar. Sehingga pada pengurangan kedalaman channel akan mengakibatkan nilai tekanan akan naik dari ujung inlet. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.1 yang menyatakan perbedaan tekanan akan berbanding terbalik dengan kedalaman channel. Kedalaman channel ini juga akan mempengaruhi proses reaktan yang akan bereaksi. Semakin besar nilai kedalaman channel maka jarak reaktan untuk bereaksi atau mencapai membrane juga akan semakin besar sehingga akan memerlukan waktu untuk bisa melakukan reaksi yang sempurna. Namun pada kedalaman channel yang kecil juga akan meningkatkan nilai *pressure drop* yang tinggi sehingga kecepatan aliran yang mengalir juga semakin tinggi dan

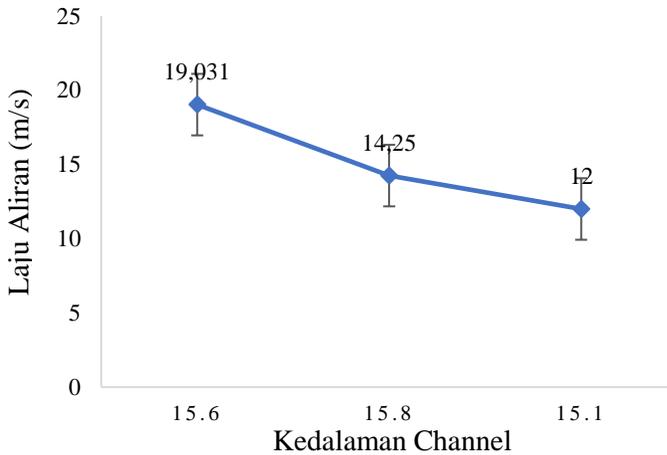
menghasilkan aliran yang terlalu cepat sehingga tidak sempat untuk melakukan reaksi pada membrane.

Nilai *pressure drop* pada kedalaman channel semakin besar akan memiliki nilai semakin kecil akibat dari bertambahnya luas penampang masuknya aliran. Kondisi ini memiliki kesesuaian dengan persamaan yang ada, yang menyebabkan nilai *pressure drop* akan semakin turun.

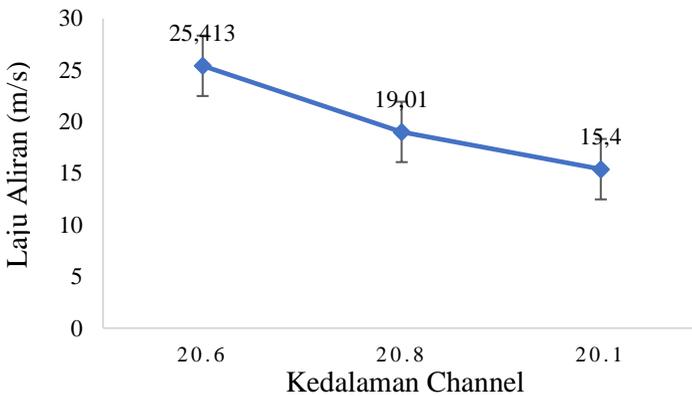
Adapun pengaruh kedalaman channel pada laju aliran yang terjadi pada *flowchannel fuel cell* ditunjukkan pada Gambar 4.7 sebagai berikut.



(a)



(b)



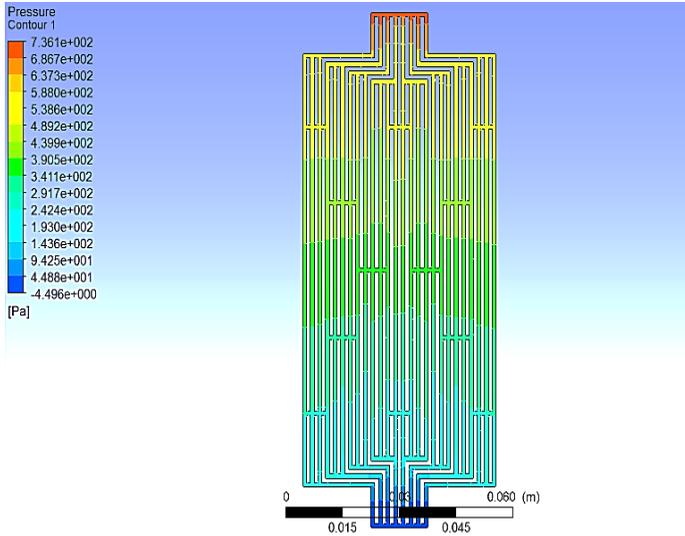
(c)

Gambar 4.7 Pengaruh dari besar kedalaman channel terhadap laju aliran dengan panjang channel (a) 10 cm (b) 15 cm (c) 20 cm

