



© 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS *CHANNEL WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH*
PADA DESAIN *ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB*
CHANNEL PELAT BIPOLAR PEMFC TERHADAP
PRESSURE DROP, WATER ACCUMULATION DAN *GAS*
DISTRIBUTION MENGGUNAKAN METODE CFD**

SKRIPSI
**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Oleh:

Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM. 2202411034

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2026



© 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS *CHANNEL WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH*
PADA DESAIN *ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB*
CHANNEL PELAT BIPOLAR PEMFC TERHADAP
PRESSURE DROP, WATER ACCUMULATION DAN *GAS*
DISTRIBUTION MENGGUNAKAN METODE CFD**

SKRIPSI

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

Oleh:

Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM. 2202411034

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2026



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSEMBAHAN





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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSETUJUAN
SKRIPSI

**ANALISIS *CHANNEL WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA DESAIN
ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB CHANNEL PELAT BIPOLAR
PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP*, *WATER ACCUMULATION* DAN
GAS DISTRIBUTION MENGGUNAKAN METODE CFD**

Oleh

Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM 2202411034

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Skripsi telah disetujui oleh pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2

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

Radhi Maladzi, S.T., M.T.
NIP. 199307282024061001

Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur

Radhi Maladzi, S.T., M.T.
NIP. 199307282024061001



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

**ANALISIS CHANNEL WIDTH DAN CHANNEL DEPTH PADA DESAIN
ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB CHANNEL PELAT BIPOLAR
PEMFC TERHADAP PRESSURE DROP, WATER ACCUMULATION DAN
GAS DISTRIBUTION MENGGUNAKAN METODE CFD**

Oleh:

Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM. 2202411053

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang skripsi di hadapan Dewan Penguji
pada tanggal 14 Juli 2026 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	Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T. NIP.198808272022032005	Ketua Penguji		21/7-26
2	Dr.Eng., Pribadi Mumpuni Adhi, S.Si, M.Eng. NIP. 198901312019031009	Penguji I		20/07/26
3	Ifa Saidatuningtyas, S.Si., M.T. NIP. 198808272022032005	Penguji II		20/07 2026

Depok, 21 Juli 2026

Disahkan oleh:

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si.

NIP. 197602252000121002



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PERNYATAAN ORISINILITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM : 2202411034

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-bearnya.

Depok, 29 Juni 2026



Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM. 2202411034

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ANALISIS *CHANNEL WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA DESAIN *ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB CHANNEL* PELAT BIPOLAR PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP*, *WATER ACCUMULATION* DAN *GAS DISTRIBUTION* MENGGUNAKAN METODE CFD

Rey Akashi Prawiraka Muhammad¹⁾, Vika Rizkia¹⁾, Radhi Maladzi¹⁾

¹⁾Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI, Depok 16425

Email: rey.akashi.prawiraka.muhammad.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRACT

Flow field pada pelat bipolar berperan penting dalam mengatur distribusi reaktan, pembuangan air, dan karakteristik aliran yang memengaruhi kinerja *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Penelitian ini bertujuan memperoleh desain *flow field biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* yang optimal berdasarkan variasi *channel width* dan *channel depth*, serta mengevaluasi kelayakan desain untuk difabrikasi menggunakan CNC 3-Axis milling. Penelitian dilakukan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada ANSYS Fluent dengan pendekatan *Design of Experiments* (DOE), sedangkan *Analysis of Variance* (ANOVA) digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri terhadap *pressure drop*. Desain terbaik selanjutnya dievaluasi menggunakan PEMFC Module melalui kurva polarisasi pada rentang tegangan 0,6–0,8 V dan direalisasikan dalam bentuk prototipe *single stack*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *channel width* dan *channel depth* menurunkan *pressure drop*, dengan nilai terendah sebesar 528,72 Pa pada variasi P9. Distribusi uap air dan gas tetap relatif stabil pada seluruh variasi. Berdasarkan evaluasi ketiga parameter, variasi P6 (*channel width* 1,0 mm dan *channel depth* 1,0 mm) dipilih sebagai desain terbaik karena memberikan keseimbangan antara *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa desain P6 memiliki karakteristik aliran, performa listrik, dan kemudahan fabrikasi yang baik sehingga berpotensi diterapkan sebagai alternatif pelat bipolar PEMFC.

Kata kunci: *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *flow field biomimetic*, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), optimasi desain, pelat bipolar.



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ANALISIS *CHANNEL WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA DESAIN *ENHANCED BIONIC THORACIC-RIB CHANNEL* PELAT BIPOLAR PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP*, *WATER ACCUMULATION* DAN *GAS DISTRIBUTION* MENGGUNAKAN METODE CFD

Rey Akashi Prawiraka Muhammad¹⁾, Vika Rizkia¹⁾, Radhi Maladzi¹⁾

¹⁾Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI, Depok 16425

Email: rey.akashi.prawiraka.muhammad.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRACT

The flow field of a bipolar plate plays a crucial role in regulating reactant distribution, water removal, and flow characteristics, all of which significantly affect the performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). This study aims to obtain the optimal biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel flow field design by varying the channel width and channel depth, as well as to evaluate its manufacturability using 3-axis CNC milling. The study employed Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations in ANSYS Fluent based on the Design of Experiments (DOE) approach, while Analysis of Variance (ANOVA) was applied to evaluate the effect of geometric variations on the pressure drop. The optimum design was subsequently evaluated using the PEMFC Module through polarization curves within an operating voltage range of 0.6–0.8 V and then fabricated into a single-cell prototype. The results indicate that increasing the channel width and channel depth reduced the pressure drop, with the lowest value of 528.72 Pa obtained by design P9. Meanwhile, water vapor and gas distributions remained relatively stable across all design variations. Based on the evaluation of the three performance parameters, design P6 (channel width of 1.0 mm and channel depth of 0.8 mm) was selected as the optimum configuration because it provided the best balance among pressure drop, water accumulation, and gas distribution. Furthermore, the evaluation demonstrated that the P6 design exhibited favorable flow characteristics, electrical performance, and manufacturability, indicating its potential as an alternative bipolar plate flow field design for PEMFC applications.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), biomimetic flow field, Computational Fluid Dynamics (CFD), design optimization, bipolar plate.



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis *Channel Width* dan *Channel Depth* pada Desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* Pelat Bipolar PEMFC terhadap *Pressure Drop*, *Water Accumulation*, dan *Gas Distribution* Menggunakan Metode CFD” dengan baik dan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Teknik Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta.
2. Radhi Maladzi, S.T., M.T., selaku Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur Politeknik Negeri Jakarta, atas masukan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T. dan Radhi Maladzi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang dengan penuh dedikasi telah memberikan bimbingan, arahan, serta ilmu yang sangat berarti bagi penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas waktu, kesabaran, dan perhatian yang telah diberikan hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, yang telah memberikan ilmu, pengalaman, bimbingan, bantuan, serta dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan di Politeknik Negeri Jakarta hingga proses penyusunan skripsi ini.

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

5. Kedua orang tua tercinta yang dengan tulus memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang yang menjadi kekuatan utama bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Hanandira Wistikhirana, selaku rekan skripsi penulis yang telah menjadi partner seperjuangan dalam satu proyek penelitian, yang senantiasa memberikan kerja sama, dukungan, serta kontribusi yang berarti dalam proses perancangan hingga penyelesaian skripsi ini. Terima kasih atas kebersamaan, diskusi, serta semangat yang saling menguatkan selama proses penelitian hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Sahabat seperjuangan Emery, Bagus, Bintang, Adfa, Rafiel, Intan dan Bayu yang telah kebersamai penulis sejak awal perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini selesai, serta selalu menjadi teman dalam berbagi cerita, pengalaman, dan kebersamaan selama menjalani perkuliahan.
8. Sahabat peneliti Riza, Naufal, Arnika, Gilang, Diki, Agung, dan Qeis yang selalu hadir memberikan dukungan, semangat, serta menjadi bagian penting dalam perjalanan penulis, baik dalam suka maupun duka, sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini.
9. Sahabat penulis Nabila dan Elsa yang telah memberikan dukungan, perhatian, serta menjadi tempat berbagi dalam berbagai aspek kehidupan, yang secara tidak langsung menjadi kekuatan bagi penulis untuk tetap melangkah hingga penelitian ini dapat terselesaikan.
10. Khafidz, Fio, dan Adfa, selaku teman penulis yang telah memberikan bantuan, baik dalam bentuk tenaga, maupun saran selama proses fabrikasi alat, sehingga sangat membantu kelancaran penyelesaian penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan.
11. Teman-teman Manufaktur, terutama Kelas S, sebagai teman selama masa perkuliahan yang telah memberikan bantuan, semangat, dan dukungan satu sama lain sejak awal perkuliahan hingga proses penyusunan skripsi ini.
12. Untuk diri penulis sendiri, Rey Akashi Prawiraka Muhammad, yang telah berusaha, bertahan, dan terus melangkah di tengah berbagai tantangan dan



© 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dinamika kehidupan selama masa perkuliahan, hingga akhirnya mampu menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi penulisan maupun isi. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat serta kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang desain dan analisis *flow field* pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC).

