© 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

PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP*, *GAS DISTRIBUTION*, DAN *WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

LAPORAN SKRIPSI

Oleh:
Hanandira Wistikhirana
NIM. 2202411053

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK MESIN

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

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

PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP*, *GAS DISTRIBUTION*, DAN *WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

SKRIPSI

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

Oleh:

Hanandira Wistikhirana

NIM. 2202411053

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

`

"Skripsi ini penulis persembahkan kepada diri sendiri atas kesungguhannya untuk menyelesaikan skripsi 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 mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

`

PENGARUH RIB WIDTH DAN CHANNEL DEPTH PADA LEAF VEIN FLOW FIELD PEMFC TERHADAP PRESSURE DROP, GAS DISTRIBUTION, DAN WATER ACCUMULATION MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Oleh:
Hanandira Wistikhirana
NIM 2202411053
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Manufaktur

Skripsi telah disetujui oleh pembimbing

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T.	Radhi Maladzi, S.T.,M.T.
NIP. 198608302009122001	NIP. 199307282024061001

Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur

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

© 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

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP, GAS DISTRIBUTION, DAN WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Oleh:

Hanandira Wistikhirana

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		20/7-26
2	Dr.Eng., Pribadi Mumpuni Adhi, S.Si, M.Eng. NIP. 198901312019031009	Penguji I		20/7-26
3	Ifa Saidatuningtyas, S.Si., M.T. NIP. 198808272022032005	Penguji II		20/9 2026

Depok, 21 Juli 2026

Disahkan oleh:

Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

NIP. 197602252000121002

Scanned with CamScanner

© 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

`

LEMBAR PERNYATAAN ORISINILITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hanandira Wistikhirana

NIM : 2202411053

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, 11 Juli 2026

Hanandira Wistikhirana

NIM. 2202411053

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

`

PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP, GAS DISTRIBUTION*, DAN *WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Hanandira Wistikhirana[1)], Vika Rizkia[1)], Radhi Maladzi[1)]

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

Email: hanandira.wistikhirana.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRAK

Kinerja *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dipengaruhi oleh desain *flow field* yang berperan dalam distribusi gas reaktan dan pengelolaan air. *Flow field* biomimetik tipe *leaf vein* dikembangkan dengan meniru sistem distribusi fluida pada urat daun yang mampu menghasilkan distribusi aliran yang seragam dengan *pressure drop* yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth* terhadap *pressure drop*, *gas distribution*, dan *water accumulation* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian dilakukan menggunakan desain eksperimen faktorial 3×3 dengan variasi *rib width* sebesar 0,8 mm, 1,0 mm, dan 1,2 mm serta *channel depth* sebesar 0,6 mm, 0,8 mm, dan 1,0 mm sehingga diperoleh sembilan variasi desain. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent dengan model *Species Transport* tanpa mempertimbangkan reaksi elektrokimia. Parameter yang dianalisis meliputi *pressure drop*, *Uniformity Index* (UI), dan *area weighted average* fraksi massa uap air (*H_2O vapor*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan *channel depth* menurunkan *pressure drop* akibat bertambahnya luas penampang aliran dan diameter hidrolik saluran. Nilai *pressure drop* berada pada rentang 24,0699–94,1105 Pa, nilai UI berada pada rentang 0,999863–0,999964, sedangkan nilai *water accumulation* berada pada rentang 0,149987–0,150030. Temuan tersebut menunjukkan bahwa *flow field* biomimetik tipe *leaf vein* mampu menghasilkan distribusi gas dan uap air yang relatif seragam dengan *pressure drop* yang rendah. Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, desain terbaik diperoleh pada P8 dengan kombinasi *rib width* 1,2 mm dan *channel depth* 0,8 mm

Kata kunci: PEMFC, *leaf vein flow field*, *pressure drop*, *gas distribution*, *water accumulation*, CFD.

© 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

`

PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP, GAS DISTRIBUTION*, DAN *WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Hanandira Wistikhirana[1)], Vika Rizkia[1)], Radhi Maladzi[1)]

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

Email: hanandira.wistikhirana.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRAK

The performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) is strongly influenced by flow field design, which controls reactant gas distribution and water management. Biomimetic leaf vein flow fields imitate the fluid distribution mechanism in leaf veins, offering uniform flow distribution with low pressure drop. This study investigates the effects of rib width and channel depth variations on pressure drop, gas distribution, and water accumulation using Computational Fluid Dynamics (CFD). A 3×3 factorial DOE was employed using rib widths of 0.8 mm, 1.0 mm, and 1.2 mm and channel depths of 0.6 mm, 0.8 mm, and 1.0 mm, resulting in nine design configurations. Simulations were conducted in ANSYS Fluent using the Species Transport model without electrochemical reactions. The evaluated parameters included pressure drop, Uniformity Index (UI), and the area-weighted average H_2O vapor mass fraction.The results showed that increasing channel depth reduced pressure drop due to larger flow cross-sectional area and hydraulic diameter. Pressure drop ranged from 24.0699 to 94.1105 Pa, UI ranged from 0.999863 to 0.999964, and water accumulation ranged from 0.149987 to 0.150030. These results indicate that the biomimetic leaf vein flow field provides relatively uniform gas and vapor distribution with low pressure drop. Based on the overall analysis, design P8 (1.2 mm rib width and 0.8 mm channel depth).

