



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH*
CHANNEL BIPOLAR PLATE TIPE PARAREL UNTUK
OPTIMASI LAJU ALIRAN HIDROGEN PADA
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL
(PEMFC)**

LAPORAN SKRIPSI

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Oleh:

Moh Nurkhamal

NIM. 2002411029

PROGRAM STUDI TEKNIK REKAYASA MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK MESIN

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

2024



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH*
CHANNEL BIPOLAR PLATE TIPE PARALEL UNTUK
OPTIMASI ALIRAN GAS HIDROGEN PADA *PROTON*
EXCHANGE MEBRANE FUEL CELL (PEMFC)**

SKRIPSI

Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan
Sarjana Terapan Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur,

Jurusan Teknik Mesin

Oleh:

Moh Nurkhamal

NIM. 2002411029

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK MESIN

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

2024



- Hak Cipta :**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI

MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH CHANNEL* *BIPOLAR PLATE* TIPE PARALEL UNTUK OPTIMASI LAJU ALIRAN GAS HIDROGEN PADA *PROTON EXCHANGE MEBRANE FUEL CELL* (PEMFC)

Oleh:
Moh Nurkhamal
NIM. 2002411029
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Skripsi telah disetujui oleh pembimbing

Pembimbing 1

Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T.
NIP. 198608302009122001

Pembimbing 2

Vina Nanda Garjati, S.T., M.T.
NIP. 199206232020122014

Ketua Program Studi Sarjana Terapan
Teknologi Rekayasa Manufaktur

Muhammad Prasha Risfi Silitonga, S.Si, M.T.
NIP. 199403192022031006



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PENGESAHAN
SKRIPSI

MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH CHANNEL*
BIPOLAR PLATE TIPE PARALEL UNTUK OPTIMASI LAJU ALIRAN
GAS HIDROGEN PADA *PROTON EXCHANGE MEBRANE FUEL CELL*
(PEMFC)

Oleh:
Moh Nurkhamal
NIM. 2002411029
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang sarjana terapan di hadapan Dewan
Penguji pada tanggal 22 Agustus 2024 dan diterima sebagai persyaratan untuk
memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Sarjana Terapan
Teknologi Rekayasa Manufaktur Jurusan Teknik Mesin

DEWAN PENGUJI

No.	Nama	Posisi Penguji	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Amalina Shomami , S.Pd., M.Hum. NIP. 7302018050219911116	Ketua		2/9/2024
2.	Cecep Slamet Abadi , S.T., M.T. NIP. 196605191990031002	Anggota		30/08/2024
3.	Drs., Nugroho Eko Setijogiarto , Dipl.Ing., M.T. NIP. 196512131992031001	Anggota		02/09/2024

Depok, 12 September 2024
Disahkan oleh:
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Eng. Maslamin, S.T., M.T., IWE.
NIP. 197707142008121005



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Moh Nurkhamal
NIM : 2002411029
Program Studi : Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Menyatakan bahwa yang dituliskan di dalam Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri bukan jiplakan (plagiasi) karya orang lain baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat, gagasan, atau temuan orang lain yang terdapat di dalam Skripsi telah saya kutip dan saya rujuk sesuai dengan etika ilmiah. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Depok, 22 Agustus 2024



Moh Nurkhamal
NIM. 2002411029



MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH CHANNEL* *BIPOLAR PLATE* TIPE PARALEL UNTUK OPTIMALISASI KINERJA *PROTON EXCHANGE MEBRANE FUEL CELL* (PEMFC)

Moh Nurkhamal¹⁾, Vika Rizkia¹⁾, dan Vina Nanda Garjati¹⁾

¹⁾Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Email: moh.nurkhamal.tm20@mhs.wpnj.ac.id

ABSTRAK

Pada era modern ini, kebutuhan akan sumber energi yang efisien dan ramah lingkungan semakin meningkat. Salah satu teknologi yang memiliki potensi besar dalam memenuhi kebutuhan ini adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi lebar dan kedalaman kanal pada desain pelat bipolar tipe paralel terhadap kinerja PEMFC. Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk menganalisis distribusi aliran hidrogen dan tekanan dalam berbagai variasi desain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan lebar dan kedalaman kanal secara signifikan mempengaruhi distribusi tekanan dan kecepatan aliran, yang pada gilirannya berpengaruh terhadap efisiensi sistem PEMFC. Desain dengan lebar dan kedalaman kanal yang dioptimalkan dapat meningkatkan kinerja operasional PEMFC dengan mengurangi penurunan tekanan dan meningkatkan distribusi aliran yang merata.

Kata kunci: PEMFC, Pelat Bipolar, CFD, Penurunan Tekanan, Distribusi Aliran.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

MODIFIKASI DESAIN *WIDTH* DAN *DEPTH* CHANNEL BIPOLAR PLATE TIPE PARALEL UNTUK OPTIMALISASI KINERJA PROTON EXCHANGE MEBRANE FUEL CELL (PEMFC)

Moh Nurkhamal¹⁾, Vika Rizkia¹⁾, dan Vina Nanda Garjati¹⁾

Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok 16425

Email: moh.nurkhamal.tm20@mhs.w.pnj.ac.id

ABSTRAK

In the modern era, the demand for efficient and environmentally friendly energy sources is increasing. One technology with great potential to meet this demand is the Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). This research aims to investigate the effect of channel width and depth variations in the design of parallel-type bipolar plates on the performance of PEMFC. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to analyze hydrogen flow distribution and pressure across various design variations. The results indicate that changes in channel width and depth significantly affect pressure distribution and flow velocity, which in turn impacts the efficiency of the PEMFC system. An optimized design with adjusted channel width and depth can enhance PEMFC operational performance by reducing pressure drop and ensuring uniform flow distribution.

Keyword: PEMFC, Bipolar Plate, CFD, Pressure Drop, Flow Distribution



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta karunia-Nya yang tak terhingga, sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Laporan Skripsi yang berjudul “MODIFIKASI DESAIN *WIDTH DAN DEPTH CHANNEL BIPOLAR PLATE TIPE PARALEL UNTUK OPTIMALISASI KINERJA PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)*”.

Selama penyusunan laporan ini, penulis menghadapi berbagai tantangan dan kesulitan, namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan laporan ini dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan, di antaranya:

1. Bapak Dr. Ir., Eng. Muslimin, S.T., M.T., IWE., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, yang telah memberikan kesempatan dan bimbingan kepada penulis selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Muhammad Prasha Risfi Silitonga, M.T., selaku Ketua Program Studi Manufaktur Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, yang telah memberikan arahan serta dukungan yang sangat berarti dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 1, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dukungan moril dan materil yang sangat membantu penulis dalam menyusun laporan ini.
4. Ibu Vina Nanda Garjati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 2, yang telah memberikan panduan, saran, dan dukungan yang sangat berharga bagi penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Yudi, selaku staff I-Cell Universitas Indonesia, yang telah memberikan bantuan teknis yang sangat dibutuhkan penulis dalam proses fabrikasi prototipe single stack PEMFC.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

6. Bapak Radhi Maladzi, S.T., M.T., yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis dalam proses fabrikasi single stack PEMFC.
7. Reza Purnama, yang telah memberikan dukungan yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
8. Teman-teman Manufaktur 2020, yang selalu memberikan semangat, motivasi, dan suasana yang hangat selama masa perkuliahan dan penyusunan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik mesin. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih dan semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua.