Depok, 29 Juni 2026

Rey Akashi Prawiraka Muhammad

NIM. 2202411034

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN ORISINILITAS	vi
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Pertanyaan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penulisan Laporan Tugas Akhir	5
1.5.1 Manfaat Bagi Peneliti	5
1.5.2 Manfaat Bagi Akademik	5
1.6 Batasan Masalah	5
1.7 Sistematika Penulisan Laporan Tugas Akhir	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Landasan Teori	8
2.1.1 <i>Fuel Cell</i>	8
2.1.2 <i>PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)</i>	9
2.1.3 Prinsip Kerja PEMFC	10
2.1.4 Komponen Utama PEMFC	11
2.1.5 <i>Desain Flow Field Biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel</i>	15
2.1.6 Material Pelat Bipolar	16
2.1.7 <i>Computer-Aided Design, Manufacturing, and Engineering (CAD/CAM/CAE)</i>	18
2.1.8 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	19
2.1.9 <i>Governing Equation</i>	20
2.1.10 <i>Darcy-Weisbach</i>	23
2.1.11 <i>Mass Fraction</i>	25
2.1.12 <i>Potential Water Accumulation</i>	26
2.1.13 <i>Uniformity Index</i>	27
2.1.14 Performa PEMFC	27
2.1.15 <i>Design of Experiment (DOE)</i>	28
2.1.16 <i>Desain Faktorial 3x3</i>	29
2.1.17 <i>Analysis of Variance (ANOVA)</i>	30
2.1.18 Proses Manufaktur Pelat Bipolar	31
2.1.19 <i>Computer Numerical Control 3-Axis Milling</i>	31
2.2 Kajian Literatur	33



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 mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.3 Kerangka Pemikiran dan Pengembangan Hipotesis.....	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	43
3.1 Jenis Penelitian	43
3.2 Objek Penelitian	43
3.3 Metode Pengambilan Sampel	43
3.4 Tahapan Penelitian.....	44
3.5 Jenis dan Sumber Data Penelitian	60
3.6 Metode Pengumpulan Data Penelitian	60
3.7 Metode Analisis Data	60
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	62
4.1 Hasil Desain Geometri <i>Flow Field</i>	62
4.2 Hasil Variasi Desain <i>Flow Field</i>	62
4.3 Hasil Perhitungan <i>Reynolds Number</i>	67
4.4 Hasil Simulasi CFD.....	70
4.4.1 Analisis Hasil <i>Pressure Drop</i>	70
4.4.2 Analisis Hasil <i>Water Accumulation</i>	74
4.4.3 Analisis Hasil <i>Gas Distribution</i>	78
4.5 Penentuan Desain <i>Flow Field</i> Terbaik.....	83
4.6 Hasil <i>Analysis of Variance (ANOVA)</i>	84
4.6.1 Analisis Hasil ANOVA <i>Pressure Drop</i>	85
4.7 Evaluasi Performa Desain Terbaik Menggunakan PEMFC Module.....	86
4.8 Hasil Fabrikasi Prototipe	89
4.8.1 Verifikasi Dimensi Hasil Fabrikasi.....	89
4.8.2 Hasil <i>Assembly Single Stack</i> PEMFC	94
BAB V PENUTUP.....	96
5.1 Kesimpulan.....	96
5.2 Saran	97
DAFTAR PUSTAKA	98
LAMPIRAN.....	103

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perbandingan Jenis <i>Fuel Cell</i> [18].	9
Gambar 2. 2 PEMFC <i>Stacks</i> [21].	10
Gambar 2. 3 Prinsip Kerja PEMFC [23].	11
Gambar 2. 4 Komponen PEMFC [24].	12
Gambar 2. 5 Desain <i>Flow Field Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel</i> [11]. ...	16
Gambar 2. 6 <i>Three-axis machine tool</i> [62].	33
Gambar 2. 7 Desain <i>Hybrid bipolar plate</i> [68].	38
Gambar 2. 8 Desain <i>Bipolar Plate with Variable Cross-Sectional Areas</i> [69].	39
Gambar 2. 9 Desain Pelat Bipolar Pada <i>Redox Flow Battery</i> [70].	40
Gambar 2. 10 Kerangka Berpikir	41
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian	44
Gambar 3. 2 Proses <i>Meshing</i> pada <i>Ansys Fluent</i>	49
Gambar 3. 3 Hasil <i>Meshing</i> Model PEMFC <i>Single Stack</i>	54
Gambar 3. 4 Proses <i>Machining Facing</i> Menggunakan Mesin Frais	57
Gambar 3. 5 Proses <i>Drilling</i> dan <i>Tapping</i> Menggunakan Mesin Bor Koordinat dan <i>Hand Tap</i>	58
Gambar 3. 6 Proses <i>CNC Milling</i> Geometri <i>Flow Field</i>	58
Gambar 3. 7 Proses <i>Cutting</i> pada <i>silicone</i> Gasket	59
Gambar 4. 1 Desain <i>Flow Field Enhanced Bionic Thoracic Rib Channel</i>	62
Gambar 4. 2 Ilustrasi <i>Channel Width</i> dan <i>Depth</i> pada geometri <i>flow field</i>	63
Gambar 4. 3 Desain <i>Flow Field</i> Terbaik (P6)	84
Gambar 4. 4 <i>Main Effect Plot</i> dan <i>Interraction Plot</i> Parameter <i>Pressure Drop</i> ...	86
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan <i>Voltase</i> dan <i>Current Density</i>	88
Gambar 4. 8 Hasil Fabrikasi <i>Assembly Single Stack</i> PEMFC	94



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

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Mechanical properties</i> AA5052 [35].	18
Tabel 2. 2 Desain Faktorial 3x3	30
Tabel 2.3 Kajian Literatur	33
Tabel 3. 1 Kombinasi Dua Faktor dengan Tiga Level	46
Tabel 3. 2 Parameter Operasi	47
Tabel 3. 3 <i>Boundary Condition</i> PEMFC Module.....	54
Tabel 4. 1 Variasi Desain <i>Thoracic-Rib Flow Field</i> Berdasarkan Parameter.....	63
Tabel 4. 2 Variasi Desain <i>Flow Field</i>	67
Tabel 4. 3 Hasil Simulasi CFD <i>Pressure Drop</i>	70
Tabel 4. 4 Hasil Simulasi CFD <i>Water Accumulation</i>	74
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi CFD <i>Gas Distribution</i> (O ₂)	78
Tabel 4. 6 <i>Factor Information Channel Width dan Depth</i> pada ANOVA	85
Tabel 4. 7 Hasil <i>Analysis of Variance</i> Parameter <i>Pressure Drop</i>	85
Tabel 4. 8 Hasil <i>Model Summary</i> Parameter <i>Pressure Drop</i>	85
Tabel 4. 13 Data Performa Hasil Simulasi PEMFC Module.....	87
Tabel 4. 14 Verifikasi Dimensi Hasil Fabrikasi terhadap Dimensi Desain	89