Keyword**:** *PEMFC, leaf vein flow field, pressure drop, gas distribution, water accumulation, CFD.*

© 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

`

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan kemudahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **"PENGARUH *RIB WIDTH* DAN *CHANNEL DEPTH* PADA *LEAF VEIN FLOW FIELD* PEMFC TERHADAP *PRESSURE DROP, GAS DISTRIBUTION*, DAN *WATER ACCUMULATION* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)"** dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, arahan, doa, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta.
2. Bapak 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 Bapak Radhi Maladzi, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, masukan, saran, serta motivasi kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran, perhatian, dan ilmu yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini 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.
5. Untuk diri penulis, Hanandira Wistikhirana, terima kasih telah terus berusaha dan bertahan hingga sampai pada titik ini. Terima kasih telah

© 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

`

memilih untuk tetap melangkah hingga mencapai semester akhir pada bidang pendidikan yang dahulu tidak pernah menjadi bagian dari rencana hidup, namun pada akhirnya berhasil dijalani dengan penuh keteguhan. Terima kasih karena tetap memilih melangkah di tengah berbagai kesulitan, tekanan, kegagalan, dan pengalaman yang tidak selalu mudah untuk dilalui. Terima kasih karena tidak menyerah ketika merasa tidak cukup mampu, serta tetap percaya bahwa setiap proses akan menemukan akhirnya.

6. Keluarga penulis, yaitu Mama, Kakak, dan Adek. Terima kasih juga atas perhatian dalam bentuk makanan dan kebutuhan sehari-hari yang sangat membantu penulis dalam menjalani proses ini.
7. Aminah, Balqis, Dinda, dan Nabel yang selalu menjadi *safe place* dan menerima penulis dalam berbagai kondisi, serta dengan tulus membantu ketika penulis mengalami kesulitan, termasuk saat memerlukan bantuan finansial.
8. Levina dan Aji yang senantiasa untuk selalu berbagi cerita, motivasi, dan dorongan kepada penulis agar tetap berjuang dalam menyelesaikan perkuliahan di Manufaktur PNJ.
9. Akmal, Keysa, Davin, dan Ari yang selalu hadir ketika penulis membutuhkan bantuan, serta memberikan dukungan, perhatian, dan menjadi tempat berbagi keluh kesah selama masa perkuliahan, termasuk dengan meminjamkan akun kampus sehingga penulis dapat mengakses berbagai jurnal internasional yang dibutuhkan.
10. Intan Putri Utami Siti Mariam, teman sekelas penulis yang selalu ada dan selalu berbagi keluh kesah selama 4 tahun ini, serta meyakinkan penulis untuk tetap bertahan di jurusan ini. Di awal perkuliahan, ketika penulis mendapatkan hasil praktik bengkel yang di bawah dari semua orang akibat kesulitan dalam mencapai presisi, beliau menjadi salah satu yang terus memberikan semangat untuk tidak menyerah. Terima kasih Intan kamu luar biasa.
11. Larasati, Alumni D3 Mesin PNJ yang sampai sekarang masih hadir di kehidupan penulis. Terima kasih telah menjadi tempat bercerita serta selalu

© 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

`

mengingatkan penulis untuk tidak terus larut pada keadaan sehingga penulis mampu tetap menyelesaikan skripsinya

12. Alma dan Filia Anak Manufaktur Q yang penulis paling dekat. Terima kasih sudah mau bersenda gurau bersama, berbagi cerita, dan berbagi ilmu sehingga kita bersama mampu sampai di titik ini.
13. Rey Akashi Prawiraka Muhammad yang telah bersedia bekerja sama dengan penulis dalam satu topik skripsi, sehingga proses penyusunan skripsi ini dapat dijalankan dengan baik. Selain itu, ia juga menjadi tempat berbagi cerita di masa-masa sulit, sehingga percakapan yang terjalin membantu penulis tetap tenang, tidak larut dalam situasi, dan kembali fokus dalam menjalani proses penyusunan skripsi.
14. Rafiel, Adfa, Khafidz, Bagus, Revo, dan Fio yang sudah menjadi teman bercerita penulis serta telah membantu penulis selama proses fabrikasi, mulai dari penggunaan alat di bengkel, penyediaan fasilitas pengerjaan, peminjaman laptop hingga bantuan transportasi menuju lokasi pengerjaan
15. Teman-teman Kelas S di antaranya Zahran, Emery, dan Mas Rifky yang telah menjadi bagian dari perjalanan perkuliahan penulis, senantiasa memberikan bantuan, semangat, serta dukungan satu sama lain sejak awal masa studi hingga proses penyusunan skripsi ini. Secara khusus, mereka juga kerap membantu penulis dalam berbagai kebutuhan praktis, termasuk ketika penulis memerlukan kendaraan maupun bantuan dalam penggunaan peralatan bengkel, sehingga proses perkuliahan dan penyusunan skripsi dapat berjalan lebih lancar.
16. Kepada pemilik NIM berakhiran “0” yang pernah hadir membawa kehangatan dengan diiringi oleh hembusan angin dingin dan cerita yang tidak bisa dideskripsikan warna dan bentuknya dalam perjalanan penulis. Kehadirannya mengajarkan bahwa tidak semua rasa dapat memberikan sumringah selamanya, namun setiap pertemuan selalu menyisakan pelajaran,dan proses bertumbuh yang berharga. Walau ada air mata yang sempat jatuh terlalu deras, tetesannya membuat penulis lebih kuat untuk menerima keputusan yang diberikan semesta padanya.