Depok, 22 Agustus 2024

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Moh Nurkhamal
NIM. 2002411029



DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Fuel Cell</i>	6
2.1.1. Komponen <i>Fuel Cell</i>	7
2.1.2. Cara Kerja <i>Fuel Cell</i>	8
2.1.3. Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
2.2 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC)	11
2.2.1. Prinsip Kerja PEMFC	11
2.2.2. Komponen Utama PEMFC	12
2.2.3. Keunggulan dan Kerugian PEMFC	13
2.3 <i>Bipolar Plate</i> (Pelat Bipolar)	15
2.4 <i>Flow Field</i> (Bidang Aliran)	16
2.3.1. Jenis Bidang Aliran	17
2.5 <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	19
2.6 Desain Faktorial	22
2.7 Kajian Literatur	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	38

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.1	Jenis Penelitian	38
3.2	Objek Penelitian	38
3.3	Tahapan Penelitian	39
3.5	Sumber Data Penelitian	49
3.6	Metode Pengumpulan Data	49
3.7	Metode Analisis Data	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		50
4.1	Hasil Desain	50
4.2	Reynold Number	54
4.3	Hasil Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	57
4.4	Hasil Grafik <i>Factorial Plot</i>	70
4.5	Hasil <i>Analisis of Variance</i> (ANOVA)	72
4.6	Hasil Prototipe	75
BAB V PENUTUP		76
5.1	Kesimpulan	76
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		82

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Contoh Desain Faktorial 3×3	23
Tabel 3. 1 Dua Faktor Dengan Tiga Level.....	42
Tabel 3. 2 Kombinasi Parameter Desain.....	42
Tabel 3. 3 Kondisi Operasi Desain	43
Tabel 4. 1 Variasi Desain Tipe Paralel.....	54
Tabel 4. 2 Factor Information	72
Tabel 4. 3 ANOVA Berdasarkan Respon Pressure Aliran Hidrogen	73
Tabel 4. 4 Model Summary Berdasarkan Pressure Aliran Hidrogen.....	74
Tabel 4. 5 Anova Berdasarkan Respon Velocity Aliran Hidrogen.....	74
Tabel 4. 6 Model Summary Berdasarkan Pressure Aliran Hidrogen.....	74

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Komponen <i>Fuel Cell</i>	8
Gambar 2. 2	Proses Reaksi Kimia pada Beberapa Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
Gambar 2. 3	Perbedaan Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	10
Gambar 2. 4	Bagian-Bagian PEMFC	12
Gambar 2. 5	Keuntungan dan Kerugian Teknologi PEMFC	13
Gambar 2. 6	Perbandingan PEMFC dengan Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	14
Gambar 2. 7	Pelat Bipolar Memfasilitasi Pergerakan Elektroda	16
Gambar 2. 8	Jenis-Jenis <i>Flow Field</i> Pelat Bipolar	17
Gambar 2. 9	<i>Advantage</i> dan <i>Disadvantage Flow Field Type</i>	18
Gambar 2. 10	<i>Friction Factors for Laminar Flow in Noncircular Ducts</i>	20
Gambar 2. 11	Moody Diagram	21
Gambar 2. 12	Optimalisasi Desain Paralel	25
Gambar 2. 13	Hasil Perbandingan <i>Biomimetic Design</i>	27
Gambar 2. 14	Modifikasi Desain Paralel dengan Adaptasi <i>Serpentine</i>	28
Gambar 2. 15	Variasi Modifikasi Desain <i>Parallel</i> Pelat Bipolar	29
Gambar 2. 16	Desain <i>Wave Parallel Flow Field</i>	30
Gambar 2. 17	Desain Adaptasi <i>Dotmatrix</i> Pada Desain <i>Parallel</i>	31
Gambar 2. 18	Perbandingan <i>Pressure</i> Desain <i>Parallel-Serpentine</i>	32
Gambar 2. 19	Modifikasi Desain Lekukan Samping	33
Gambar 2. 20	Modifikasi Penampang Saluran Pelat Bipolar	34
Gambar 2. 21	Proses Mesin CNC	37
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 3. 2	Hasil Meshing pada Variasi Desain	45
Gambar 3. 3	Proses Komponen Fabrikasi Komponen Single Stack PEMFC	48
Gambar 4. 1	Sembilan Variasi Desain	53
Gambar 4. 2	Properties Gas Hidrogen Pada Software Ansys	56
Gambar 4. 3	Profil Tekanan Variasi Desain Melalui Simulasi Ansys	62
Gambar 4. 4	Profil Velocity Gas Hidrogen Pada Variasi Desain Paralel	68

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Lebar dan Kedalaman Terhadap Pressure 70

Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Lebar dan Kedalaman Terhadap Velocity 71

Gambar 4. 7 Prototipe Pelat Bipolar Desain Terpilih 75





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Hidrogen, sebagai unsur yang melimpah di alam semesta, memiliki peran penting dalam upaya dekarbonisasi. Potensinya sebagai energi ramah lingkungan dapat mengurangi emisi karbon dan menggantikan bahan bakar fosil [1]. Teknologi seperti *fuel cell* yang menggunakan hidrogen dan oksigen untuk menghasilkan listrik, memungkinkan penggunaan energi bersih dalam berbagai aplikasi, seperti kendaraan listrik, pembangkit listrik, kapal luar angkasa dan lain-lain [2] [3].

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu jenis *fuel cell* yang banyak digunakan pada kendaraan [4]. Alat ini terdiri dari *Membrane Electrode Assemblies* (MEA), *Gas Diffusion Layers* (GDL), dan pelat bipolar [5]. Dari semua komponen tersebut, pelat bipolar memiliki peran penting dalam tumpukan PEMFC, seperti memisahkan katoda dan anoda, menyalurkan gas reaksi, serta menghantarkan elektron [6].

Desain medan aliran (*flow field design*) pada pelat bipolar berfungsi untuk meratakan distribusi gas reaksi, memberikan struktur yang kokoh untuk MEA (*Membrane Electrode Assembly*), dan memfasilitasi pengelolaan air serta panas. Selain itu, desain medan aliran yang tepat dapat meningkatkan performa PEMFC dan mengurangi biaya hingga 50% [7].

Pelat bipolar tipe paralel merupakan salah satu jenis desain medan aliran (*flow field design*) yang banyak digunakan karena mudah dibuat, hemat biaya dan memiliki penurunan tekanan yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan desain medan aliran lainnya. Namun, tipe ini menghasilkan kecepatan yang relatif rendah dan penyebaran gas reaktan yang tidak merata (*maldistribution*), sehingga menyebabkan risiko penumpukan air yang tinggi [8][9]. Masalah ini tentu akan mengganggu proses distribusi gas di sepanjang medan aliran, yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan kinerja PEMFC.

Untuk memperbaiki masalah tersebut, penelitian sebelumnya mengusulkan beberapa modifikasi sekaligus menganalisa penyebab *maldistribution* aliran pada desain paralel dengan menggunakan pendekatan variasi geometri. Beberapa penelitian tersebut menyoroti pentingnya orientasi saluran masuk dan saluran keluar yang dapat mengakibatkan aliran pra-langsung serta menyebabkan sel tidak berfungsi. Selain itu, penelitian ini juga menekankan pentingnya posisi penghalang atau sirip serta memperhatikan bentuk rusuk pada saluran pelat bipolar [10] [11]. Penelitian lain juga menunjukkan posisi *inlet* dan *outlet* pada bagian ujung pelat tipe paralel dapat menghasilkan kecepatan yang rendah pada saluran dan pengelolaan air (*water removal*) yang tidak memadai [12].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan desain baru yang adaptif dan variasi dengan tujuan memperbaiki masalah pada pelat bipolar saat ini, serta mendorong tercapainya kinerja PEMFC yang lebih optimal dan efisien. Namun, penelitian yang secara spesifik mengeksplorasi dampak modifikasi pelat bipolar pada desain tipe paralel dengan mempertimbangkan lebar dan kedalaman *channel* untuk meningkatkan laju aliran dan minimalisasi *pressure drop* hidrogen pada PEMFC masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini masih sangat perlu dikembangkan di Indonesia.

Penelitian ini mengeksplorasi berbagai pendekatan untuk mengatasi kelemahan desain tipe paralel konvensional. Salah satunya adalah dengan menggunakan pendekatan modifikasi geometris yang menggabungkan karakteristik paralel dan serpentin serta adaptasi berbagai variasi dimensional. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki bagaimana lebar dan kedalaman *channel* mempengaruhi aliran dalam medan pelat bipolar tipe paralel yang telah dimodifikasi secara geometris. Metode yang digunakan meliputi pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan menggunakan *Ansys Fluent Simulation* untuk memodelkan aliran gas masuk ke dalam desain pelat bipolar yang dimodifikasi, dengan mempertimbangkan variasi kedalaman dan lebar *channel*. Tujuannya adalah

© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



untuk memprediksi lokasi di mana terjadi penurunan laju aliran dan tekanan, serta interaksi dengan pola aliran yang terbentuk. Kemudian, hasil variasi desain dianalisis dan dibandingkan untuk mengevaluasi dampaknya terhadap distribusi aliran gas dan *pressure drop*, guna memastikan pemerataan gas reaktan dan mengurangi terjadinya penumpukan air. Selanjutnya, variasi desain yang terbaik akan dipilih untuk diterapkan pada teknologi PEMFC.