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Mesin <i>CNC 3-Axis Milling</i>	103
Lampiran 2. Dokumentasi Proses Pemesinan PEMFC	103
Lampiran 3. Hasil Analisis ANOVA Parameter <i>Water Accumulation</i> dan <i>Gas Distribution</i>	104
Lampiran 4. <i>Drawing Single Stack PEMFC</i>	105
Lampiran 5. <i>Drawing Big Gasket</i>	106
Lampiran 6. <i>Drawing Bipolar Plate</i>	107
Lampiran 7. <i>Drawing End Plate</i>	108
Lampiran 8 <i>Drawing Current Collector</i>	109
Lampiran 9 <i>Drawing Small Gasket</i>	110

**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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi dunia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, industrialisasi, dan perkembangan teknologi. Namun, hingga saat ini sekitar 81,47% konsumsi energi primer dunia masih bergantung pada bahan bakar fosil yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim [1]. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi konversi energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, salah satunya *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC merupakan teknologi yang banyak dikembangkan karena memiliki efisiensi tinggi, waktu respons cepat, serta menghasilkan emisi yang sangat rendah [2]. PEMFC bekerja dengan mengonversi energi kimia hidrogen menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia, sehingga ketersediaan reaktan dan pengelolaan produk hasil reaksi menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan dan performa sel [3]. Oleh karena itu, pengembangan dan optimasi komponen utama PEMFC menjadi langkah krusial untuk meningkatkan kinerja dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Salah satu komponen penting pada PEMFC adalah pelat bipolar yang berfungsi sebagai saluran distribusi reaktan (*flow field*), pengumpul arus listrik, media manajemen panas, serta pembuangan air hasil reaksi [4]. Selain fungsinya tersebut, pelat bipolar juga menyumbang proporsi biaya yang sangat besar dalam pembuatan PEMFC, karena material konduktif dengan sifat ketahanan korosi yang tinggi dan proses manufakturnya yang kompleks membuat pelat bipolar menjadi komponen yang paling mahal dibandingkan bagian lainnya dalam *stack* [5]-[6]. Oleh karena itu, pengembangan desain *flow field* menjadi salah satu fokus utama dalam peningkatan performa dan efisiensi biaya PEMFC.

Seiring meningkatnya tuntutan terhadap pemerataan distribusi gas dan manajemen air, desain *flow field* berkembang menjadi semakin kompleks dengan banyak percabangan dan belokan. Kompleksitas ini dapat meningkatkan *pressure*



© 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

drop, memicu *flooding*, serta menyebabkan distribusi gas menjadi kurang merata [7]. Oleh karena itu, optimasi *flow field* perlu diarahkan untuk memperoleh keseimbangan antara *pressure drop* yang rendah, distribusi gas yang merata, dan pembuangan air yang efektif.

Salah satu desain *flow field* konvensional yang telah banyak diterapkan adalah desain *serpentine*. Jalur alirannya yang panjang dan berliku mampu meningkatkan distribusi reaktan serta mengurangi area stagnan, namun juga meningkatkan *pressure drop* dan berpotensi menyebabkan penumpukan air pada area tikungan [8]. Kondisi tersebut dapat menghambat distribusi reaktan dan menurunkan performa PEMFC.

Keterbatasan ini menunjukkan adanya *trade-off* antara *pressure drop*, distribusi gas, dan pengelolaan air. Upaya menurunkan *pressure drop* sering diikuti menurunnya kemampuan pembuangan air, sedangkan peningkatan pembuangan air justru meningkatkan hambatan aliran [9]. Oleh karena itu, dikembangkan desain alternatif berbasis *biomimetic* yang meniru pola distribusi fluida pada sistem biologis agar aliran lebih merata dengan kehilangan energi yang lebih kecil [10].

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa *flow field biomimetic* mampu meningkatkan pemerataan distribusi reaktan dan pengelolaan air dibandingkan desain konvensional. Salah satu contohnya adalah *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*, yang menghasilkan distribusi air lebih merata sehingga kecenderungan *flooding* berkurang dengan *pressure drop* yang tetap seimbang [11]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan *biomimetic* berpotensi menjadi alternatif desain *flow field* PEMFC.

Namun demikian, desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* masih menunjukkan adanya akumulasi air pada area *outlet* dan cabang terakhir di dekat *outlet*, sehingga berpotensi menyebabkan *flooding* lokal. Hingga saat ini, belum ditemukan penelitian yang secara khusus mengoptimasi geometri desain tersebut untuk mengatasi permasalahan tersebut. Oleh karena itu, pengembangan geometri lebih lanjut diperlukan guna meningkatkan efektivitas pembuangan air tanpa mengorbankan keseimbangan *pressure drop* dan 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sebagai upaya mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengoptimasi *channel width* dan *channel depth*. Kedua parameter tersebut dipilih karena secara langsung memengaruhi *pressure drop*, distribusi gas, dan pengelolaan air [12]. Optimasi kedua parameter diharapkan mampu mengurangi akumulasi air pada desain sebelumnya sekaligus meningkatkan performa hidrodinamika *flow field*.

Selain aspek performa aliran, penelitian ini juga mempertimbangkan keterbatasan proses manufaktur. Proses fabrikasi yang digunakan adalah CNC 3-Axis Milling, sehingga geometri *biomimetic* yang dirancang harus *feasible* untuk diproduksi menggunakan proses tersebut. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi secara teoritis, tetapi juga dapat direalisasikan secara nyata melalui proses manufaktur yang *feasible*.

Penelitian ini menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mengevaluasi *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution* [13]. Desain terbaik dipilih berdasarkan *pressure drop* yang rendah, *water accumulation* yang minimum, serta nilai *uniformity index* distribusi gas yang tinggi [14]. Analisis dilakukan menggunakan *Design of Experiment* (DOE) faktorial untuk menyusun variasi desain serta *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk menentukan pengaruh masing-masing parameter dan interaksinya terhadap variabel respons [15]-[16]. Pendekatan ini memungkinkan optimasi desain dilakukan secara sistematis dan berbasis data.

Melalui penelitian ini diharapkan diperoleh desain *flow field biomimetic* yang mampu menghasilkan *pressure drop* rendah, distribusi gas yang merata, serta manajemen air yang lebih baik. Selain itu, desain yang dikembangkan juga diharapkan tetap mempertimbangkan aspek kemudahan manufaktur menggunakan proses CNC 3-Axis Milling. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain pelat bipolar PEMFC serta menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya.



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, masalah utama dalam penelitian ini terletak pada belum diketahuinya pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* pada desain *biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* terhadap karakteristik aliran di dalam *flow field* pelat bipolar PEMFC. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh variasi geometri terhadap *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution* menggunakan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), sehingga dapat diperoleh gambaran performa *flow field* yang lebih optimal.

1.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini dirumuskan ke dalam beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *pressure drop* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*?
2. Bagaimana pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *water accumulation* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*?
3. Bagaimana pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *gas distribution* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah dan pertanyaan penelitian yang telah disusun, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *pressure drop* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* pelat bipolar PEMFC menggunakan simulasi CFD.
2. Menganalisis pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *water accumulation* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* pelat bipolar PEMFC menggunakan simulasi 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Menganalisis pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *gas distribution* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* pelat bipolar PEMFC menggunakan simulasi CFD.

1.5 Manfaat Penulisan Laporan Tugas Akhir

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1.5.1 Manfaat Bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan wawasan kepada peneliti mengenai pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* pada desain biomimetic *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* terhadap *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution* pada pelat bipolar PEMFC melalui simulasi CFD. Selain itu, penelitian ini memberikan pengalaman dalam merancang, menganalisis, dan mengevaluasi desain pelat bipolar yang *feasible* untuk diproduksi menggunakan proses CNC 3-Axis Milling.

1.5.2 Manfaat Bagi Akademik

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan kajian ilmiah mengenai optimasi desain *flow field biomimetic* pada pelat bipolar PEMFC, khususnya terkait pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* terhadap *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi serta dasar pengembangan penelitian selanjutnya di bidang PEMFC.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada analisis desain *flow field biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* pada pelat bipolar *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC).
2. Variasi parameter geometri dalam penelitian ini dibatasi pada *channel width* (0.8mm, 1 mm, dan 1.2 mm) dan *channel depth* (0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm) sedangkan parameter geometri lainnya dijaga konstan.