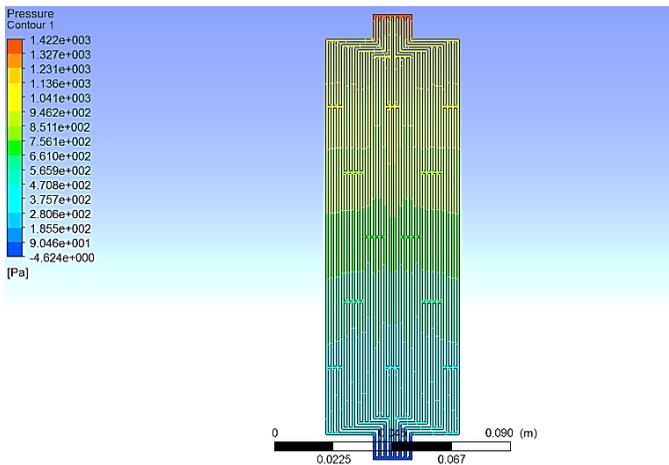
Dari kurva yang ditunjukkan gambar diatas didapatkan bahwa nilai laju aliran tertinggi ada pada kedalaman channel 0,6 mm dengan variasi panjang channel yaitu 20 cm dengan nilai sebesar 25,41 m/s. dan nilai paling rendah dari laju aliran yang terjadi pada kedalaman channel 1,0 mm dengan variasi panjang 10 cm yaitu sebesar 8,4 m/s. Secara keseluruhan nilai dari laju aliran akan semakin turun dengan semakin bertambahnya nilai dari kedalaman channel. Dan nilai laju aliran akan semakin naik dengan semakin berkurangnya nilai dari kedalaman channel. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chang (2012) dimana laju aliran akan meningkat dengan semakin kecilnya nilai dari kedalaman channel yang berakibat waktu reaksi hydrogen yang tidak mencukupi dan menimbulkan densitas daya yang rendah. Laju aliran ini juga dipicu oleh *pressure drop* yang tinggi akibat dari semakin kecilnya nilai dari kedalaman channel. Sehingga mengakibatkan nilai dari laju aliran yang terjadi juga semakin besar.

4.4 Analisa Pengaruh Panjang dan Kedalaman Channel terhadap Profil Tekanan dan Laju Aliran pada Flow Channel

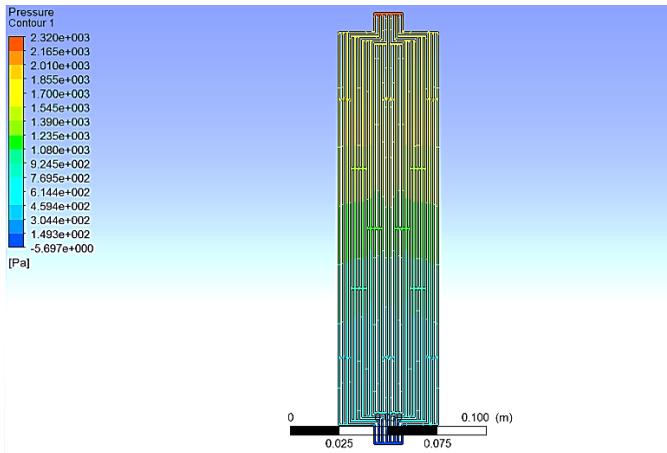
Pada simulasi yang dilakukan dengan metode CFD didapatkan bahwa hasil simulasi menunjukkan profil dari tekanan yang terjadi pada channel aliran hydrogen pada *flowchannel* dan juga laju aliran dari hidrogen. Dengan memvariasikan panjang dan kedalaman channel menghasilkan profil distribusi tekanan yang berbeda pada *flowchannel*. Pada Gambar 4.8 sampai dengan 4.10 ditunjukkan profil distribusi tekanan dari beberapa variasi dari panjang channel *flowchannel*.



(a)

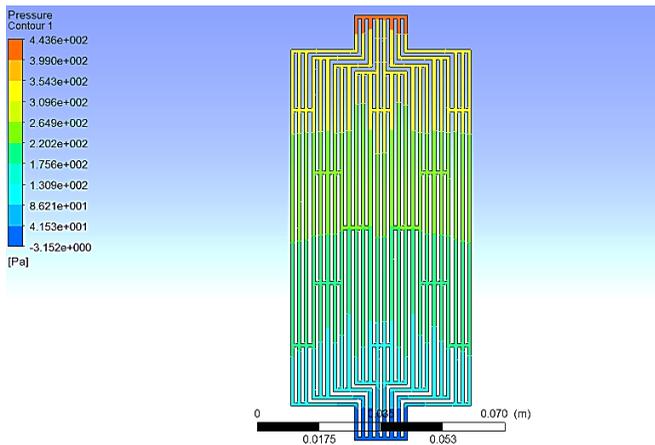


(b)

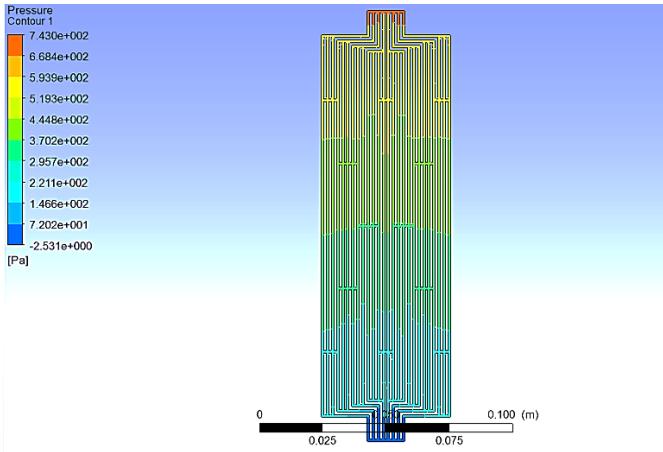


(c)

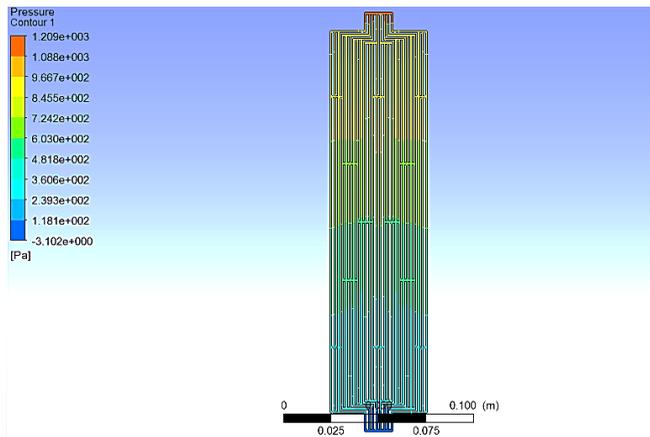
Gambar 4.8 Profil Tekanan pada *Flowchannel* dengan Kedalaman Channel 0,6 mm dan Panjang Channel (a) 10 cm (b) 15 cm (c) 20 cm