Penelitian ini diharapkan dapat mengatasi tantangan *maldistribution* aliran yang sering terjadi pada desain tipe paralel, sehingga mengatasi resiko penumpukan air yang tinggi dan meningkatkan kinerja PEMFC.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Dari latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka diperoleh rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh lebar dan kedalaman *channel* pada pelat bipolar tipe paralel terhadap *pressure drop* dan laju aliran *hydrogen* PEMFC menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD)?
2. Bagaimana menentukan desain paling unggul untuk pelat bipolar tipe paralel terhadap *pressure drop* dan laju aliran gas *hydrogen* pada PEMFC menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh lebar dan kedalaman *channel* pada pelat bipolar tipe paralel terhadap *pressure drop* dan laju aliran *hydrogen* PEMFC menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD).
2. Mengetahui desain yang paling unggul untuk pelat bipolar tipe *parallel* terhadap *pressure drop* dan laju aliran gas *hydrogen* pada PEMFC menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, agar pembahasan lebih terfokus dan terarah, maka batasan permasalahan yang akan dibahas sebagai berikut :

1. Hidrogen yang digunakan adalah hidrogen murni
2. Permukaan daerah aliran halus
3. Hidrogen tidak bereaksi pada membran
4. Hanya terjadi perpindahan momentum

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini bermanfaat dalam mengoptimalkan desain pelat bipolar tipe paralel pada PEMFC, dengan memahami pengaruh lebar dan kedalaman kanal terhadap penurunan tekanan dan laju aliran hidrogen menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.
2. Penelitian ini akan menghasilkan data empiris penting untuk merancang dan mengembangkan pelat bipolar tipe paralel dalam mengatasi *pressure drop* dan laju aliran hydrogen, sehingga membantu teknologi PEMFC menjadi lebih optimal dan efisien di masa mendatang.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian dibawah ini:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah penelitian, dan sistematika penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai berbagai studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini menjelaskan mengenai diagram alir, penjelasan langkah-langkah kerja, dan metode dalam memecahkan masalah.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan data-data hasil penelitian dan Analisa hasil penelitian tersebut dibandingkan dengan hasil studi literatur.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran untuk penelitian ini.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan analisis yang telah disajikan, maka dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Lebar dan kedalaman kanal secara signifikan mempengaruhi distribusi tekanan dan kecepatan aliran hidrogen dalam PEMFC. Lebar *channel* yang lebih besar cenderung menurunkan tekanan maksimum, sedangkan kedalaman kanal yang lebih dalam meningkatkan distribusi tekanan yang lebih merata di sepanjang pelat bipolar. Hal ini menunjukkan bahwa optimisasi kedua parameter ini penting untuk mengurangi penurunan tekanan dan meningkatkan laju aliran hidrogen yang lebih stabil.
2. Berdasarkan analisis data dari penelitian menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *main effect plot*, desain saluran dengan lebar 0,7 mm dan kedalaman 0,6 mm terbukti sebagai pilihan yang paling optimal untuk pelat bipolar tipe paralel dalam *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. *Main effect plot* menunjukkan bahwa lebar saluran 0,7 mm memberikan keseimbangan yang ideal antara penurunan tekanan dan kecepatan aliran hidrogen. Simulasi CFD mendukung bahwa kedalaman 0,6 mm mampu menjaga stabilitas aliran hidrogen dengan distribusi tekanan yang merata, yang penting untuk mencegah konsentrasi aliran di area tertentu dan menghindari penumpukan air.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengkaji lebih lanjut pengaruh variasi geometris lain pada desain pelat bipolar, seperti bentuk penampang kanal atau penambahan elemen turbulensi, yang dapat lebih meningkatkan distribusi aliran dan efisiensi kinerja PEMFC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Soleimani, M. Heidari, S. H. H. Dolatabadi, A. Pinnarelli, B. M. Khorrami, Y. L. P. Vizza and G. Brusco, "Progress in hydrogen fuel cell vehicles and up-and-coming technologies for eco-friendly transportation: an international assessment," *Springer*, 27 May 2024.
- [2] M. K. Singla, A. S. Oberoi and P. Nijhawan, "Trends so far in Hydrogen Fuel Cell Technology: State of the art," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019.
- [3] V. Das, S. Padmanaban, K. Venkitesamy, R. Selvamuthukumar, F. Blaabjerg and P. Siano, "Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review," *Elsevier*, pp. 10-18, Januari 2017.
- [4] S. Porstmann, T. Wannemacher and W. -G. Drossel, "A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends," *Elsevier*, pp. 366-383, November 2020.
- [5] L. W. X. Zhiyong and Z. Haodong, "Current status of research on composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): nanofillers and structure optimization," *PMCID*, vol. 14, pp. 7172-7194, February 2024.
- [6] S. Wu, W. Yang, H. Yan, X. Zuo, Z. Cao, H. Li , M. Shi and H. Chen, "A review of modified metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells," *ScienceDirect*, vol. 46 (12), no. International Journal of Hydrogen Energy, pp. 8672-8701, January 2021.
- [7] M. Sauer Moser, S. Kjelstrup, N. Kizilova and B. G. Pollet, "Flow Field Patterns for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, p. 13, 19 February 2020.
- [8] J. M. Jackson, . M. . L. Hupert and S. A. Soper, "Discrete geometry optimization for reducing flow non-uniformity asymmetry, and parasitic minor loss pressure drops in Z-type configurations of fuel cells," *Elsevier*, pp. 274-283, 7 July 2014.
- [9] Y. Zhang and Z. T. , "Flow-field design of the bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell: Problem, progress, and perspective," *Elsevier*, p. 100244, 3 Januari 2024.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [10] G. M. Imbrioscia and H. J. Fasoli, "Simulation and study of proposed modifications over straight-parallel flow field design," *Elsevier*, pp. 8861-8867, 23 January 2014.
- [11] L. P. Yifan Xu, P. Y. and X. L. , "Analysis of the flow distribution for thin stamped bipolar plates with tapered channel shape," *Elsevier*, pp. 5084-5095, 11 February 2016.
- [12] H. Kahraman and . M. F. Orhan, "Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling," *Elsevier*, pp. 363-384, 2016.
- [13] M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E. T. Sayed and A. Olabi, "Environmental aspects of fuel cells: A review," *Elsevier*, p. 141803, 20 August 2020.
- [14] N. Sazali, W. N. Wan Salleh, A. S. Jamaludin and M. N. M. Razali, "New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review," *MDPI*, vol. 10, p. 99, 13 May 2020.
- [15] H. Ahmed, P. Adebayo, M. Ahmed and A. I Arbab, "Hydrogen Fuel Cell Technology: Benefits, Challenges, and Future Potential," *ResearchGate*, vol. 13, no. 1, pp. 48-56, 31 January 2023.
- [16] T. Funabashi, "Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems," *ScienceDirect*, pp. 1-14, 2016.
- [17] A. A. Pratama, "OPTIMASI LEBAR LAND DAN CHANNEL PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN TEKANAN DAN LAJU ALIRAN GAS H₂ MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC," *ITS Repository*, 11 August 2020.
- [18] P. C. Okonkwo, . I. B. Belgacem, . W. Emori and . P. C. Uzoma, "Nafion degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review," *ScienceDirect*, vol. 46 (55), pp. 27956-27973, 29 June 2021.
- [19] S. Campanari and . N. Fergnani, "Cogeneration plants for district heating," *Elsevier*, no. Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes., pp. 1-30, 2020.
- [20] M. Irshad, K. Siraj, R. Raza, A. Ali, P. Tiwari, B. Zhu, A. Rafique, A. Ali, M. K. Ullah and A. Usman, "A Brief Description of High Temperature Solid



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Oxide Fuel Cell's Operation, Materials, Design, Fabrication Technologies and Performance," *MDPI*, vol. 6, p. 75, 9 March 2016.