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Analisis pada sembilan variasi desain hanya difokuskan pada karakteristik aliran fluida dan transport spesies di *flow field* katoda PEMFC untuk mengevaluasi *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution*, tanpa mempertimbangkan fenomena elektrokimia secara rinci.
4. Penelitian ini tidak membahas perhitungan maupun penentuan parameter proses manufaktur, seperti *feed rate*, *spindle speed*, *cutting speed*, *depth of cut*, dan parameter pemesinan lainnya karena berada di luar ruang lingkup penelitian.
5. Deformasi struktural pelat bipolar akibat tekanan mekanik tidak diperhitungkan dalam simulasi.

1.7 Sistematika Penulisan Laporan Tugas Akhir

Sistematika penulisan penelitian ini disusun menjadi lima bab yang saling berkaitan, dengan uraian sebagai berikut:

1) BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian mengenai pengembangan desain *biomimetic flow field* pada pelat bipolar *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), rumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir.

2) BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi kajian literatur dan landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep dasar *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), pelat bipolar, karakteristik dan fungsi *flow field*, fenomena aliran di dalam *channel* seperti *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution*, serta konsep desain *biomimetic* yang menjadi dasar pengembangan desain *flow field* pada penelitian ini.

3) BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi tahapan perancangan desain *biomimetic Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*, penentuan parameter penelitian, penerapan *Design of Experiment* (DOE), simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS Fluent, analisis



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

statistik menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA), serta proses fabrikasi prototipe dan validasi dimensi hasil manufaktur.

4) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dari variasi *channel width* dan *channel depth* yang dianalisis berdasarkan parameter *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik aliran pada pelat bipolar PEMFC. Selanjutnya disajikan hasil analisis statistik menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA), penentuan desain *flow field* terbaik, evaluasi performa menggunakan PEMFC *Module*, serta hasil fabrikasi dan validasi dimensi prototipe terhadap desain yang telah dirancang.

5) BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

**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 mengumunkan 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 mengenai analisis pengaruh *channel width* dan *channel depth* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* pelat bipolar PEMFC menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan *Analysis of Variance* (ANOVA), diperoleh kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian sebagai berikut.

1. Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh variasi *channel width* dan *channel depth* pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* terhadap karakteristik *pressure drop* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan dimensi saluran menurunkan hambatan aliran sehingga menghasilkan *pressure drop* yang lebih rendah, dengan variasi P9 menghasilkan nilai *pressure drop* terendah sebesar 528,72 Pa. Analisis ANOVA mengonfirmasi bahwa *channel width*, *channel depth*, serta interaksi keduanya berpengaruh signifikan terhadap parameter tersebut.
2. Penelitian ini berhasil mengevaluasi karakteristik *water accumulation* pada *flow field* pelat bipolar PEMFC melalui distribusi *Area Weighted Average H₂O Mass Fraction*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh variasi desain menghasilkan distribusi uap air yang relatif stabil dengan rentang nilai 0,126282–0,126824. Temuan ini menunjukkan bahwa variasi *channel width* dan *channel depth* pada rentang geometri yang digunakan belum memberikan perubahan yang berarti terhadap distribusi uap air di dalam *flow field*.
3. Penelitian ini berhasil menganalisis keseragaman distribusi gas pada desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel*. Seluruh variasi menghasilkan nilai *Uniformity Index* yang tinggi, yaitu 0,996290–0,999662, sehingga distribusi oksigen pada area aktif tetap terjaga secara merata. Hasil tersebut



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menunjukkan bahwa variasi geometri yang diterapkan masih mampu mempertahankan distribusi reaktan yang baik pada *flow field* PEMFC.

4. Berdasarkan evaluasi terhadap ketiga parameter, penelitian ini berhasil memperoleh desain *Enhanced Bionic Thoracic-Rib Channel* terbaik pada variasi P6 dengan *channel width* 1,0 mm dan *channel depth* 1,0 mm. Desain ini dipilih karena memberikan keseimbangan terbaik antara *pressure drop*, *water accumulation*, dan *gas distribution*, sehingga berpotensi menghasilkan karakteristik aliran yang lebih optimal untuk mendukung performa pelat bipolar PEMFC.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Disarankan menambahkan variasi parameter geometri lain di luar *channel width* dan *channel depth*, seperti jumlah percabangan *flow field*, sehingga pengaruh desain terhadap karakteristik aliran dapat dianalisis lebih komprehensif.
2. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan model PEMFC yang mempertimbangkan fenomena elektrokimia secara lebih lengkap, seperti distribusi *current density*, *cell voltage*, distribusi temperatur, kurva polarisasi, serta pembentukan air hasil reaksi secara langsung. Dengan demikian, hubungan antara karakteristik aliran dan performa elektrokimia PEMFC dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.
3. Disarankan dilakukan pengujian eksperimental terhadap prototipe *single cell* PEMFC yang telah difabrikasi untuk memvalidasi hasil simulasi CFD, khususnya pada parameter *pressure drop*, distribusi reaktan, serta karakteristik manajemen air selama proses operasi.

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Foqha, S. S. Refaat, A. Mohammed, and M. Farrag, "Renewable energy sources : Progress , challenges , and environmental benefits," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 240, no. June, p. 117167, 2026, doi: 10.1016/j.rser.2026.117167.
- [2] Z. Wang, K. Hu, J. Zhang, H. Ding, and D. Xin, "Gas-liquid mass transfer characteristics of a novel three-dimensional flow field bipolar plate for laser additive manufacturing of proton exchange membrane fuel cell," *Renew. Energy*, vol. 212, no. October 2022, pp. 308–319, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.015.
- [3] S. Zhang, S. Liu, H. Xu, G. Liu, and K. Wang, "Performance of proton exchange membrane fuel cells with honeycomb-like flow channel design," *Energy*, vol. 239, p. 122102, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122102.
- [4] S. T. Bunyan, H. A. Dhahad, and D. S. Khudhur, "The Effect of Flow Field Design Parameters on the Performance of PEMFC : A Review," 2023.
- [5] P. Huang *et al.*, "International Journal of Heat and Mass Transfer Stainless steel bipolar plate fuel cell with different flow field structures prepared by laser additive manufacturing," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 183, p. 122186, 2022, doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2021.122186.
- [6] S. Shimpalee *et al.*, "Investigation of bipolar plate materials for proton exchange membrane fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 1, no. 803, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.163.
- [7] R. Ding, Y. Shang, Y. Song, and W. Gu, "Experimental and numerical analysis of honeycomb-shaped flow field for enhanced mass transport and performance in PEM fuel cells," *Energy*, vol. 338, no. October, p. 138808, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.138808.
- [8] L. Rostami, P. Mohamad, G. Nejad, and A. Vatani, "A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells," *Energy*, vol. 97, pp. 400–410, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.132.
- [9] Y. Wang, S. Wang, G. Wang, and L. Yue, "ScienceDirect Numerical study of a new cathode flow-field design with a sub-channel for a parallel flow-field polymer electrolyte membrane fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.172.
- [10] S. R. Badduri, G. N. Srinivasulu, and S. S. Rao, "Influence of Lung Channel Design Bipolar Plate on Performance of PEMFC Using Computational Fluid Dynamic Analysis," vol. 969, pp. 530–535, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.969.530.
- [11] J. Lv, W. Ge, W. Sun, H. Fang, Y. Zhang, and Q. Liu, "Bio-inspired channel configuration derived from morphological traits of thoracic ribcage and dendritic branching for bipolar plates of the proton exchange membrane fuel cell," vol. 207, no. December 2025, 2026.
- [12] W. Qi, X. Chen, Z. G. Zhang, S. Ge, H. Wang, and R. Deng, "Performance of the multi-U-style structure based flow field for polymer electrolyte