(a)

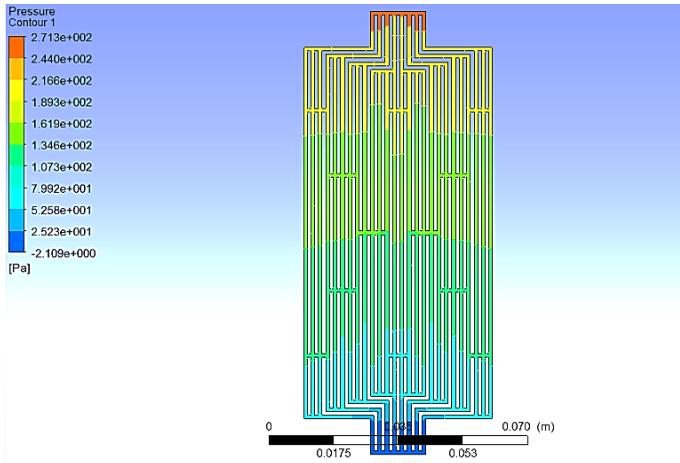


(b)

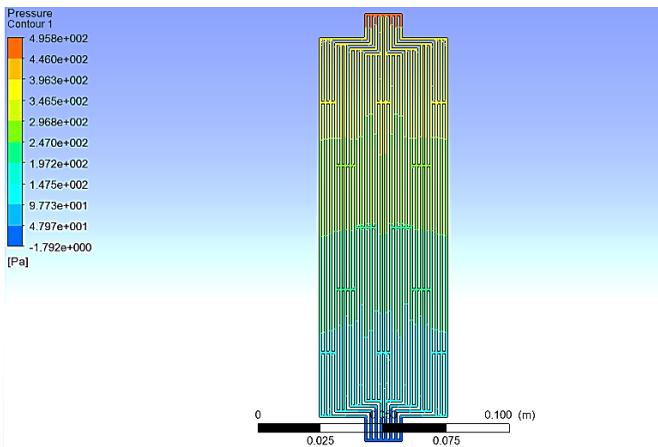


(c)

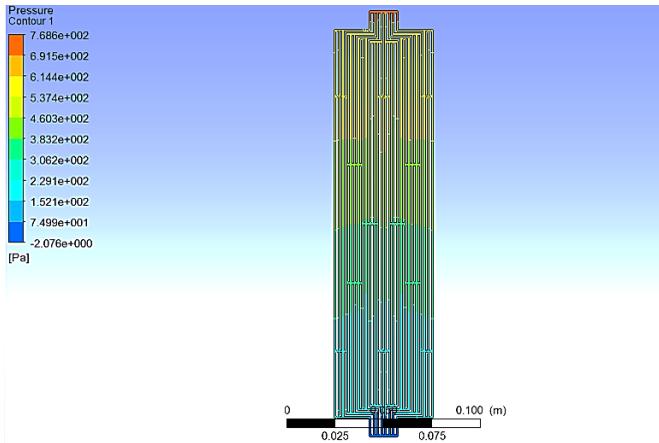
Gambar 4.9 Profil Tekanan pada *Flowchannel* dengan Kedalaman Channel 0,8 mm dan Panjang Channel (a) 10 cm (b) 15 cm (c) 20 cm



(a)



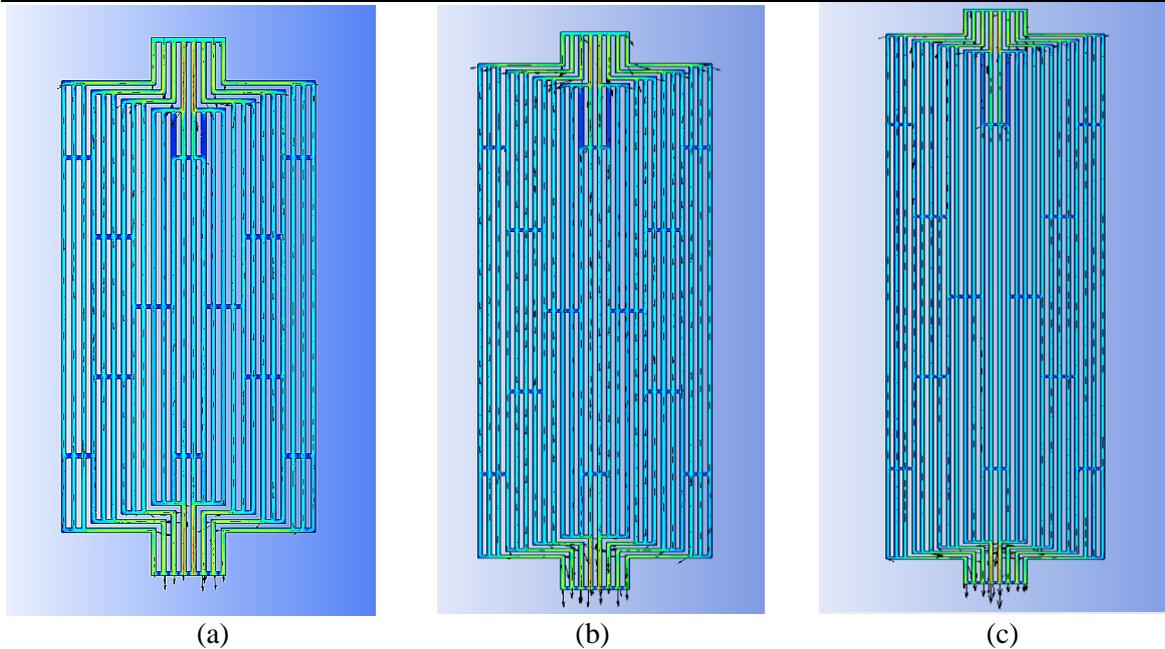
(b)