- [21] S. Dharmalingam, V. Kugarajah and . M. Sugumar, "Membranes for Microbial Fuel Cells," *Elsevier*, pp. 143-194, 2019.
- [22] F. Lee, "A novel, low-cost multifunctional layer for low-temperature polymer electrolyte fuel cells," *International Flame Research Foundation*, 2019.
- [23] A. Alaswad, . A. Palumbo, M. Dassisti and A. Olabi, "Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide," *Elsevier*, pp. 1-18, 2016.
- [24] N. Sazali, W. N. Wan Salleh, A. S. Jama and M. N. Mhd Razal, "New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review," *MDPI*, vol. 10(5), p. 99, 13 May 2020.
- [25] P. Zhang, C. Hao, Y. Han, F. Du, H. Wang, . X. Wang and J. Sun, "Electrochemical behavior and surface conductivity of NbC modified Ti bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell," *Surface & Coating Technology*, 11 June 2020.
- [26] P. Liu and S. Xu, "A review of low-temperature proton exchange membrane fuel cell degradation caused by repeated freezing start," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 22, pp. 8216-8246, 14 December 2022.
- [27] X. Li, "Fuel Cells for Transportation (Chapter 11 - Bipolar plates and flow field design)," *ScienceDirect*, pp. 305-337, 2023.
- [28] X. Gao, J. Chen, R. Xu, Z. Zhen, X. Zeng, X. Chen and L. Cui, "Research progress and prospect of the materials of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs)," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 711-743, 2024.
- [29] P. Orest Adrianowycz, "Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells," *GrafTech International*, 2009.
- [30] S. Chakraborty, K. Palaniswamy, A. Fly, D. Ravi, D. . A. S. Seelan and T. K. Raj Rajagopal, "A Review on the Numerical Studies on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Flow Channel Designs for Automotive Applications," *MDPI*, p. 9620, 15 December 2022.
- [31] M. Kumar, P. Karthikeyan and T. Velumani, "Performance Studies of Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Different Flow Field Designs - Review," *ResearchGate*, vol. 21, pp. 1-53, February 2021.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [32] W. Ren, J. Shen, X. Li and C. Du, "A Review of Fuel Cell System Technology: From Fuel Cell Stack to System Integration," *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, 18 December 2022.
- [33] M. Nawawi, "ANALISA COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) TERHADAP PENGARUH INCLINING KEEL PADA HAMBATAN DAN KECEPATAN KAPAL IKAN," *Repository ITS*, January 2015.
- [34] Munson, Y. O. and H. , *Fundamental of Fluid Mechanics*, 2009.
- [35] A. Ganeshpurkar, V. Pandey, S. Asati, R. Maheshwari, M. Tekade and R. . K. Tekade, "Experimental Design and Analysis of Variance," *Elsevier*, pp. 281-301, 2018.
- [36] H. Ruan, C. Wu, S. Liu and T. Chen, "Design and simulation of novel flow field plate geometry for proton exchange membrane fuel cells," *ResearchGate*, pp. 2167-2176, 11 December 2015.
- [37] G. Zhang, Z. Guan, D. L. G. Li, S. Bai, K. Sun and H. Cheng, "Optimization Design of a Parallel Flow Field for PEMFC with Bosses in Flow Channels Flow Channels," *MDPI*, p. 5492, 20 July 2023.
- [38] C. Suarez, A. Iranzo, B. Toharias and F. Rosa, "Experimental and numerical Investigation on the design of a bioinspired PEM fuel cell," *Elsevier*, 12 July 2022.
- [39] T. Wilberforce, Z. El-Hassan, F. Khatib, A. Al Makky, J. Mooney, A. Barouaji, J. G. Carton and A.-G. Olabi, "Development of Bi-polar plate design of PEM fuel cell using CFD techniques," *Elsevier*, pp. 1-23, 2017.
- [40] M. Sauer Moser, N. Kizilova, B. G. Pollet and S. Kjelstrup, "Flow Field Patterns for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, 19 February 2020.
- [41] Z. Li, S. Wang, S. Yao, X. Wang, W. Li, T. Zhu and X. Xie, "Experimental and numerical study on improvement performance by wave parallel flow field in a proton exchange membrane fuel cell," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021.
- [42] G. Zhang, X. X. Biao Xie, . Q. D. and K. J. , "Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell," *Elsevier*, pp. 555-563, 2019.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

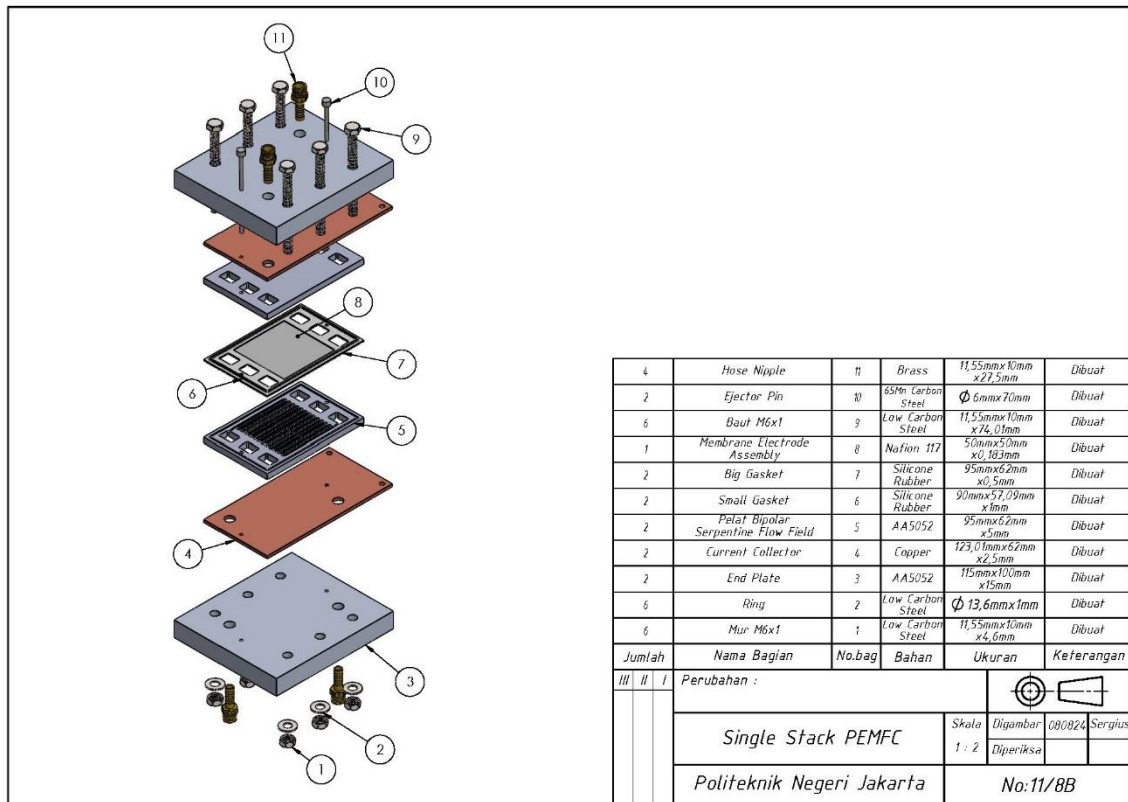
- [43] C. Hu, Y. Zhao, Z. Zhang, H. Zhang and D. Chen, "Optimization of flow field structure for proton exchange membrane fuel cell stack by multi-physics coupling simulation," *Elsevier*, 13 May 2023.
- [44] M. I. Rosli, B. . H. Lim, E. H. Majlan, T. Husaini, W. R. Wan Daud and S. F. Lim , "Performance Analysis of PEMFC with Single-Channel and Multi-Channels on the Impact of the Geometrical Model," *MDPI*, vol. 15, no. 21, 26 October 2022.
- [45] R. Busqué, M. Bossio, A. Brigido and A. Lara, "Effects of Different Channel Geometries of Metallic BipolarPlates on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance," *Energies*, vol. 16, no. 23, 22 November 2023.
- [46] M. Z. Chowdhury, O. Genc and . S. Toros , " Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM Fuel Cell," *ScinceDirect*, vol. 43, no. 23, pp. 10798-10809, 2018.
- [47] C.-C. Wang, . K.-S. Yang, . J.-S. Tsai and . I. Y. Chen, "Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part I: Typical inlet header," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3226-3234, 12 June 2011.
- [48] H. Liu, W. Yang, J. Tan, Y. An and L. Cheng, "Numerical analysis of parallel flow fields improved by micro-distributor in proton exchange membrane fuel cells," *Energy Conversion and Management*, vol. 176, pp. 99-109, 2018.
- [49] W. Zhang, P. Hu, X. Lai and L. Peng, *Analysis and optimization of flow distribution in parallel-channel configurations for proton exchange membrane fuel cells*, vol. 194, pp. 931-940, 23 May 2009.
- [50] Y. Li, J. Bi, M. Tang and G. Lu, "Snowflake Bionic Flow Channel Design to Optimize the Pressure Drop and Flow Uniform of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *MDPI*, vol. 13, no. 5, p. 665, 24 April 2022.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Drawing Single Stack PEMFC