© 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

`

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan skripsi ini di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang manufaktur.

Depok, 29 Juni 2026

Hanandira Wistikhirana

NIM. 2202411053

© 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

`

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN ORISINILITAS vi
ABSTRAK vii
ABSTRAK viii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xvi
DAFTAR TABEL xviii
DAFTAR LAMPIRAN xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Pertanyaan Penelitian 5
1.4 Tujuan Penelitian 5
1.5 Manfaat Penelitian 5
1.5.1 Manfaat Bagi Peneliti 5
1.5.2 Manfaat Bagi Akademik 6
1.6 Batasan Masalah 6
1.7 Sistematika Penulisan 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 9
2.1 Landasan Teori 9
2.1.1 *Fuel cell* 9
2.1.2 PEMFC 10
2.1.3 Prinsip Kerja PEMFC 11
2.1.4 Komponen PEMFC 12
2.1.5 *Biomimetic Leaf Vein Flow field Design* 16
2.1.6 Material Pelat Bipolar 17
2.1.7 *Computer Aided Design, Manufacturing, and Engineering* (CAD, CAM, CAE) 19
2.1.8 *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 19

© 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

`

2.1.9 *Governing Equation* 20
2.1.10 *Darcy-Weisbach* 22
2.1.11 *Fraksi Massa Spesies* 24
2.1.12 *Uniformity index* 24
2.1.13 *Water accumulation Potential* 25
2.1.14 *Desain Of Experiment* 26
2.1.15 Desain faktorial 3x3 27
2.1.16 ANOVA (Analysis of Variance) 28
2.1.17 Proses Manufaktur Pelat Bipolar 28
2.1.18 *Computational Numerical Control* (CNC) 3 Axis *Milling* 29
2.2 Kajian literatur 30
2.3 Kajian Paten 58
2.4 Kerangka Berpikir 61
2.5 Hipotesis Penelitian 62
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 64
3.1 Jenis Penelitian 64
3.2 Objek Penelitian 64
3.3 Metode Pengambilan Sampel 64
3.4 Tahapan Penelitian 65
3.5 Jenis dan Sumber Data Penelitian 79
3.6 Metode Pengumpulan Data Penelitian 80
3.7 Metode Analisis Data 80
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 80
4.1 Hasil Desain *Leaf Vein Flow field* 80
4.1.1 Variasi *Rib width* dan *Channel Depth* pada Desain *Leaf Vein Flow field* 80
4.2 Hasil Perhitungan Jenis Aliran 84
4.3 Hasil Simulasi *Flow Computational Fluid Dynamics* (CFD) 86
4.3.1 Analisis Hasil Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) *Pressure drop* 86
4.3.2 Analisis Hasil Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) *Gas distribution (Uniformity Index)* 90
4.3.3 Analisis Hasil Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) *Water accumulation (Area Weighted Average)* 94
4.4 Hasil Analysis Of Variance (ANOVA) 99

© 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

`

4.4.1 Hasil Analysis of Variance (ANOVA) for *Pressure drop* 100
4.5 Pemilihan Desain Terbaik 102
4.6 Hasil Performa PEMFC Modules Desain Terbaik 103
4.7 Hasil Prototipe *PEMFC Single Cell* 105
4.7.1 Validasi Hasil Ukuran Prototipe PEMFC *Single Cell* 105
4.7.2 Hasil Assembly Prototipe PEMFC *Single Cell* 108
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 109
5.1 Kesimpulan 109
5.2 Saran 109
DAFTAR PUSTAKA 111