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

- membrane fuel cell,” pp. 1–17, 2024.
- [13] O. Brakni, Y. Kerkoub, F. Amrouche, and A. Mohammedi, “CFD investigation of the effect of flow field channel design based on constriction and enlargement configurations on PEMFC performance,” vol. 357, no. June 2023, 2024.
 - [14] K. Chadha, S. Martemianov, and A. Thomas, “Study of new flow field geometries to enhance water redistribution and pressure head losses reduction within PEM fuel cell,” vol. 6, pp. 0–12, 2020.
 - [15] W. Seok, G. H. Kim, and J. Seo, “Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement,” 2019.
 - [16] T. Wilberforce and A. G. Olabi, “Design of Experiment (DOE) Analysis of 5-Cell Stack Fuel Cell Using Three Bipolar Plate Geometry Designs,” 2020.
 - [17] F. A. Widiarsa, “FUEL CELL SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF PENGISI,” 2016.
 - [18] D. Modeling, S. Of, A. N. Optimized, and P. Exchange, “IMECE2007-43558 DYNAMIC MODELING AND SIMULATION OF AN OPTIMIZED PROTON EXCHANGE,” pp. 1–8, 2017.
 - [19] 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,” 2022.
 - [20] J. Shen, Z. Tu, and S. H. Chan, “Performance enhancement in a proton exchange membrane fuel cell with a novel 3D flow field,” *Appl. Therm. Eng.*, p. 114464, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114464.
 - [21] S. Porstmann, T. Wannemacher, and T. Richter, “Overcoming the Challenges for a Mass Manufacturing Machine for the Assembly of PEMFC Stacks,” 2019.
 - [22] N. A. A. Qasem, “A recent overview of proton exchange membrane fuel cells : Fundamentals , applications , and advances,” vol. 252, no. June, 2024.
 - [23] A. Abaspour, “A New Feedback Linearization-NSGA-II based Control Design for PEM Fuel Cell,” vol. 97, no. 10, pp. 25–32, 2017.
 - [24] N. Adiera *et al.*, “Review of Chitosan-Based Polymers as Proton Exchange Membranes and Roles of Chitosan-Supported Ionic Liquids”.
 - [25] T. Wilberforce, O. Ijaodola, A. Baroutaji, E. Ogungbemi, and A. G. Olabi, “Effect of Bipolar Plate Material on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance,” pp. 1–15, 2022.
 - [26] A. P. Manso, F. F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, and M. G. Mujika, “Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell . A review,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 20, pp. 15256–15287, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.076.
 - [27] L. Xing *et al.*, “Membrane electrode assemblies for PEM fuel cells : A review of functional graded design and optimization,” vol. 177, 2019.
 - [28] Y. Wang, D. Y. C. Leung, J. Xuan, and H. Wang, “A review on unitized regenerative fuel cell technologies , part-A : Unitized regenerative proton exchange membrane fuel cells,” vol. 65, pp. 961–977, 2016.
 - [29] S. Park, A. B. Kareem, W. J. Joo, and J. Hur, “FEA Assessment of Contact Pressure and Von Mises Stress in Gasket Material Suitability for PEMFCs



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- in Electric Vehicles,” pp. 1–29, 2023.
- [30] B. A. Braz, C. S. Moreira, V. B. Oliveira, and A. M. F. R. Pinto, “Electrochimica Acta Effect of the current collector design on the performance of a passive direct methanol fuel cell,” vol. 300, pp. 306–315, 2019.
 - [31] Z. Zhang and J. Zhang, “Study on the Optimal Cross-Sectional Shapes of the PEMFC Endplates by Using a Moment of Inertia and 3D FEM Models,” 2022.
 - [32] A. Iranzo, B. Toharias, F. Rosa, and C. Su, “Experimental and numerical Investigation on the design of a bioinspired PEM fuel cell,” vol. 257, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124799.
 - [33] J. T. Mesin, F. T. Industri, and U. I. Indonesia, “PENGARUH LAMA WAKTU PEWARNAAN TERHADAP LAJU KOROSI DAN KETAHANAN ASAM PADA ALUMINIUM 5052 MELALUI PROSES ANODIZING,” 2025.
 - [34] P. A. Review, T. Bohackova, and J. Ludvik, “Metallic Material Selection and Prospective Surface Treatments for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar,” 2021.
 - [35] J. Arif, P. Prayitno, and H. Al Hafidh, “Analisis static pada aluminium 5052 dengan variasi sudut menggunakan solidworks Solidworks static study of aluminum 5052 at various angles,” vol. 10, pp. 38–50, 2023, doi: 10.37373/tekno.v10i1.269.
 - [36] P. D. Cad *et al.*, “Pelatihan dasar-dasar cad/cam/cae dan software autocad untuk guru-guru smk bidang keahlian teknik mesin di wilayah kabupaten bekasi”.
 - [37] E. Science, “Basics of computational fluid dynamics : An overview Basics of computational fluid dynamics : An overview,” 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1130/1/012042.
 - [38] S. Computational, F. Dynamics, S. Desalinasi, and A. I. R. Laut, “(CFD) PENYEBARAN PANAS HOT TANK PADA,” vol. 7, no. 2, pp. 65–75, 2024.
 - [39] M. Abbasov, “Investigating pressure drops and flow uniformity in fuel cell flow channels,” 2022.
 - [40] Q. Song, S. Yang, H. Li, Y. Ji, D. Cai, and G. Wang, “Performance Improvement of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by a New Coupling Channel in Bipolar Plate,” pp. 1–20, 2025.
 - [41] E. Publishing, H. Omar, S. Alfarawi, A. El-sawi, and M. Zeo, “Numerical Simulation of Cross Flow in In-Line Square Tube Array to Estimate the Convective Heat Transfer Coefficient,” vol. 9, no. 2, pp. 84–91, 2021, doi: 10.12691/ajer-9-2-2.
 - [42] B. Plates, “MBI Enhancing Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Performance through Optimized Design of Parallel Channel,” vol. 03, no. 01, 2025.
 - [43] X. Chen *et al.*, “Performance study on a stepped flow field design for bipolar plate in PEMFC,” vol. 7, pp. 336–347, 2021.
 - [44] S. Mathiyazhagan and L. S. Maganti, “Validating Analytical and Numerical



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Predictions of Hydrodynamic Characteristics in Microchannel with Experimental Results,” pp. 1–8, 2022.
- [45] V. R. Moh Nurkhamal, “MBI Enhancing Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Performance through Optimized Design of Parallel Channel,” vol. 03, no. 01, 2025.
- [46] T. Q. Reviews, “Engineering and Technology Quarterly Reviews A Numerical Parametric Study on the Impacts of Mass Fractions of Gas Species on PEMFC Performance,” 2022.
- [47] *No Title.*
- [48] I. Journal and C. Engineering, “Thermofluids Md Sadiqul Hasan Talukder,” vol. 13, no. 5, pp. 22–29, 2016, doi: 10.9790/1684-1305022229.
- [49] “Investigation of Water and Heat Transfer Mechanism in PEMFCs Based on a Two-Phase Non-Isothermal Model.”
- [50] M. S. Hossain, B. Shabani, and C. P. Cheung, “Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.042.
- [51] Z. Xia, H. Chen, W. Shan, and R. Zhang, “Behavior of current distribution evolution under reactant starvation conditions based on a single polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) with triple-serpentine flow field : An experimental study,” vol. 8, 2023.
- [52] M. Wu *et al.*, “Performance Analysis of PEMFC with Non-Equidistant Depth 3D Flow Field,” 2026, doi: 10.1021/acsomega.5c13005.
- [53] X. Deng *et al.*, “Recent Progress in Materials Design and Fabrication Techniques for Membrane Electrode Assembly in Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” pp. 1–29, 2025.
- [54] A. Jankovi, G. Chaudhary, and F. Goia, “Optimization through classical design of experiments (DOE) : An investigation on the performance of different factorial designs for multi-objective optimization of complex systems,” vol. 102, no. January, 2025.
- [55] A. Jankovic, G. Chaudhary, and F. Goia, “Energy & Buildings Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems,” vol. 250, 2021.
- [56] A. Apriyani and P. Hernowo, “Aplikasi Metode Analysis of Variance (Anova) Untuk Mengkaji Pengaruh Kecepatan Laju Alir Kecap Dalam Proses Pasteurisasi Pada Proses Pembuatan Kecap Manis Application of Analysis of Variance (ANOVA) Method to Assess the Influence of Soy Sauce Flow Rate Velocity in the Pasteurization Process During Soy Sauce Production,” vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2024.
- [57] A. Amiruddin and S. Lubis, “Effectiveness of CNC Turning and CNC Milling in Machining Process,” vol. 2, no. 2, pp. 575–583.
- [58] F. Mulyana, R. Maladzi, B. Matsaany, N. Yudisha, and M. P. Risfi, “MBI Optimization of Bipolar Plate Machining Process Using the Taguchi Method on CNC 3-Axis,” vol. 04, no. 01, 2026.
- [59] H. TARIGAN, “ANALISA PENGARUH KECEPATAN PEMAKANAN



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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAN WAKTU PEMBERIAN PENDINGIN TERHADAP KEAUSAN HASIL PERMESINAN CNC MILLING PADA BAJA ST 40,” pp. 1–34, 2025.