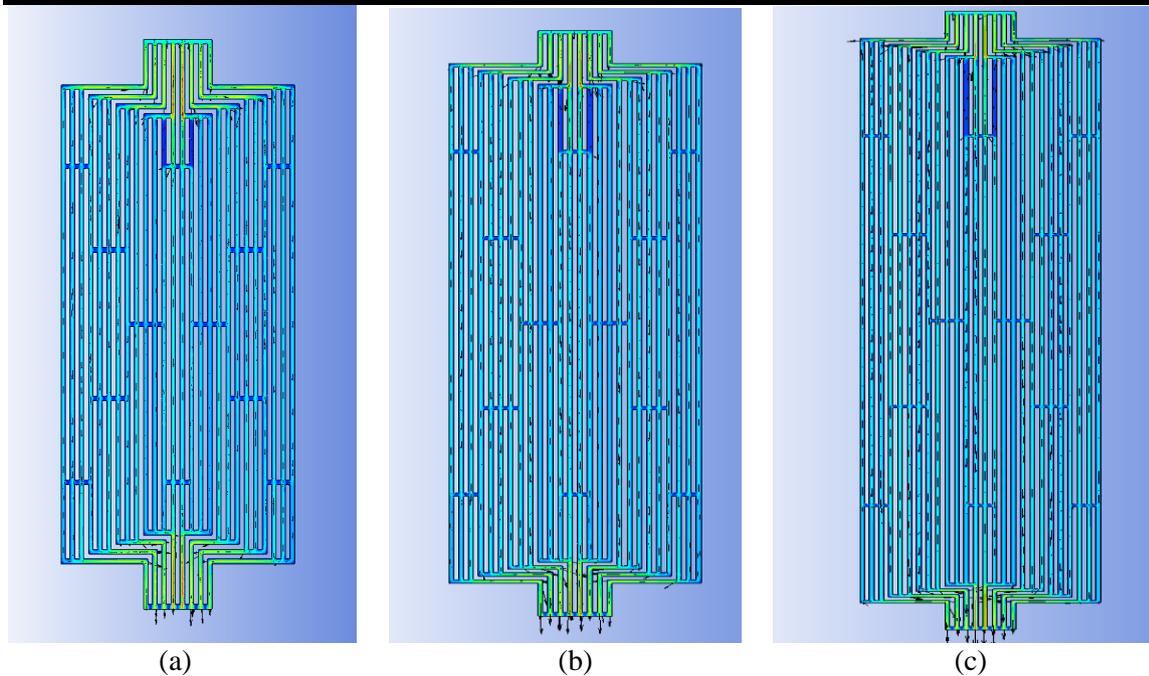
Gambar 4.10 Profil Tekanan pada *Flowchannel* dengan kedalaman Channel 1,0 mm dan Panjang Channel (a) 10 cm (b) 15 cm (c) 20 cm

Dari profil distribusi tekanan yang telah ditunjukkan pada gambar tersebut dapat dianalisa bahwa tekanan tertinggi terjadi pada saat hidrogen masuk melalui inlet.

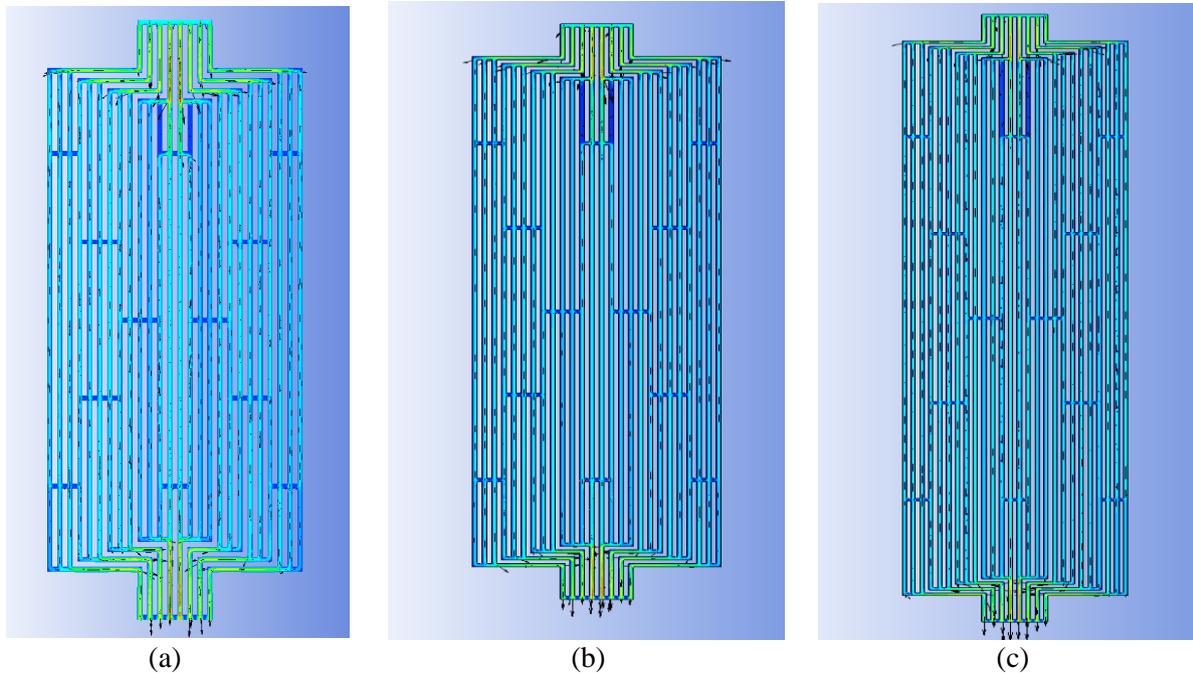
Selanjutnya pada Gambar 4.11 sampai dengan Gambar 4.13 ditunjukkan profil dari laju aliran yang terjadi pada *flowchannel fuel cell*.