© 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

`

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Konsumsi Energi 1
Gambar 2. 1 Jenis - Jenis Fuel cell 10
Gambar 2. 2 PEMFC *stack* 11
Gambar 2. 3 Prinsip Kerja PEMFC 12
Gambar 2. 4 PEMFC Assembly 13
Gambar 2. 5 *Biomimetic* Leaf Vein Flow field Design 17
Gambar 2. 6 Three Axis Machine Tool 30
Gambar 2. 7 Patent US10218007 59
Gambar 2. 8 Patent US (US11652219B2) 60
Gambar 2. 9 Patent US (US11652219B2) 61
Gambar 2. 10 Kerangka Berpikir 62
Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian 65
Gambar 3. 2 Hasil *Meshing Leaf Vein Flow Field* 68
Gambar 3. 3 Hasil *Meshing Sngle Stack Leaf Vein Flow Field* 73
Gambar 3. 4 *Machining* Menggunakan Frais 77
Gambar 3. 5 Drilling Menggunakan Mesin Bor Koordinat 77
Gambar 3. 6 *Hasil CNC Milling Leaf Vein Flow Field* 78
Gambar 3. 7 Hasil *Cutting* Gasket 79
Gambar 4. 1 Desain *Leaf Vein Flow field* 80
Gambar 4. 2 Ilustrasi Penunjuk *rib width* dan *channel depth* pada *Leaf Vein Flow field* 81
Gambar 4. 3 *Interaction plot of rib width with channel depth For Pressure drop* 101
Gambar 4. 4 *Main effect plot for Pressure drop* 102
Gambar 4. 5 Interaction plot of *rib width* with channel depth For *Gas distribution* (Uniformity index) ..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 6 *Main effect plot for Gas distribution (Uniformity index)* ..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 7 *Interaction plot of rib width with channel depth For Water accumulation (Area Weighted Average)* ..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 8 *Main effect plot for Water accumulation* **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 9 Kurva Hubungan Tegangan dengan Kerapatan Arus 104
Gambar 4. 10 Hasil *Assembly Prototipe Single Stack with Leaf Vein Bipolar Plate* 108
Gambar 4. 1 Desain *Leaf Vein Flow field* 80
Gambar 4. 2 Ilustrasi Penunjuk *rib width* dan *channel depth* pada *Leaf Vein Flow field* 81
Gambar 4. 3 *Interaction plot of rib width with channel depth For Pressure drop* 101
Gambar 4. 4 *Main effect plot for Pressure drop* 102
Gambar 4. 5 Interaction plot of *rib width* with channel depth For *Gas distribution* (Uniformity index) ..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 6 *Main effect plot for Gas distribution (Uniformity index)* ..... **Error!**

© 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

`

Bookmark not defined.
Gambar 4. 7 *Interaction plot of rib width with channel depth For Water accumulation (Area Weighted Average)* .....**Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 8 *Main effect plot for Water accumulation***Error! Bookmark not defined.**
Gambar 4. 9 Kurva Hubungan Tegangan dengan Kerapatan Arus.....104
Gambar 4. 10 Hasil *Assembly Prototipe Single Stack with Leaf Vein Bipolar Plate* 108

© 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

`

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 *Mechanical Properties* AA5052 19
Tabel 2. 2 Desain Faktorial 3x3 28
Tabel 2. 3 Kajian Literatur 50
Tabel 3. 1 Kombinasi Dua Faktor dengan Tiga Level 67
Tabel 3. 2 *Boundary Condition* Simulasi Leaf Vein Flow field 70
Tabel 3. 3 *Boundary Condition* Simulasi PEMFC *Module Leaf Vein Flow field* ..75
Tabel 4. 1 Hasil Simulasi *Pressure drop* 86
Tabel 4. 2 Hasil Simulasi *Gas distribution* 90
Tabel 4. 3 Hasil Simulasi *Water accumulation* 94
Tabel 4. 4 Hasil Analysis of Variance (ANOVA) *for Pressure drop* 100
Tabel 4. 5 *Model Summary for Pressure drop* 100
Tabel 4. 6 *Analysis of Variance (ANOVA) for Gas distribution (Uniformity index)* .....**Error! Bookmark not defined.**
Tabel 4. 7 *Model Summary for Gas distribution (Uniformity* index) ..... **Error! Bookmark not defined.**
Tabel 4. 8 *Analysis of Variance (ANOVA) for Water accumulation (Area Weighted Average* .....**Error! Bookmark not defined.**
Tabel 4. 9 *Model Summary for Water accumulation***Error! Bookmark not defined.**
Tabel 4. 10 Hasil Performa PEMFC Module 103

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

`

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Drawing Assembly Proton Exchange Membran Fuel Cell 119
Lampiran 2 Drawing End Plate..... 120
Lampiran 3 Drawing Pelat Bipolar Anoda..... 121
Lampiran 4 Drawing Pelat Bipolar Katoda..... 122
Lampiran 5 Drawing Current Collector 123
Lampiran 6 Drawing Small Gasket..... 124
Lampiran 7 Drawing Big Gasket 125
Lampiran 8 Parameter Mesin CNC..... 126
Lampiran 9 Komponen PEMFC Single Cell 127
Lampiran 10 Inlet Calculator PEMFC Modul 128
Lampiran 11 Dokumentasi Proses Pemesinan Komponen PEMFC 129
Lampiran 12 Hasil ANOVA Gas Distribution..... 130
Lampiran 13 Hasil ANOVA Water Accumulation..... 131

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

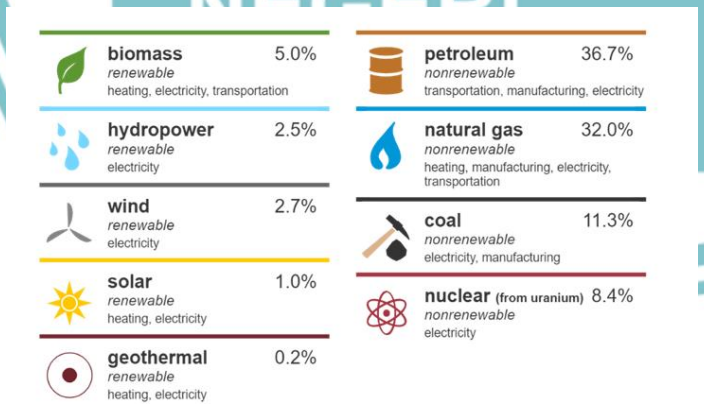
© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