Hak Cipta

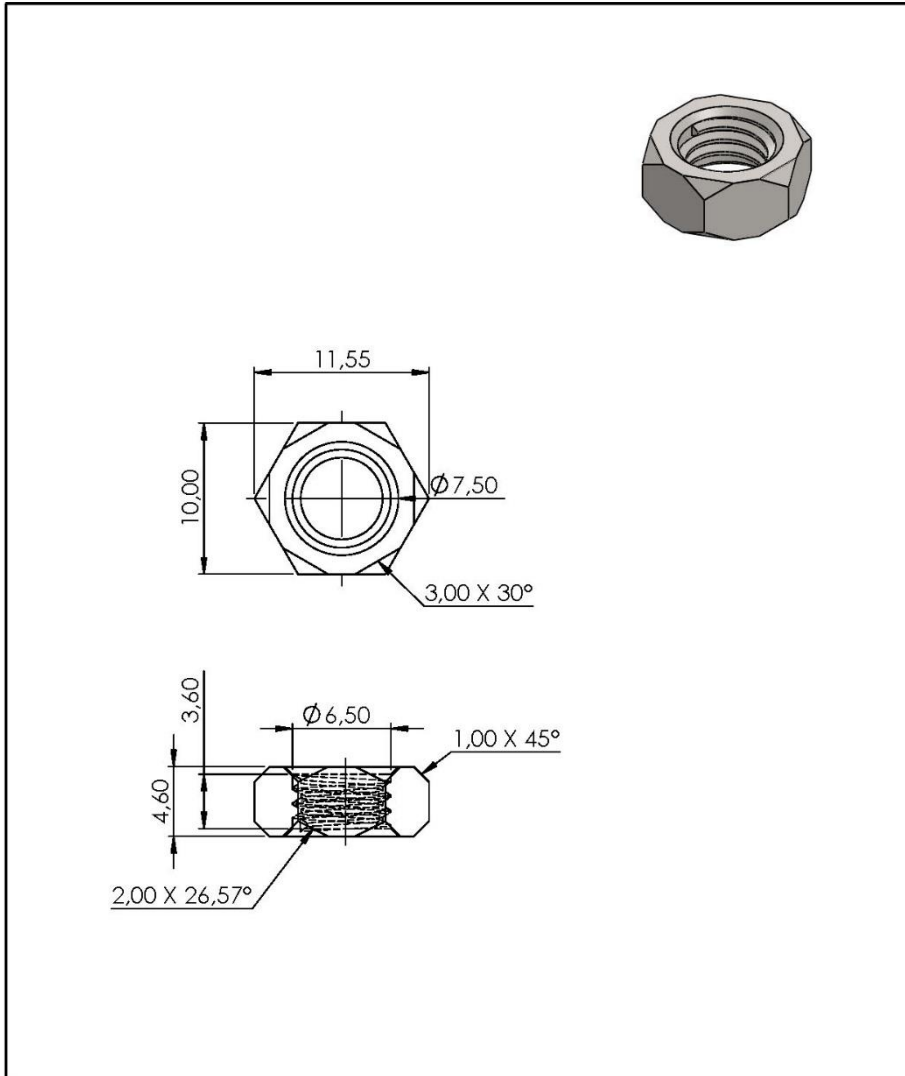
1. Dilarang
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



NEGERI
JAKARTA

dan menyebutkan sumber :

Lampiran 2 Drawing Mur M6x1



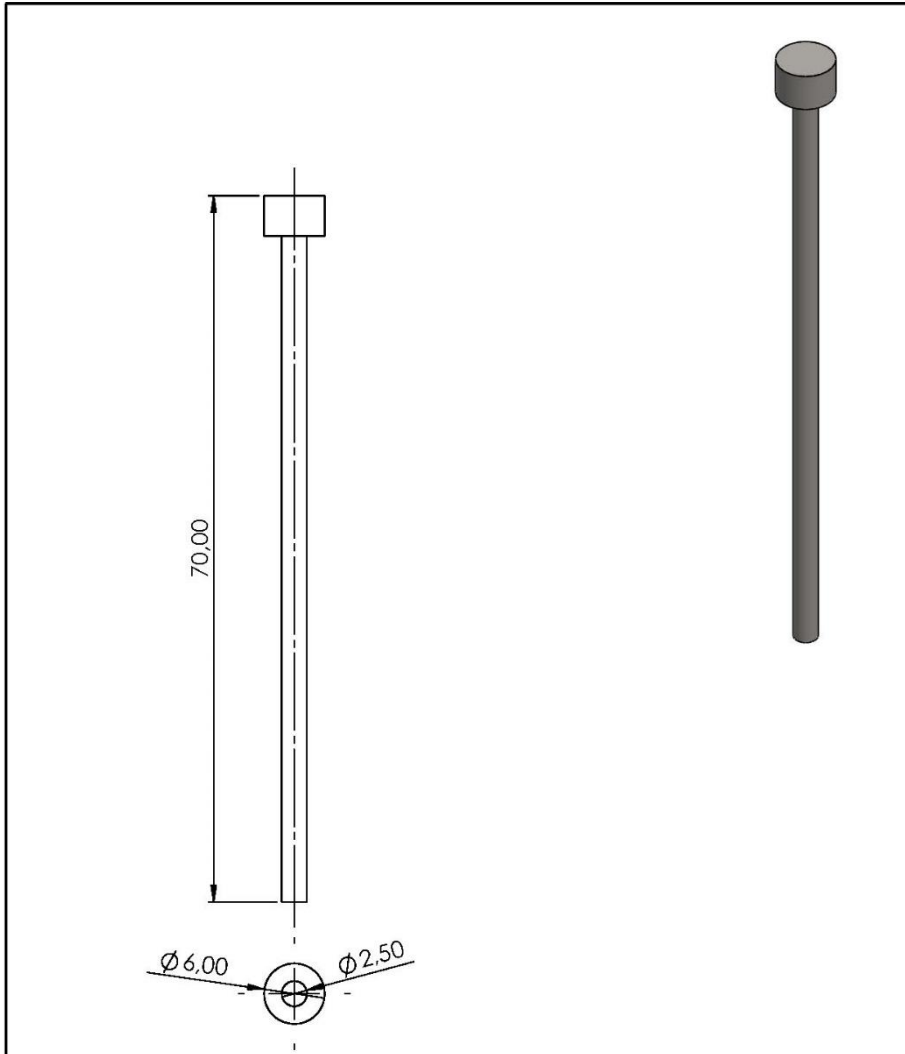
6	Mur M6x1	1	Low Carbon Steel	11,55mmx10mmx4,6mm	Dibuat
Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III	Perubahan :				
	Single Stack PEMFC				Skala
	Politeknik Negeri Jakarta			3 : 1	Digambar 080824 Diperiksa
				Sergius	
				No:11/8B	

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 3 Drawing Ejector Pin



2	Ejector Pin	10	65Mn Carbon Steel	Ø 6mmx70mm	Dibuat
Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III	Perubahan :				Sergius
II	Single Stack PEMFC				
I	Politeknik Negeri Jakarta			Skala 2 : 1	Diperiksa
				No:11/8B	

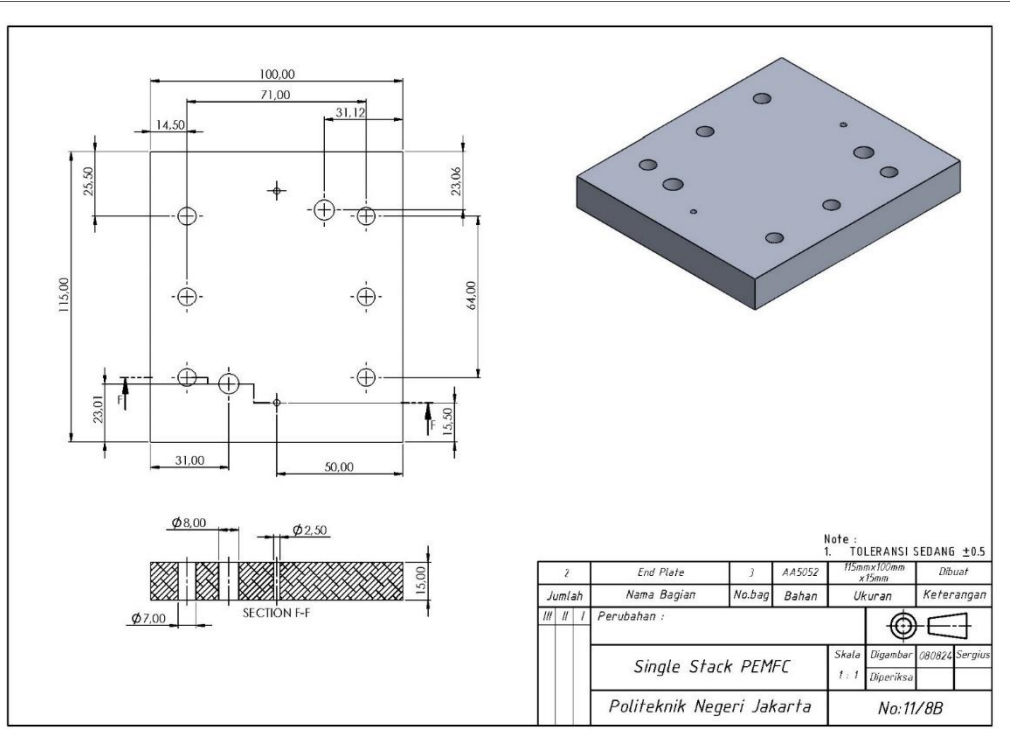
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Lampiran 4 Drawing Endplate