Gambar 4.11 Profil laju aliran dengan kedalaman channel 0,6 mm dan panjang channel (a) 10 cm, (b) 15 cm dan (c) 20 cm



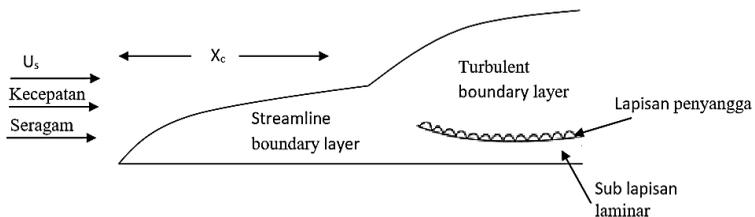
Gambar 4.12 Profil laju aliran dengan kedalaman channel 0,8 mm dan panjang channel (a) 10 cm, (b) 15 cm dan (c) 20 cm



Gambar 4.13 Profil laju aliran dengan kedalaman channel 1,0 mm dan panjang channel (a) 10 cm, (b) 15 cm dan (c) 20 cm

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Dari profil laju aliran yang ada, nilai laju aliran yang terjadi pada bagian inlet dan outlet memiliki nilai yang tinggi. Terdapat profil aliran yang berwarna merah pada saat aliran selesai melewati inlet dan dengan nilai yang tinggi yang tidak memiliki nilai sama dengan nilai laju aliran yang terjadi pada inlet. Hal ini disebabkan oleh karena adanya kondisi boundary layer yang terjadi saat aliran tersebut mengalir. Boundary layer adalah sebuah lapisan kecil yang berdekatan dengan permukaan dimana gaya viskositas mendominasi dibanding gaya inersia (Richardson, 2018). Pada gambar 4.14 di ilustrasikan proses pembentukan boundary layer akibat dari suatu aliran yang terjadi. Ketika diasumsikan tidak terjadi slip pada permukaan yang dilewati oleh suatu aliran fluida, maka kecepatan fluida yang mengalir pada semua titik pada permukaan, atau $y=0$, maka kecepatan pada



Gambar 4.14 Ilustrasi pembentukan boundary layer

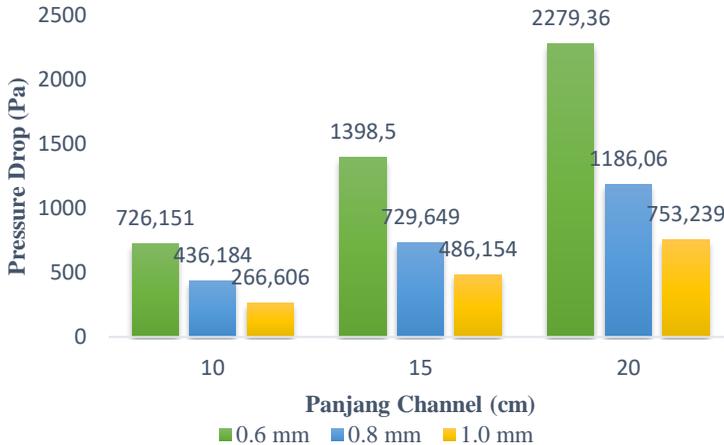
sumbu y akan bernilai nol. Pada beberapa posisi dari sebuah jarak pada simpangan awal, kecepatan akan meningkat dari v_0 pada permukaan dan akan mencapai pada kecepatan fluida tanpa gejala. Pada jarak yang dekat dengan simpangan awal, dimana boundary layer memiliki ketebalan yang masih kecil, aliran yang terjadi masih berupa aliran laminar, selanjutnya tegangan geser akan muncul secara perlahan dari efek gesekan viskositas. Ketebalan boundary layer ini akan meningkat atau mencapai nilai kritis dimana aliran laminar akan berhenti dan berubah menjadi aliran

turbulen. Parameter penting dalam suatu aliran adalah nilai Reynold number (Re).

Pada penelitian ini dilakukan pengecekan pada daerah merah yang terjadi pada variasi panjang 10 cm dan kedalaman 0.8 mm. pada aliran yang berwarna merah tersebut dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai Re untuk bisa dilakukan apakah aliran tersebut sudah berubah menjadi aliran turbulen atau masih pada aliran laminar. Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.7 didapatkan nilai reynold number dari *flowchannel* dengan variasi panjang 10 cm dan kedalaman 0,8 mm memiliki nilai Re sebesar 1398. Dimana menurut penelitian yang dilakukan oleh spiegel (2008) untuk aliran laminar memiliki nilai Re dibawah 2000. Artinya pada *flowchannel* tersebut aliran yang terjadi masih berupa aliran laminar dan ketebalan dari boundary layer yang terjadi masih belum menyentuh nilai kritisal. Karena apabila aliran berubah menjadi turbulen akan mengakibatkan kurang baiknya peforma dari *fuel cell* yang ada.