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

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu isu global yang terus meningkat seiring dengan perkembangan zaman adalah polusi udara [1]. Penyebab utama polusi udara adalah penggunaan dan pembakaran bahan bakar fosil yang menghasilkan karbon dioksida CO_2. CO_2 merupakan kontributor terbesar gas rumah kaca, yaitu sekitar 77% dari total emisi gas rumah kaca global. Gas rumah kaca berperan dalam menahan panas di atmosfer sehingga memperparah pemanasan global dan perubahan iklim [1]. Menurut data dari *International Energy Agency* (IEA), sektor transportasi diidentifikasi sebagai salah satu penyumbang utama emisi karbon dengan kontribusi sekitar 25% dari total emisi CO_2 berbasis energi secara global [2]. Tingginya emisi tersebut berkaitan erat dengan tingginya ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Berdasarkan data konsumsi energi global, sekitar 80% kebutuhan energi masih dipenuhi oleh bahan bakar fosil, seperti minyak bumi (*petroleum*), gas alam (*natural gas*), dan batu bara (*coal*), sedangkan pemanfaatan energi terbarukan masih relatif rendah. Komposisi konsumsi energi berdasarkan jenis sumber energi ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Konsumsi Energi
Sumber [1]

Salah satu solusi yang dilakukan adalah menggantikan bahan bakar fosil dengan energi terbarukan. Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang lebih bersih dan berkelanjutan sebagai pengganti

© 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

bahan bakar fosil. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi *fuel cell* semakin banyak diteliti dan dikembangkan sebagai salah satu alternatif penyediaan energi bersih [3]. Di antara berbagai jenis *fuel cell*, PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel cell*) dinilai sebagai salah satu yang paling andal untuk digunakan. PEMFC berperan penting dalam memajukan teknologi energi terbarukan dengan memberikan solusi tanpa emisi, khususnya dalam aplikasi transportasi dan pembangkit listrik stasioner [4]. PEMFC merupakan perangkat elektrokimia yang mengonversi energi kimia dari reaksi antara hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) secara langsung menjadi energi listrik [5]. Dalam proses konversi tersebut, air (H_2O) dihasilkan sebagai produk utama reaksi, sementara energi listrik dilepaskan sebagai keluaran sistem.

Komponen krusial pada PEMFC adalah pelat bipolar karena berpengaruh langsung terhadap kinerja sel secara keseluruhan [6]. Pelat bipolar menyumbang porsi biaya manufaktur yang besar, yakni sekitar 30–45% dari total biaya. Sebagai komponen utama, pelat bipolar memiliki beberapa fungsi, di antaranya menghantarkan elektron antar sel, mendistribusikan gas reaktan menuju area reaksi, membuang panas hasil reaksi, menjaga kekuatan mekanik *stack*, serta membantu mengeluarkan air hasil reaksi [7][8]. Desain *flow field* pada pelat bipolar merupakan aspek penting yang perlu dipertimbangkan karena berpengaruh langsung terhadap performa PEMFC [7].

Parallel flow field merupakan salah satu desain konvensional *flow field* yang paling banyak digunakan [9]. Meskipun memiliki keunggulan berupa *pressure drop* yang rendah, desain *parallel* masih memiliki keterbatasan terutama pada manajemen air, sehingga berpotensi meningkatkan risiko *flooding* dan menurunkan stabilitas performa sel dalam jangka panjang. Kondisi tersebut mendorong pengembangan desain flow field alternatif yang mampu mempertahankan distribusi gas yang baik dengan *pressure drop* yang tetap rendah serta manajemen air yang lebih optimal [10], [11].

Permasalahan tersebut mendorong para peneliti untuk mengembangkan berbagai struktur *flow field*, salah satunya desain bionik (*biomimetic*) yang

© 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

terinspirasi dari alam. Desain bionik mulai dikembangkan khususnya dalam meningkatkan keseragaman distribusi reaktan, menurunkan *pressure drop*, serta mendukung manajemen air yang lebih baik. Salah satu alternatif desain bionik adalah *flow field leaf vein* (urat daun), yang terinspirasi dari sistem distribusi air pada daun. Air pada daun didistribusikan dari urat utama menuju cabang-cabang yang lebih kecil sehingga penyebarannya dapat berlangsung secara merata [12]. Menurut penelitian terdahulu oleh Lian et al, *flow field leaf vein* mampu menghasilkan distribusi konsentrasi oksigen, tekanan, dan kecepatan aliran yang lebih *uniform*, serta meningkatkan densitas arus hingga sekitar 26% dibanding *serpentine* [13].