- [60] F. Nayorama, “ANALISA SUMBU Z PADA PROSES KALIBRASI DAN PERGERAKAN MESIN CNC ROUTER,” pp. 5–10, 2016.
- [61] A. Sulton, “RANCANG BANGUN MESIN MINI CNC MILING PORTABEL SKALA LABORATORIUM,” pp. 6–15, 2023.
- [62] J. E. Miller, A. P. Longstaff, S. Parkinson, and S. Fletcher, “Improved machine tool linear axis calibration through continuous motion data capture,” *Precis. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.08.010.
- [63] L. Rostami, M. Haghshenasfard, M. Sadeghi, and M. Zhiani, “A 3D CFD model of novel fl ow channel designs based on the serpentine and the parallel design for performance enhancement of PEMFC,” *Energy*, vol. 258, p. 124726, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124726.
- [64] S. A. Atyabi and E. Afshari, “Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb fl ow fi eld at the cathode side,” *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 738–748, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.293.
- [65] J. Zhang, Z. Wang, H. Ding, and Z. Pan, “ScienceDirect Heat and mass transfer characteristics of a novel three-dimensional flow field metal bipolar plate for PEMFC by laser 3D printing,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 1036–1049, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.024.
- [66] W. T. Park, C. K. Jin, and C. G. Kang, “Improving channel depth of stainless steel bipolar plate in fuel cell using process parameters of stamping,” 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8606-4.
- [67] H. Talebi-ghadikolaee, M. Elyasi, S. Seddighi, and F. Ahmadi, “Characterization and prediction of micro channel depth of ultra-thin bipolar plates for PEMFCs,” *J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 216–225, 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.01.027.
- [68] “US11652219.pdf.”
- [69] L. Ter, “United States Patent,” vol. 2, 2021.
- [70] F. P. Documents, “(12) United States Patent,” vol. 2, 2019.
- [71] M. Kaplan, “Black Sea Journal of Engineering and Science CFD ANALYSIS OF PRESSURE DROP REDUCTION IN PEMFC,” no. 2021, pp. 254–260, 2024, doi: 10.34248/bsengineering.1420277.
- [72] C. Wang, Q. Zhang, S. Shen, Y. Xiaohui, F. Zhu, and X. Cheng, “The respective effect of under-rib convection and pressure drop of flow fields on the performance of PEM fuel cells,” no. January, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1038/srep43447.
- [73] D. K. Madheswaran, M. Thangamuthu, S. Gnanasekaran, and S. Gopi, “Powering the Future : Progress and Hurdles in Developing Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components to Achieve Department of Energy Goals — A Systematic Review,” 2023.
- [74] B. A. Ali and A. K. Roy, “EFFECT OF INDENTATIONS ON THE PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL,” pp. 874–880, 2023.

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LAMPIRAN

Lampiran 1. Mesin CNC 3-Axis Milling



Lampiran 2. Dokumentasi Proses Pemesinan PEMFC





Lampiran 3. Hasil Analisis ANOVA Parameter *Water Accumulation* dan *Gas Distribution*

Analysis of Variance for Water Accumulation

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0,00000	0,00000	1,94	0,172
Linear	4	0,00000	0,00000	3,14	0,071
Channel Width	2	0,00000	0,00000	4,55	0,043
Channel Depth	2	0,00000	0,00000	1,73	0,232
2-Way Interactions	4	0,00000	0,00000	0,74	0,589
Channel Width*Channel Depth	4	0,00000	0,00000	0,74	0,589
Error	9	0,00000	0,00000		
Total	17	0,000001			

Analysis of Variance for Gas Distribution

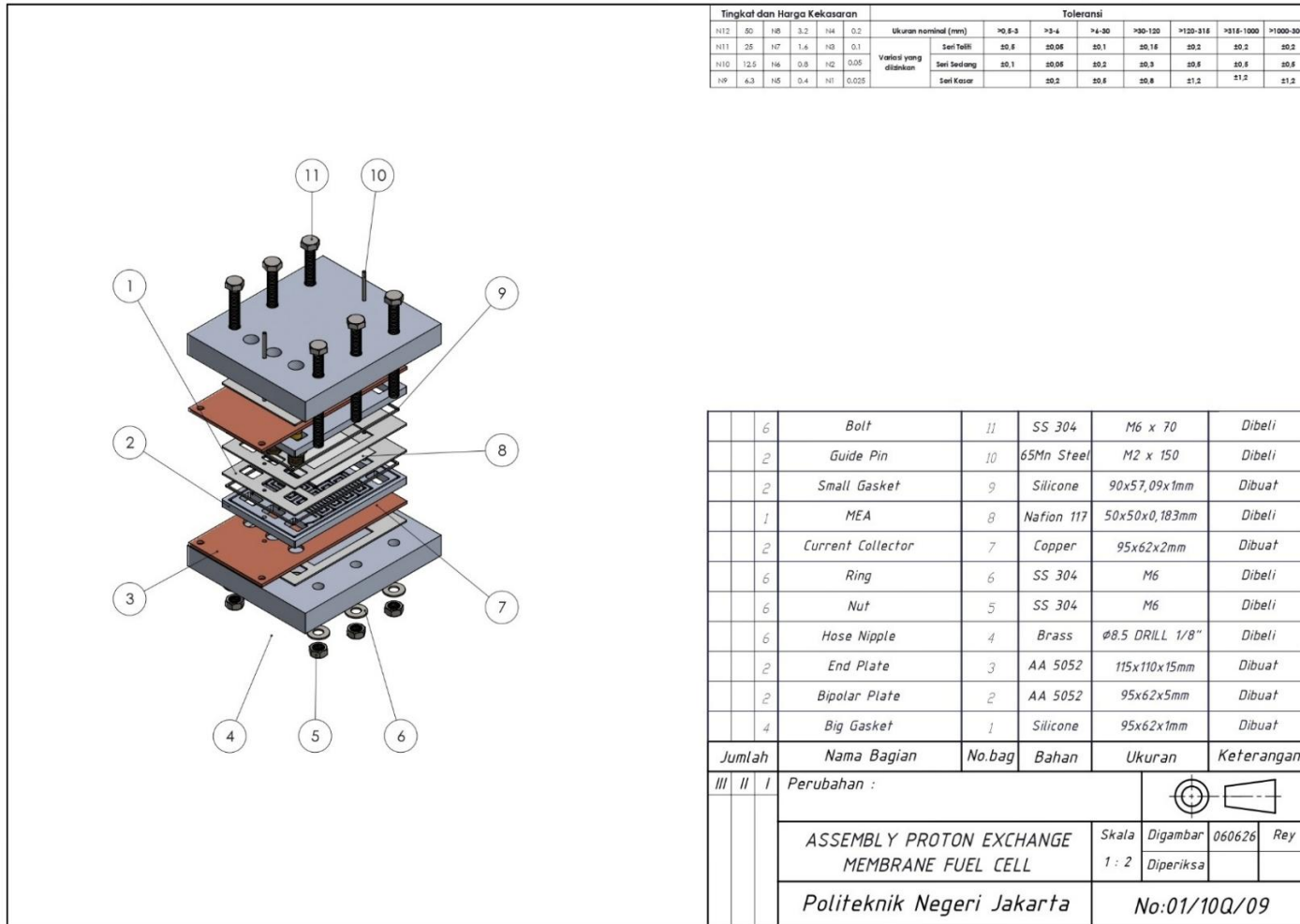
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0,000023	0,000003	2,83	0,071
Linear	4	0,000015	0,000004	3,77	0,045
Channel Width	2	0,000011	0,000006	5,53	0,027
Channel Depth	2	0,000004	0,000002	2,02	0,189
2-Way Interactions	4	0,000008	0,000002	1,88	0,198
Channel Width*Channel Depth	4	0,000008	0,000002	1,88	0,198
Error	9	0,000009	0,000001		
Total	17	0,000032			