4.5 Optimasi Geometri Flow Channel *Fuel cell*

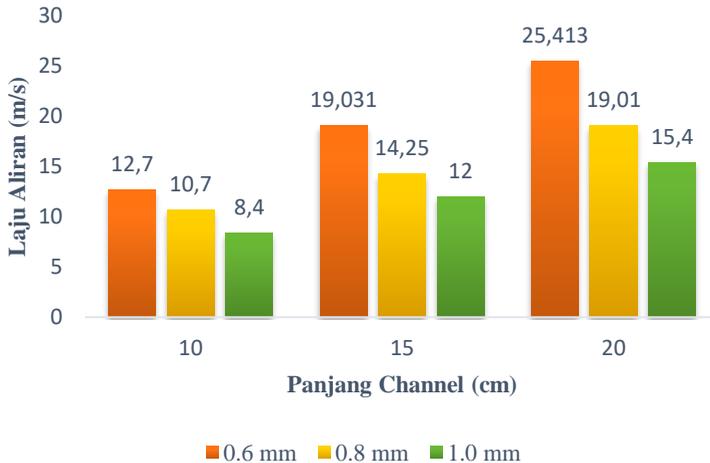
Proses simulasi dan analisa terhadap desain penelitian telah dilakukan dengan memvariasikan panjang dan kedalaman channel dari *flowchannel* aliran gas hidrogen dan menghasilkan nilai *pressure drop* dan laju aliran dari masing masing variasi yang dilakukan. Dari proses diketahui gambaran pengaruh dari panjang dan kedalaman channel terhadap *pressure drop* dan laju aliran yang terjadi pada *flowchannel fuel cell*. Gambar 4.15 berikut ini menunjukkan diagram hasil simulasi mengenai *pressure drop* yang terjadi pada variasi panjang dan kedalaman yang ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 4.15 Diagram hasil simulasi terhadap *pressure drop* yang terjadi pada panjang channel dengan variasi kedalaman.

Pada penelitian yang dilakukan oleh nattawut, dkk (2011) diketahui bahwa desain optimal dengan penggunaan 6 channel yang berarti panjang channel yang pendek dengan kedalaman 1 mm. didapatkan densitas arus yang baik. Nilai dari *pressure drop* pada 6 channel tersebut memiliki nilai yang paling rendah dibandingkan dengan yang lainnya. Nilai *pressure drop* yang terjadi adalah sebesar $359,5 \text{ N/m}^2$. Dari penelitian tersebut didapatkan rentang kondisi paling baik diantara 350 N/m^2 sampai dengan 500 N/m^2 untuk besaran *pressure drop* yang terjadi. Pada penelitian ini nilai *pressure drop* yang berada pada rentang tersebut adalah pada variasi panjang 10 cm dengan kedalaman 0,8 mm dan variasi panjang 15 cm dengan variasi kedalaman 1,0 mm. Dengan masing-masing besar nilai dari dua variasi diatas adalah $436,18 \text{ N/m}^2$ dan $486,15 \text{ N/m}^2$. Dari hasil tersebut selanjutnya dilakukan analisa hasil laju aliran yang terjadi pada masing-masing desain *flowchannel* dengan parameter yang telah ditentukan. Pada

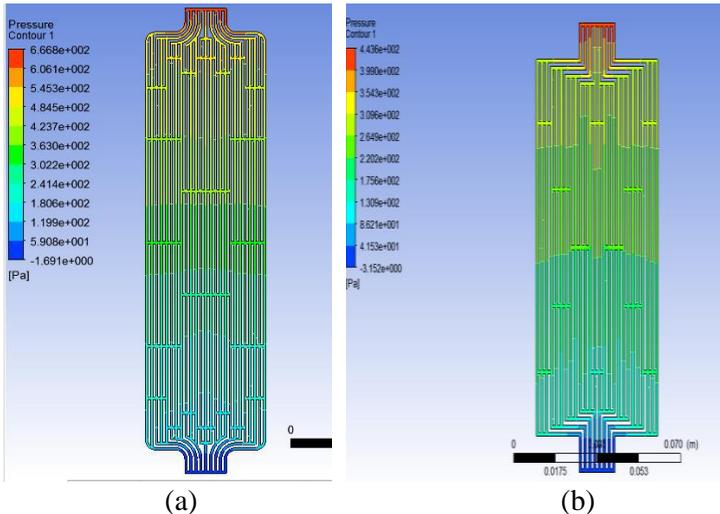
Gambar 4.16 ditunjukkan grafik hasil simulasi dari parameter desain geometri.



Gambar 4.16 Diagram hasil simulasi terhadap laju aliran yang terjadi pada panjang channel dengan variasi kedalaman.

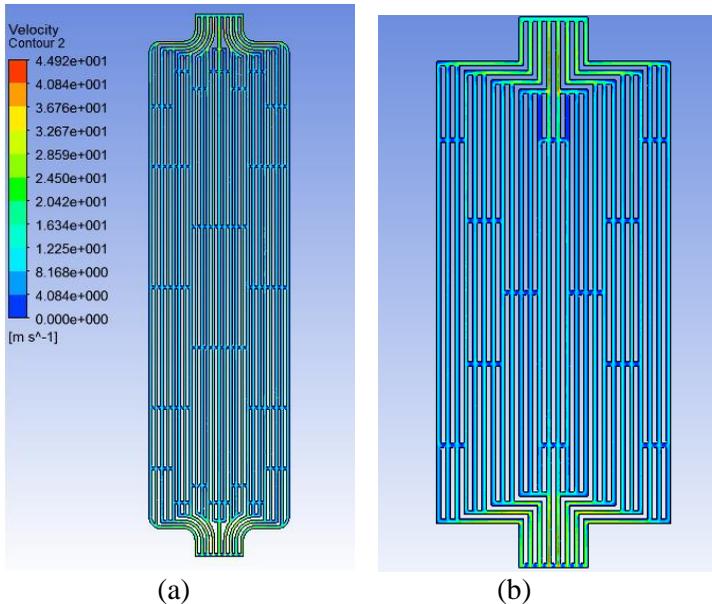
Pada diagram tersebut ditunjukkan nilai laju aliran yang terjadi pada masing-masing *flowchannel*. Untuk variasi panjang channel 15 cm dan kedalaman channel 1 mm memiliki nilai laju aliran 12 m/s. sedangkan pada variasi panjang channel 10 cm dan kedalaman channel 0,8 mm memiliki laju aliran 10,8 m/s. Pada penggunaan *fuel cell* yang memiliki efisiensi yang baik maka juga diperhatikan nilai dari aliran rata-rata yang masuk pada *fuel cell*. Dari kedua variasi tersebut aliran rata-rata yang dihasilkan dengan memiliki nilai baik adalah pada variasi panjang 10 cm dan kedalaman 0,8 mm karena memiliki nilai kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi panjang 15 cm dan kedalaman 1 mm. Aliran rata-rata yang mengalir masuk mempengaruhi konsumsi hidrogen yang digunakan dalam *fuel cell*. ketika konsumsi hidrogen memiliki jumlah yang efisien dan menghasilkan reaksi yang sempurna maka *fuel cell* memiliki performa yang baik.