Peran desain *flow field* pada PEMFC tidak hanya terbatas pada distribusi gas reaktan, tetapi juga mencakup proses manajemen air di dalam sel. Air merupakan produk reaksi elektrokimia yang harus segera dikeluarkan dari dalam PEMFC agar tidak menghambat suplai reaktan. Apabila air tidak dapat dikeluarkan secara efektif, maka akan terjadi *water accumulation* yang dapat berkembang menjadi *flooding*. Kondisi tersebut menghambat distribusi gas reaktan, meningkatkan *pressure drop*, serta menurunkan performa PEMFC [14].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan desain *flow field* yang lebih adaptif guna meningkatkan kinerja PEMFC. Contohnya penelitian yang dilakukan oleh Gao et al, yang mengembangkan desain *leaf vein* dengan mengvariasikan jumlah percabangan, dengan hasilnya adalah desain *leaf vein* meningkatkan transportasi oksigen ke permukaan elektroda secara signifikan, dengan peningkatan densitas daya maksimum sebesar 3% dibanding *serpentine* [15]. Desain optimal ditemukan pada 20 cabang (BC-20) dengan lebar *ridge* 0,6 mm, yang memberikan distribusi gas paling homogen dan meminimalkan kerugian ohmik. Meskipun desain *leaf vein* telah banyak dikembangkan [13], [16], [17], kajian mengenai pengaruh *rib width* dan *channel depth* terhadap *pressure drop*, distribusi gas, dan *water accumulation* masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengadaptasi desain *flow field leaf vein* dari Xiao et al dengan mempertimbangkan aspek manufaktur melalui penggunaan CNC 3-axis sebagai alternatif terhadap metode *laser additive manufacturing* yang umum digunakan,

© 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

sehingga desain yang dihasilkan tetap *feasible* diproduksi oleh industri lokal [6], [8], [18].

Metode analisis pada penelitian ini terdiri dari analisis numerik dan analisis statistik. Analisis numerik dilakukan melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memodelkan karakteristik aliran di dalam *flow field leaf vein*. Tujuannya adalah untuk mengetahui tingkat keseragaman distribusi gas dari nilai *uniformity index*, perubahan *pressure drop*, serta kecenderungan *water accumulation* berdasarkan nilai *Area Weighted Average* H_2O *mass fraction*. Selanjutnya, analisis statistik menggunakan DOE faktorial diterapkan untuk menyusun kombinasi variasi faktor dengan level terhadap respon. Data hasil simulasi kemudian dianalisis menggunakan ANOVA untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor serta interaksi antara *rib width* dan *channel depth* terhadap setiap respon penelitian. Desain yang dianggap optimal adalah desain yang mampu menghasilkan *pressure drop* yang lebih rendah, nilai *area weighted average* yang lebih rendah sebagai indikator *water accumulation*, serta distribusi gas merata dengan ditunjukkan oleh angka *uniformity index*. Hasil penelitian diharapkan mampu menghasilkan kombinasi parameter geometri *flow field leaf vein* yang optimal untuk meningkatkan karakteristik aliran gas pada PEMFC serta tetap *feasible* diproduksi menggunakan CNC 3-axis oleh industri lokal

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, desain *flow field* konvensional pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih memiliki kendala dalam menyeimbangkan distribusi gas, *pressure drop*, dan pengelolaan air. Kondisi ini dapat menyebabkan *flooding* yang menghambat aliran reaktan dan menurunkan kinerja sel. Desain *biomimetic leaf vein flow field* yang meniru pola tulang daun berpotensi menjadi solusi untuk mengatasi masalah tersebut. Namun, penelitian mengenai pengaruh variasi parameter geometrinya, terutama *rib width* dan *channel depth*, masih terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis pengaruh kedua parameter tersebut terhadap *pressure drop*, keseragaman distribusi gas, dan *water accumulation* sebagai indikator *flooding*, sehingga dapat diperoleh desain *flow field* yang dapat

© 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

meningkatkan kinerja PEMFC dan tetap memungkinkan untuk diproduksi menggunakan CNC 3-axis.

1.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang penelitian, pertanyaan penelitiannya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth* pada *leaf vein flow field* terhadap *pressure drop*?
2. Bagaimana pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth* pada desain *leaf vein flow field* terhadap *gas distribution*?
3. Bagaimana variasi *rib width* dan *channel depth* pada desain *leaf vein flow field* terhadap *water accumulation?*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth leaf vein flow field* terhadap *gas distribution* menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*).
2. Menganalisis pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth leaf vein flow field* terhadap *pressure drop* menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*).
3. Menganalisis pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth leaf vein flow field* terhadap *water accumulation* menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1.5.1 Manfaat Bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan wawasan bagi peneliti mengenai pengaruh desain *biomimetic leaf vein flow field* terhadap *pressure drop*, *flooding*, dan distribusi aliran gas pada pelat bipolar PEMFC melalui analisis CFD, serta pengalaman dalam perancangan dan evaluasi desain yang *feasible* diproduksi menggunakan CNC.

© 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

1.5.2 Manfaat Bagi Akademik

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan kajian ilmiah terkait desain *flow field biomimetic* pada pelat bipolar PEMFC dengan menyediakan analisis mengenai *pressure drop*, manajemen air, dan distribusi aliran gas, yang dapat digunakan sebagai referensi dan dasar pengembangan penelitian selanjutnya di bidang *fuel cell*.