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 4. *Drawing Single Stack PEMFC*



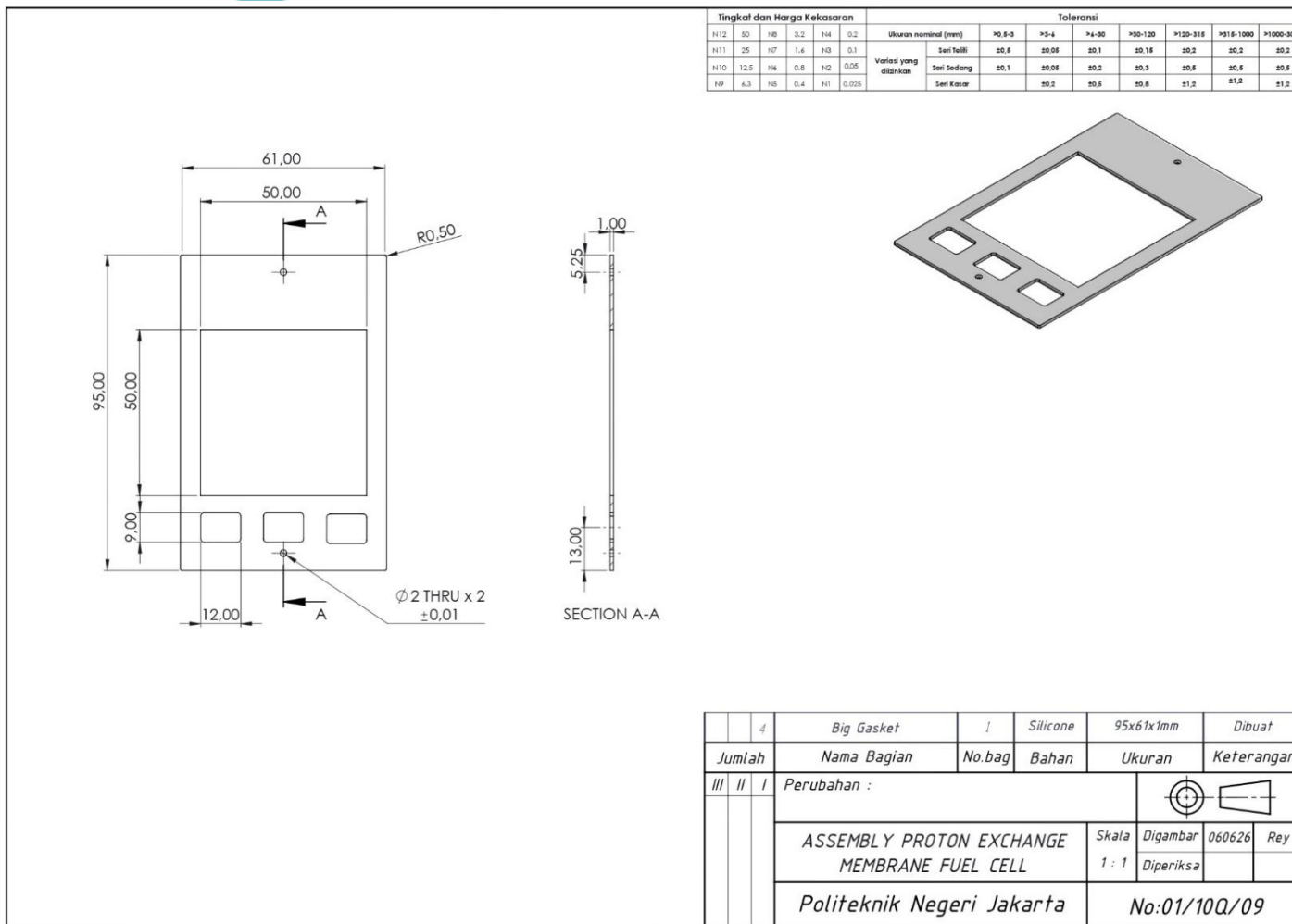
Hak Cipta :

- Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Dilarang mengutipkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

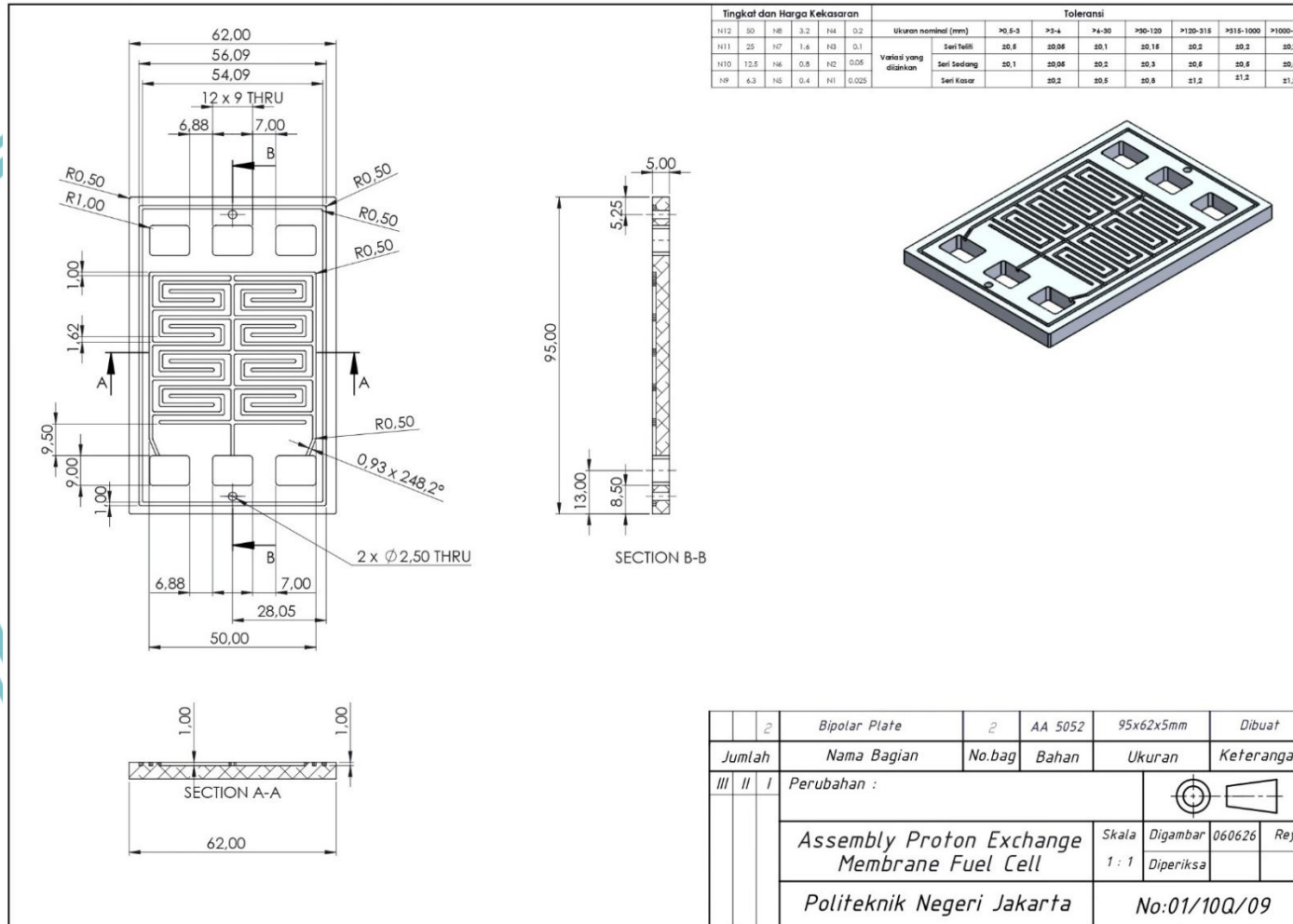
Hak Cipta :