Pada Gambar 4.17 ditunjukkan perbandingan antara desain sebelum dan sesudah dari *flowchannel fuel cell*.



Gambar 4.17 Perbandingan desain (a) sebelum (b) sesudah

Pada hasil perbandingan nilai *pressure drop* desain *flowchannel fuel cell* memiliki nilai *pressure drop* sebesar 652 Pa. sedangkan nilai *pressure drop* untuk desain baru sebesar 436,18 Pa. sedangkan untuk perbandingan nilai laju aliran ditunjukkan pada Gambar 4.18. pada nilai laju aliran pada desain lama memiliki nilai laju aliran 12,7 m/s. pada desain *flowchannel* baru memiliki nilai laju aliran sebesar 10,8 m/s. nilai ini bisa menjadi acuan untuk bisa menerapkan hasil optimasi desain *flowchannel*.



Gambar 4.18 Perbandingan laju aliran (a) sesudah (b) sebelum

Pada hasil penelitian ini desain *flowchannel fuel cell* akan digunakan untuk aplikasi pada mobil antasena. Mobil antasena sendiri adalah sebuah riset mobil dengan tujuan untuk menciptakan mobil yang memiliki nilai efisiensi setinggi mungkin dalam penggunaan energinya. Dalam hal ini mobil antasena menggunakan energi hidrogen sebagai sumber energinya dan juga aplikasi PEM *fuel cell*. Penggunaan *fuel cell* yang memiliki efisiensi tinggi akan mendukung tujuan dari pembuatan mobil ini. Salah satu untuk mencapai efisiensi tinggi ini adalah konsumsi hidrogen yang ada pada sebuah *fuel cell*. Konsumsi hidrogen ini ditentukan oleh aliran rata-rata hidrogen yang mengalir pada sebuah *fuel cell*. Dan juga ketika konsumsi ini juga menghasilkan reaksi yang sempurna dengan densitas arus yang baik dan tegangan yang baik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan suatu kesimpulan sebagai berikut.

1. Nilai dari simulasi numerik dari pengaruh panjang dan kedalaman channel terhadap penurunan tekanan dan laju aliran dihasilkan bahwa nilai penurunan tekanan dan laju aliran akan naik seiring dengan bertambahnya panjang dari channel dan memiliki nilai yang berkebalikan dengan bertambahnya kedalaman channel.
2. Dari hasil didapatkan nilai optimasi yang didapatkan adalah pada panjang channel 10 cm dengan kedalaman channel 0,8 mm dengan nilai *pressure drop* sebesar 436,18 Pa dan nilai laju aliran sebesar 10,8 m/s.

5.2 Saran

Dalam proses melakukan penelitian ini terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk mendapat hasil yang baik lagi.

1. Melakukan serangkaian uji coba secara eksperimen untuk melihat performa dari *flowchannel* yang telah di optimasi.
2. Melakukan perbandingan jenis tipe aliran *flowchannel* dengan tipe aliran yang lainnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Awan, Asifa, Mahmood Salem dan Abdul Basit. 2018. *Simulation of proton exchange membrane fuel cell by using ANSYS Fluent*. Departement of Chemical Engineering, University Technology PETRONAS.
- Behling, Noriko Hikosaka. 2013. *Fuel cells*. Elsevier. United States of America.
- Breeze, Paul. 2017. *Fuel cells*. Academic Press. United Kingdom.
- Catlin, Glenn. 2010. *PEM Fuel cell modeling and Optimization using a genetic algorithm*. Master of Science Departement Mechanical Engineering, University of Delaware.
- Chang, Dyi-huey dan Jung Chung Hung. 2012. *Effects of channel depths and anode flow rates on the performance of miniature proton exchange membrane fuel cells*. Departement of Eviromental Engineering and Management. Chaoyang University of Technology.
- Diep,Tri than, Shoudao Huang, Duc Ha Vu, Vinh Nguyen Duy. 2018. *Effect of Gas Channel Design on Water Management and on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel cells : A Review*. Electrical and Information Engineering. Hunan University.
- EG&G Technical Services, Inc. 2004. *Fuel cell handbook*. Morgantown, West Virginia. U.S Departement of Energy.
- Frano, Barbir. 2013. *PEM Fuel cells : theory and practice second edition*. Elsevier. United States of America.
- Goebel G. Steven. 2011. **Impact of land width and channel span on fuel cell performance**. General motors company. United State of America.
- Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri dan Priscila Spagnol. 2005. *Bipolar plates for PEM fuel cells: A review*. Departement of physics. University of Colorado.
- Inoue, Gen, Yosuke Matsukuma dan Masaki Minemot. 2006. *Effect of gas channel depth on the current density distribution of polymer electrolyte fuel cell by numerical*