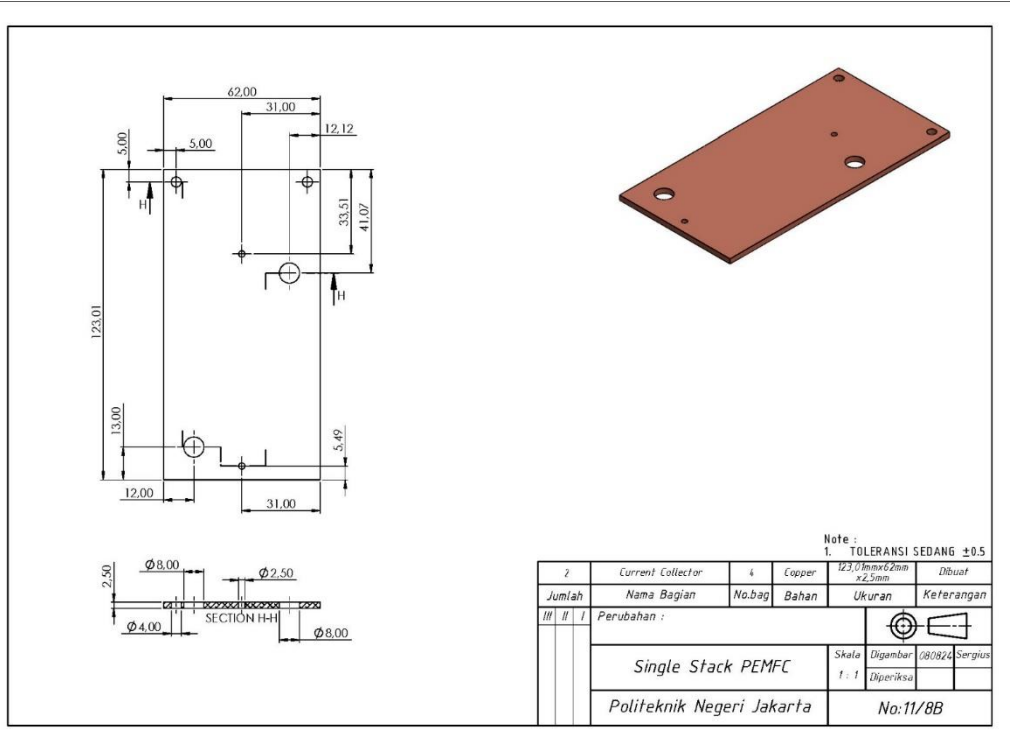


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Lampiran 5 Drawing Current Collector



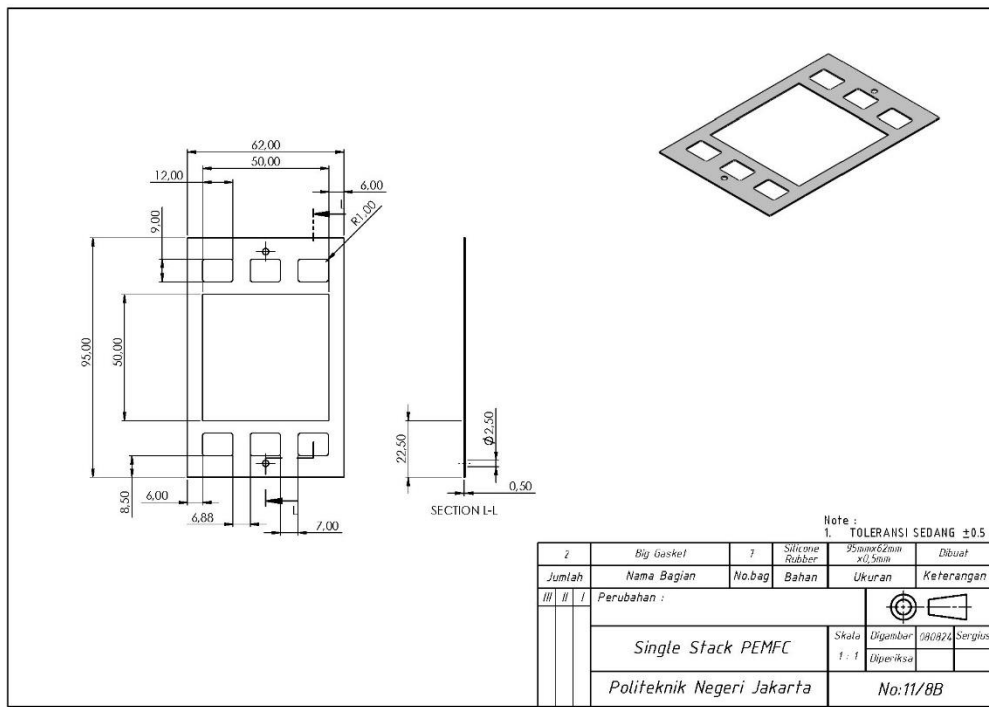
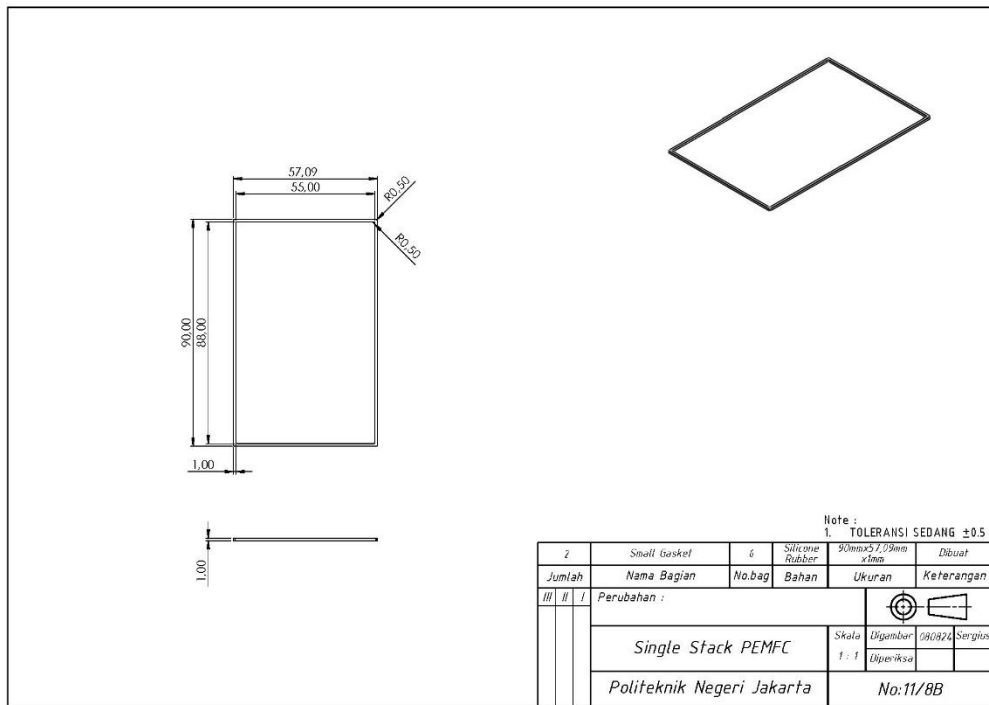
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA