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

Lampiran 5. *Drawing Big Gasket*



Lampiran 6. *Drawing Bipolar Plate*



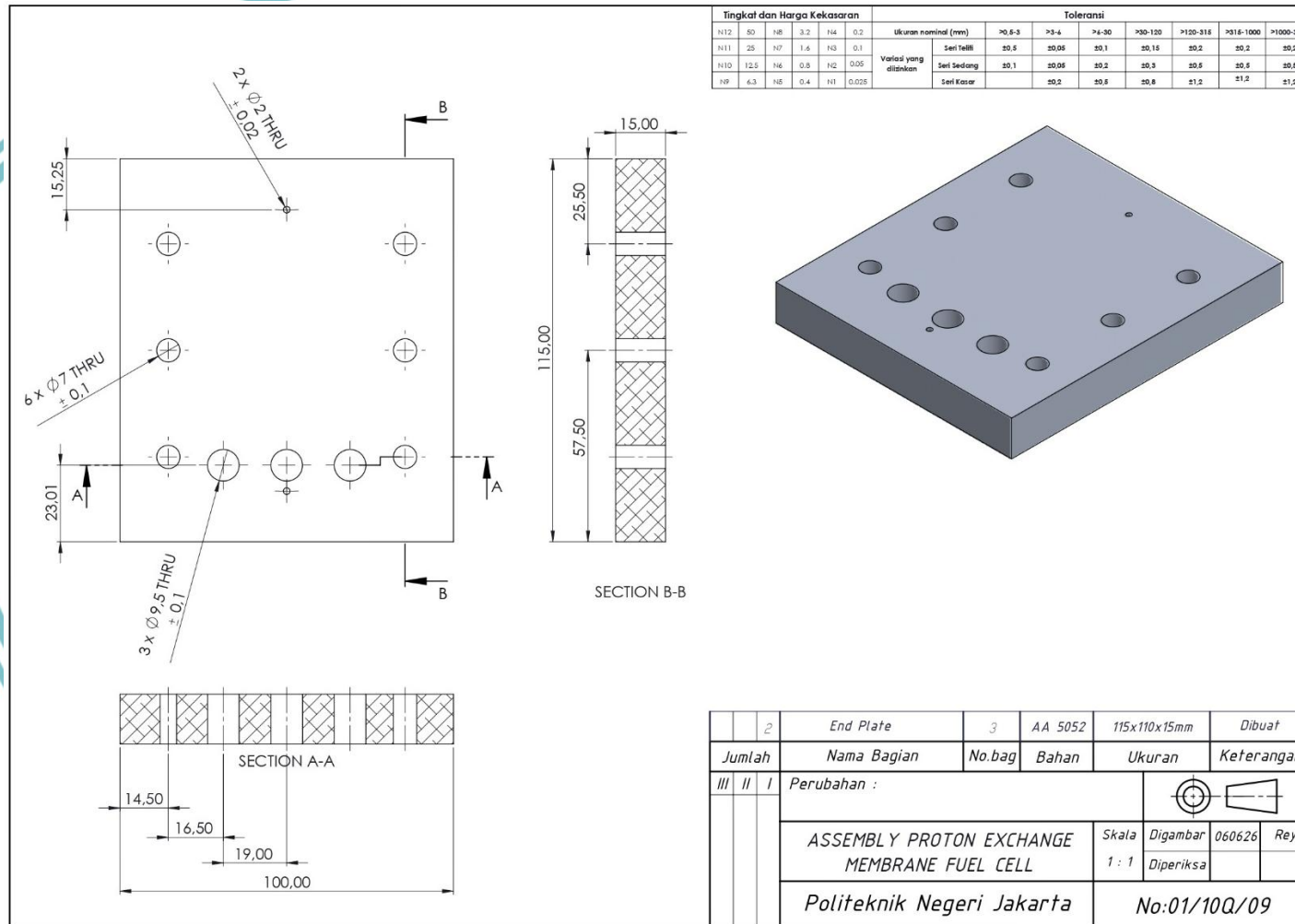
Hak Cipta :

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.

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

Lampiran 7. *Drawing End Plate*



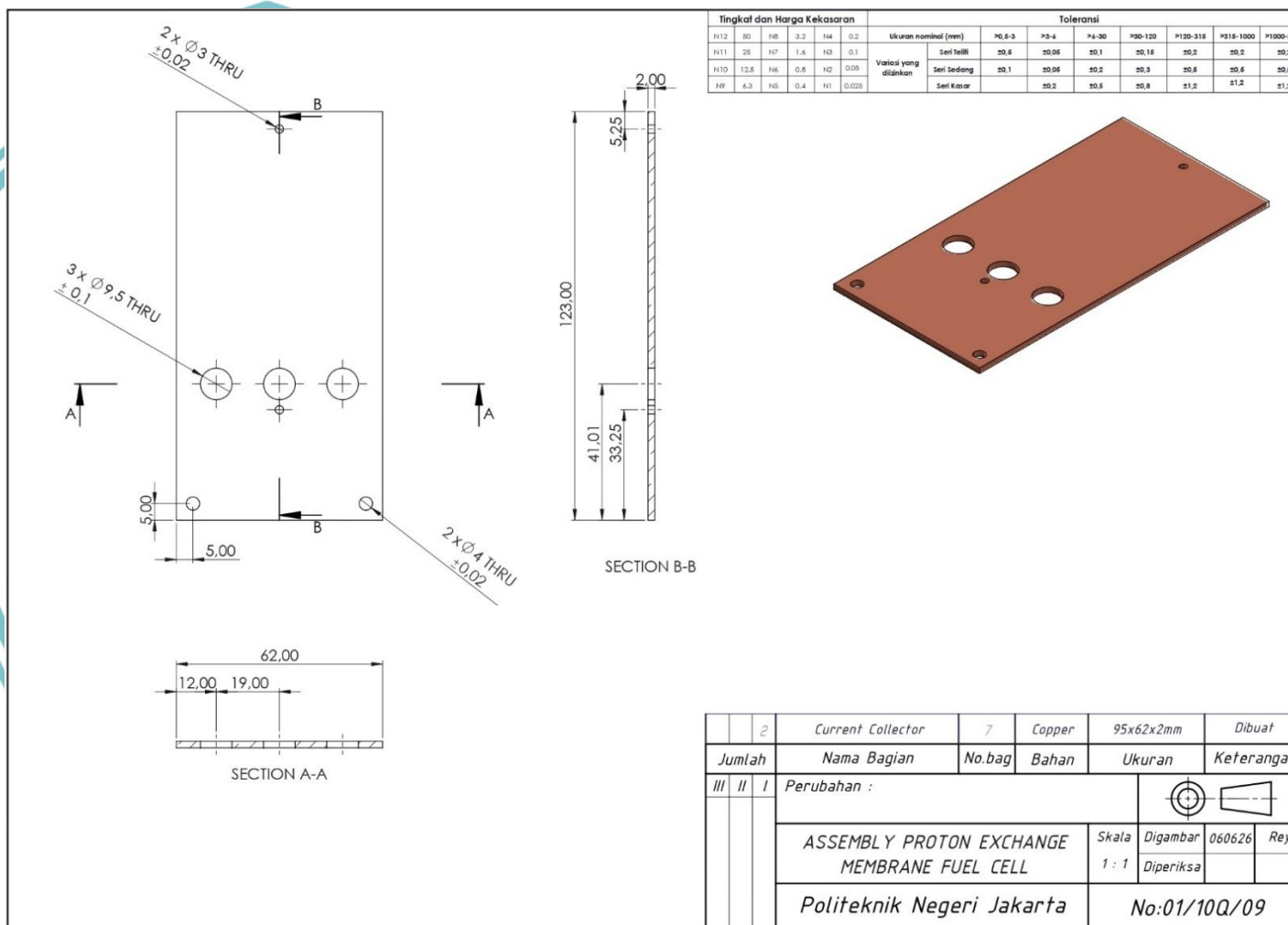
Hak Cipta :

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

Lampiran 8 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 mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 9 Drawing Small Gasket