1.6 Batasan Masalah

Dilakukan pembatasan ruang lingkup penelitian agar pembahasan dapat dilakukan secara lebih terfokus dan sistematis. Batasan yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada analisis desain *flow field biomimetic leaf vein* pada pelat bipolar *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC).
2. Variasi parameter geometrik dalam penelitian ini dibatasi hanya pada *rib width* (0.8 mm, 1 mm, dan 1.2 mm) dan *channel depth* (0.6 mm,0.8 mm, dan 1 mm).
3. Analisis utama untuk 9 desain hanya dilakukan untuk mengetahui *pressure drop* (ΔP), distribusi gas, dan *water accumulation* sebagai indikator *flooding* pada *flow field* di sisi katoda menggunakan *species transport* tanpa memodelkan persamaan kimia PEMFC
4. Perhitungan dan penentuan parameter pemesinan pada proses manufaktur, seperti *feed rate, spindle speed, cutting speed, depth of cut*, serta parameter mesin lainnya, berada di luar ruang lingkup penelitian ini dan tidak menjadi objek analisis.
5. Pengujian performa PEMFC dibatasi pada tegangan operasi 0,6 V, 0,7 V, dan 0,8 V. Oleh karena itu, penelitian ini tidak membahas performa PEMFC pada seluruh daerah kurva polarisasi dan tidak menentukan batas maupun kontribusi masing-masing *activation losses, ohmic losses*, dan *concentration losses.*
6. Deformasi struktural pelat bipolar akibat tekanan mekanik tidak diperhitungkan dalam simulasi.

© 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

1.7 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang penelitian mengenai pentingnya pengembangan desain *flow field* pada pelat bipolar PEMFC untuk menurunkan *pressure drop*, meningkatkaSn keseragaman distribusi gas, serta meminimalkan akumulasi air (*water accumulation*) yang dapat menyebabkan *flooding*. Bab ini juga memuat rumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian,

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori dan kajian pendukung yang relevan dengan penelitian. Pada bab ini dijelaskan konsep dasar *fuel cell* dan PEMFC, prinsip kerja, serta komponen utama seperti *bipolar plate*, GDL, MEA, *gasket*, *current collector*, dan *end plate*. Selain itu dipaparkan konsep desain *flow field* biomimetik khususnya *leaf vein flow field* beserta keterkaitannya terhadap distribusi reaktan dan manajemen air. Bab ini juga memuat teori-teori yang digunakan untuk mengevaluasi respon penelitian, seperti pendekatan Darcy–Weisbach untuk penurunan tekanan (*pressure drop*), konsep distribusi gas dan *uniformity index*, serta konsep *area weighted average* untuk mengetahui konsentrasi uap air pada area aktif yang berpotensi menjadi air yg terakumulasi sehingga berisiko *flooding*. Selanjutnya dijelaskan perangkat lunak dan pendekatan analisis yang digunakan (pemodelan CAD dengan SolidWorks serta simulasi CFD dengan ANSYS Fluent), termasuk pengantar persamaan dasar aliran. Pada bagian akhir, Bab II dilengkapi dengan kajian literatur penelitian terdahulu dan kajian paten yang relevan sebagai pembanding serta penguat *novelty* penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan rancangan dan tahapan penelitian yang dilakukan. Bab ini memuat jenis penelitian dan objek penelitian, metode pengumpulan data melalui studi literatur, serta metode analisis data menggunakan simulasi CFD dan analisis statistik. Tahapan yang dibahas meliputi perancangan variasi geometri *leaf vein flow field*, penetapan faktor dan level (*rib width* dan *channel depth*), penyusunan

© 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

desain eksperimen (DOE) faktorial 3×3, proses simulasi pada ANSYS Fluent dan fabrikasi prototipe.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS Fluent serta analisis statistik terhadap pengaruh variasi *rib width* dan *channel depth* pada *flow field* biomimetik tipe *leaf vein*. Parameter yang dianalisis meliputi *pressure drop* (ΔP), *water accumulation* berdasarkan nilai *area weighted average* H_2O, dan *gas distribution* berdasarkan nilai *Uniformity Index* (UI) O_2. Hasil simulasi tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor serta interaksi antar faktor terhadap respon yang diamati. Selain itu, dilakukan simulasi menggunakan PEMFC *Module* pada desain terpilih untuk mengetahui performa *fuel cell* menggunakan desain pelat bipolar tersebut.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya.