- analysis including gas flow through gas diffusion layer.* Departement of chemical engineering. Kyushu University.
- Jaruwasupant, Nattawut dan Yottana Khutanon. 2011. *Effects of difference flow channel designs on Proton Exchange Membrane Fuel cell using 3-D Model.* Departement of Mechanical Engineering, Chiang Mai University.
- Ji, Mengbo dan Wei Zidong. 2009. *A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel cells.* Chemical engineering. Chongqing University.
- Kahraman, Huseyin dan Orhan F. Mehmet. 2016. *Flow Field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: anlysis and modeling.* Department of Mechanical Engineering, Sakarya University.
- Kumar, Atur dan Ramana G. Reddy. 2002. *Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells.* Departement of Metallurgical and Materials Engineering. University of Alabama.
- Lakshminarayanan, V, dkk. 2015. *Optimization of flow channel design and operating parameters on Proton Exchange Membrane Fuel cell using MATLAB.* Departement of Mechanical Engineering, KGiSL Institute of Technology.
- Lakshminarayanan, Dr. 2016. *Optimization on Serpentine flow channel of PEMFC using RSM.* Departement of Mechanical Engineering, B.V. Raju Institute of Technology.
- Lim, B.H, Majlan, E.H, Daud W.R.W, Husaini, Rosli. 2016. *Effects of Flow Field Design on Water Management and Reactant Distribution in PEMFC : a review.* Departement of chemical and process engineering. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Liu, Chaoqun, dkk. 2008. *Computational Fluid Dynamics.* Butterworth-Heinemann. United States of America.

-
- Li, Xianguo, dkk. 2006. *A flow channel design procedure for PEM fuel cells with effective water removal*. Department of mechanical engineering. University of Waterloo.
- Mahmud, Hasan, SM Guo, M.A Wahab. 2009. *Fuel cell Performance Augmantation : Gas Flow Channel Design for Fuel Optimization*. Departement of mechanical engineering. Louisiana State University.
- Manshoor, Bukhari, dkk. 2017. *An effect of straight and serpentine flow field design on Proton Exchange Membrane Fuel cell*. Faculty of Mechanical and Manufacturing Engineering, Universiti Tun Hussein Onn.
- Ramesh, P, dkk. 2011. *Study of the effect of channel width on micro Fuel cell performance using 3D modeling*. Department of Electrical Engineering, IIT Bombay.
- Scholta, dkk. 2006. *Investigation on the influence of channel geometries on PEMFC performance*. Electrochemical engineering, UIm Germany.
- Sharaf Z. Omar dan Mehmet F. Orhan. 2013. *An overview of fuel cell technology: fundamentals and applications*. Departement of Mechanical Engineering, American University of Sharjah.
- Shimpalee, S, Greenway, dan J.W Van Zee. 2006. *The impact of channel path length on PEMFC flow-field design*. Departement Chemical Engineering, University of south Carolina.
- Spiegel, Colleen. 2008. *PEM Fuel cells Modelling and Simulation Using Matlab*. Academic Press. United Kingdom.
- Tu, Jiyuan, Guan-Heng Yeoh, dkk. 2013. *Computational Fluid Dynamics (second edition)*. Butterworth-Heinemann. United states of America.
- Zhang, Xuyang, Adrew Higier, dkk. 2019. *Experimental studies of effect of land width in PEM fuel cell with serpentine flow field and carbon cloth*. Clean energy research institute. University of Miami.
-

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan banyak bantuan kepada penulis serta mendukung hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik, diantaranya:

1. Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya telah diberikan kekuatan sehingga penulis mampu menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Orang tua, kakak dan keluarga yang telah memberikan motivasi dan doa sehingga penulis diberikan kelancaran.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, serta memberikan banyak ilmu pengetahuan dalam pengerjaan.
4. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis, sekaligus selaku Ketua Tim Penelitian Tim *Frangible Bullet* yang telah menurunkan banyak ilmu yang tak ternilai harganya.
5. Bapak Sigitri Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
6. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI ITS.
7. Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T selaku dosen wali dari penulis.
8. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. yang telah banyak memberikan ilmu kepada penulis.
9. Seluruh Karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
10. Ainnaya Al-Furqon yang telah memberikan motivasi dan membantu dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
11. Seluruh Angkatan MT18.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Iyando Aditiyawan. Penulis dilahirkan di Banyuwangi, 16 Maret 1998, dan merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di TK Dharmawanita 1, SDN 3 Bagorejo, SMP Negeri 1 Srono dan SMA Negeri 1 Glagah. Penulis kemudian melanjutkan studinya di Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016 dengan NRP 02511640000083.

Selama menjalankan Pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi di BSO MTC HMMT FTI-ITS sebagai Staff Devisi Antasena kepengurusan 2017/2018. Penulis berpartisipasi aktif sebagai anggota Tim Riset Peluru Frangible. Penulis juga berpartisipasi aktif dalam Antasena ITS Team kepengurusan 2018/2019 yang berperan sebagai *Technical Manager*. Dalam partisipasinya di Tim Antasena, penulis berhasil membawa beberapa gelar juara diantaranya *3rd place* dalam Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) 2018 di kelas urban diesel, Kompetisi Shell Eco Marathon (SEM) Asia 2019 dengan penghargaan *Runner Up* di kelas Urban Hidrogen, *Runner Up Driver's World Championship Qualifier Asia*, *Most Innovative Hydrogen Newcomer*, dan juga sebagai *Participant* Shell Eco Marathon Europe 2019 di Surrey, United Kingdom.

(halaman ini sengaja dikosngkan)