lampiran 7 Drawing Gasket Besar dan Gasket Kecil

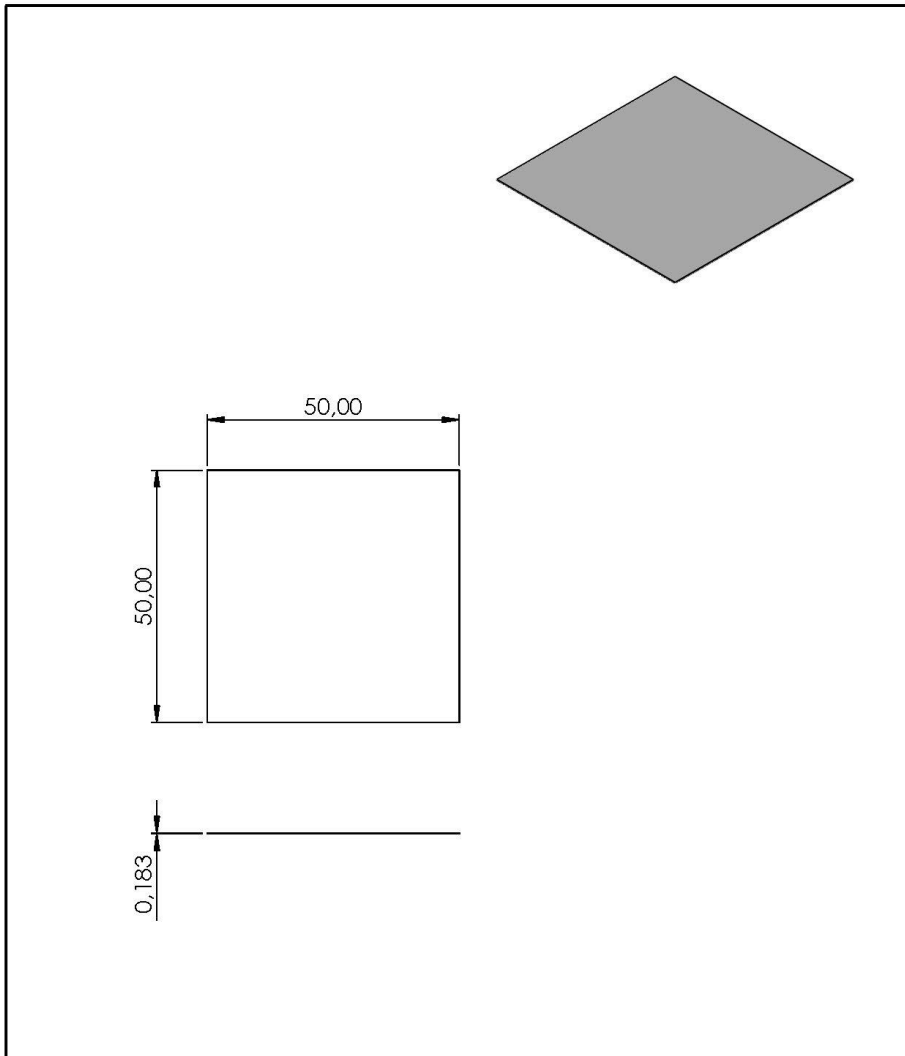


Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 8 Drawing Membrane Electrode Assembly



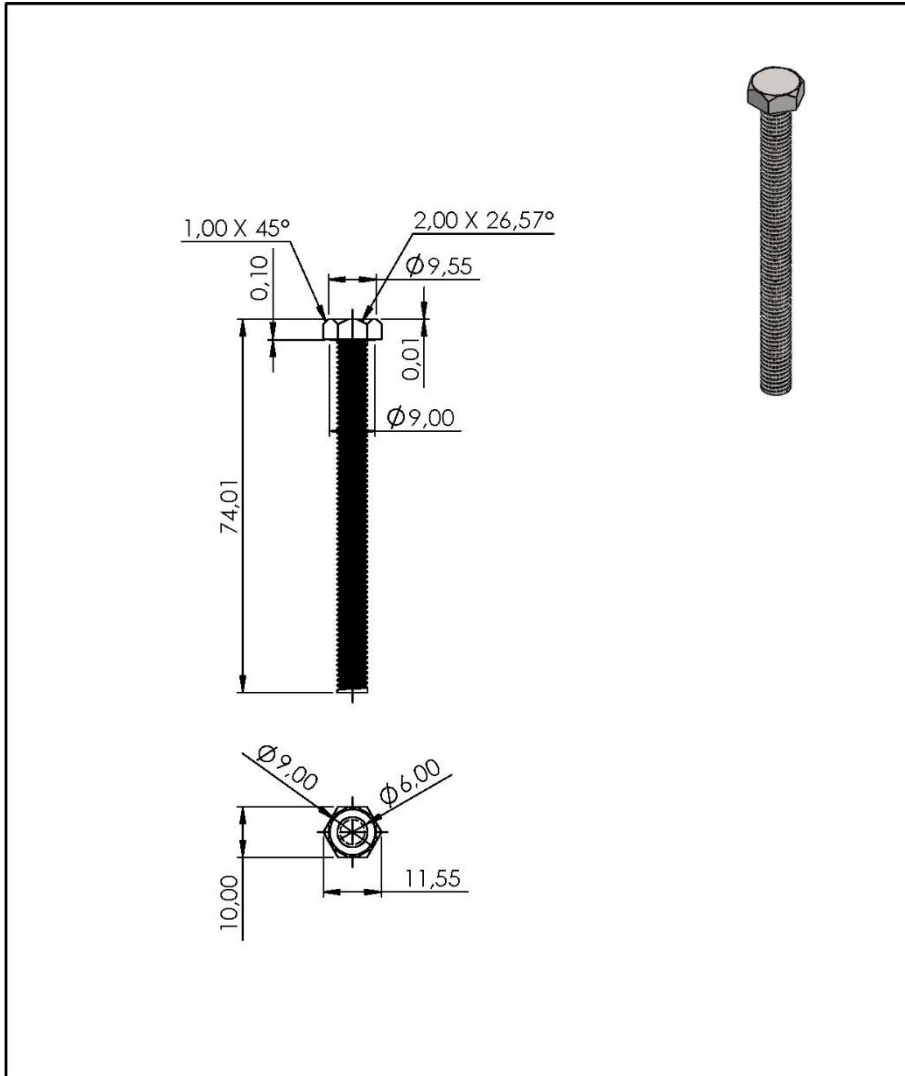
1	Membrane Electrode Assembly	8	Nafion 117	50mmx50mmx0,183mm	Dibuat
Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III	Perubahan :				
II	Single Stack PEMFC				
I	Politeknik Negeri Jakarta			Skala 1 : 1	Digambar 080824 Diperiksa
				Sergius	No:11/8B

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 9 Drawing Baut M6x1



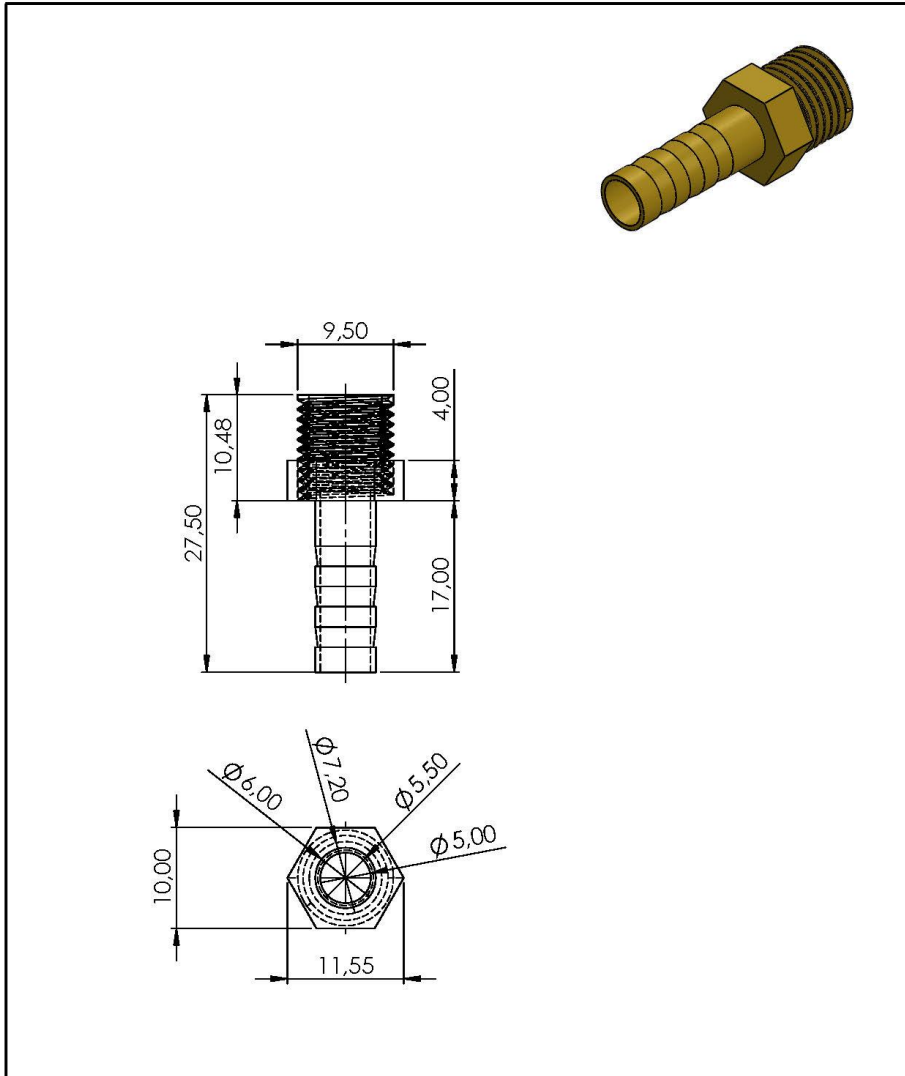
6	Baut M6x1	9	Low Carbon Steel	11,55mmx10mmx74,01mm	Dibuat
Jumlah	Nama Bagian	No. bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III	II	I	Perubahan :		
Single Stack PEMFC				Skala	Digambar 080824 Sergius
				1 : 1	Diperiksa
Politeknik Negeri Jakarta				No:11/8B	

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 10 Drawing Hose Nipple



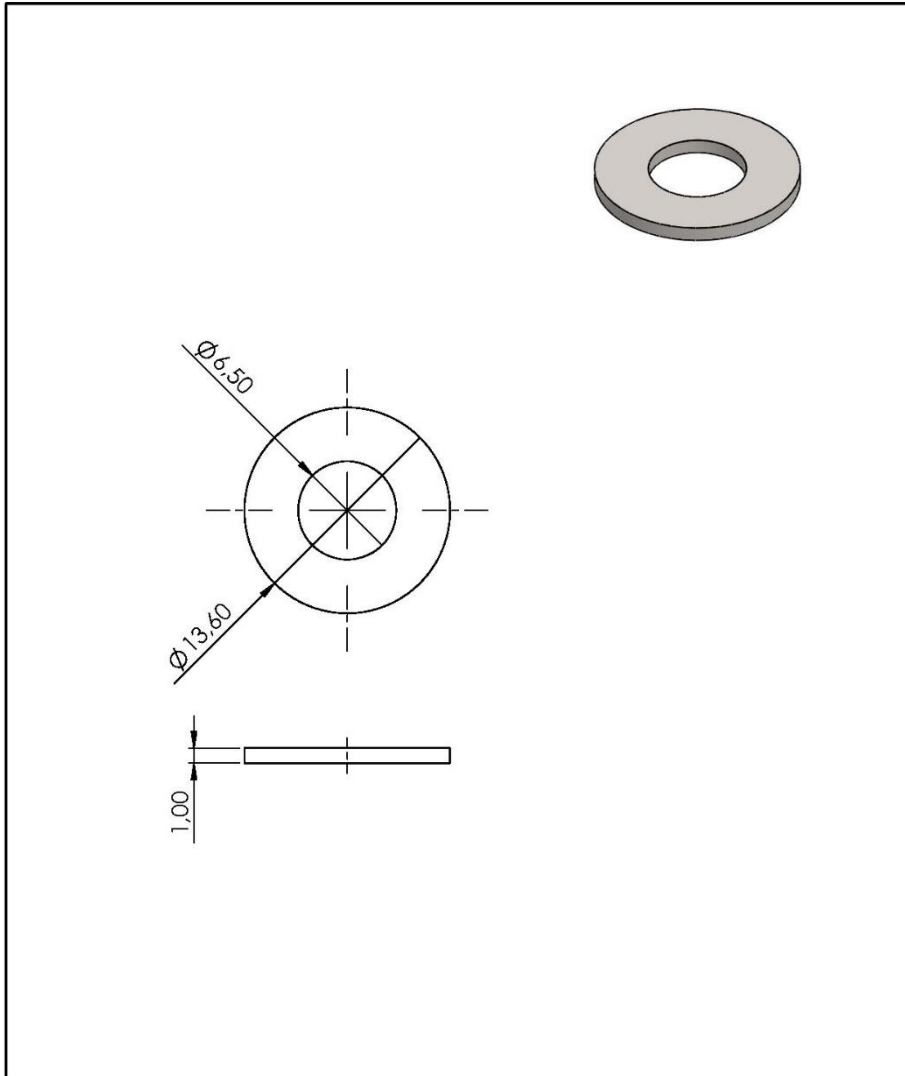
4	Hose Nipple	11	Brass	11,55mmx10mmx27,5mm	Dibuat
Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III	II	I	Perubahan :		
Single Stack PEMFC				Skala	Digambar 080824 Sergius
				2 : 1	Diperiksa
Politeknik Negeri Jakarta				No:11/8B	

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Lampiran 11 Drawing Ring



6	Ring	2	Low Carbon Steel	Ø 13,6mmx1mm	Dibuat	
Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan	
III	Perubahan :				Sergius	
	Single Stack PEMFC					Skala
	Politeknik Negeri Jakarta			3 : 1	Diperiksa	
				No:11/8B		

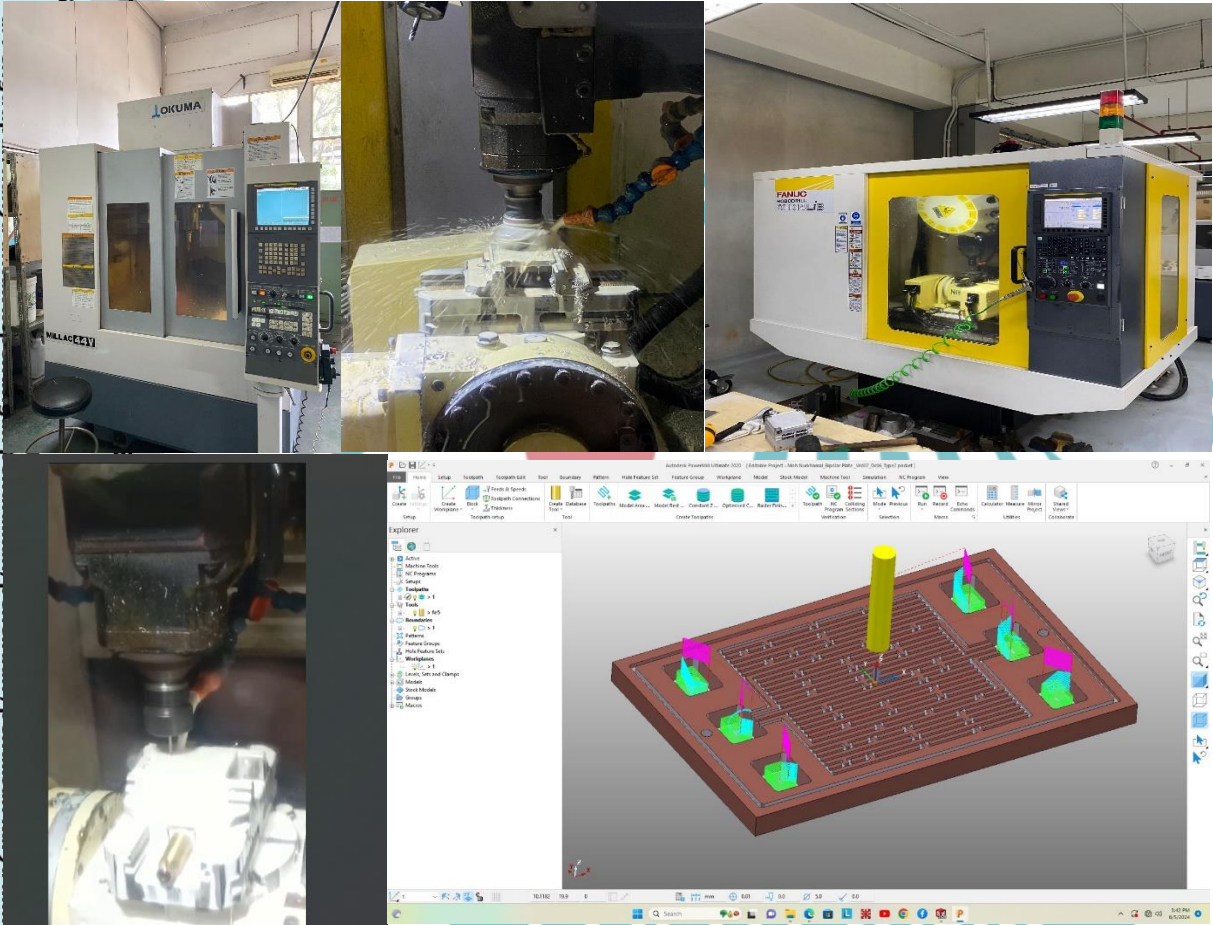
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Lampiran 12 Pembelian Bahan dan Fabrikasi Prototipe



POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

1. Hak Cipta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dan menyebutkan sumber : ah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.