© 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

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Variasi *rib width* dan *channel depth* berpengaruh signifikan terhadap perubahan *pressure drop*, dengan parameter *channel depth* menjadi faktor paling dominan. Semakin besar dimensi *rib width* dan *channel depth* yang digunakan, semakin luas diameter hidrolik salurannya, sehingga hambatan aliran menurun dan *pressure drop* yang dihasilkan semakin kecil.
2. Variasi *rib width* dan *channel depth* pada *leaf vein flow field* memberikan pengaruh terhadap keseragaman distribusi gas oksigen dengan nilai Uniformity Index (UI) pada seluruh variasi desain yang berada pada rentang 0,999863 hingga 0,999964 mendekati angka 1 menandakan bahwa gas terdistribusi secara merata ke seluruh saluran.
3. Variasi *rib width* dan *channel depth* pada *leaf vein flow field* menunjukkan perubahan nilai yang relatif kecil terhadap nilai *water accumulation* yang direpresentasikan oleh *area weighted average* fraksi massa uap air. Nilai *area weighted average* pada seluruh variasi desain berada pada rentang yang sangat sempit, yaitu 0,149987–0,150030, Kondisi ini menujukkan bahwa desain *leaf vein* dikatakan stabil dalam menjaga manajemen air.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian eksperimental secara fisik. Hal ini diperlukan untuk memvalidasi data hasil simulasi CFD dan mengetahui performa aktual sel bahan bakar (PEMFC) secara menyeluruh
2. Penelitian selanjutnya disarankan penulis memiliki pemahaman yang lebih mendalam mengenai reaksi elektrokimia pada PEMFC sehingga simulasi tidak hanya mengevaluasi karakteristik aliran fluida, tetapi juga mampu memprediksi performa elektrokimia, seperti distribusi rapat arus (*current density*), tegangan sel (*cell voltage*), dan daya (*power output*).
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memodelkan proses kondensasi dan

pembentukan air cair secara eksplisit sehingga fenomena *water accumulation* dapat direpresentasikan secara lebih actual.

4. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperdalam pemahaman mengenai fitur dan pengaturan (*setup*) pada ANSYS Fluent, seperti pengaturan *mesh*, *solver method*, *residual graph*, dan lain - lain. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan simulasi yang lebih optimal dan sesuai dengan kondisi aktual.

© 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

© 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

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. S. Barhate and R. Mudhalwadkar, "Proton exchange membrane fuel cell fault and degradation detection using a coefficient of variance method," *Journal of Energy Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 20–34, Mar. 2021, doi: 10.30521/jes.817879.

[2] X. Wang, X. Dong, Z. Zhang, and Y. Wang, "Transportation carbon reduction technologies: A review of fundamentals, application, and performance," Dec. 01, 2024, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.jtte.2024.11.001.

[3] S. Mo *et al.*, "Recent Advances on PEM Fuel Cells: From Key Materials to Membrane Electrode Assembly," Dec. 01, 2023, *Springer*. doi: 10.1007/s41918-023-00190-w.

[4] C. Kim and Y. Na, "Enhancing power density of PEMFC with narrow distribution zone using parallel serpentine hybrid flow field," *Renew. Energy*, vol. 241, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2024.122315.

[5] K. Xiong, W. Wu, S. Wang, and L. Zhang, "Modeling, design, materials and fabrication of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell: A review," *Appl. Energy*, vol. 301, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117443.

[6] Z. Wang *et al.*, "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, pp. 308–319, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.015.

[7] N. A. A. Qasem, "A recent overview of proton exchange membrane fuel cells: Fundamentals, applications, and advances," Sep. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123746.

[8] P. Huang *et al.*, "Stainless steel bipolar plate fuel cell with different flow field structures prepared by laser additive manufacturing," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 183, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122186.

[9] P. Lin *et al.*, "Numerical and experimental study on designs and performances of multi-serpentine flow field with bend-area block for proton exchange membrane fuel cell," *Fuel*, vol. 368, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131617.

[10] C. Wang *et al.*, "The respective effect of under-rib convection and pressure drop of

© 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

flow fields on the performance of PEM fuel cells," *Sci. Rep.*, vol. 7, Mar. 2017, doi: 10.1038/srep43447.

[11] Y. Wang *et al.*, "Review of Flow Field Designs for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," May 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16104207.

[12] S. T. Bunyan, H. A. Dhahad, D. S. Khudhur, and T. Yusaf, "The Effect of Flow Field Design Parameters on the Performance of PEMFC: A Review," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su151310389.

[13] Y. Lian, Q. Xie, and M. Zheng, "Investigation on the optimal angle of a flow-field design based on the leaf-vein structure for PEMFC," *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 262–268, Dec. 2020, doi: 10.14447/JNMES.V23I4.A07.

[14] F. B. Baz, R. M. Elzohary, S. Osman, S. A. Marzouk, and M. Ahmed, "A review of water management methods in proton exchange membrane fuel cells," Feb. 15, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.enconman.2024.118150.

[15] B. Gao, H. Yan, Y. Jiang, and F. Yu, "Optimization design of proton exchange membrane fuel cells with bio-inspired leaf vein flow channels," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, pp. 645–664, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.08.014.

[16] B. Gao, H. Yan, Y. Jiang, and F. Yu, "Optimization design of proton exchange membrane fuel cells with bio-inspired leaf vein flow channels," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, pp. 645–664, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.08.014.

[17] F. Xiao, T. Chen, zhongyu Gan, Y. Lan, and Z. Chen, "Flow field design and parameter optimization of PEMFC based on leaf vein structure," *Renew. Energy*, vol. 241, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2024.122317.

[18] F. Xiao, T. Chen, zhongyu Gan, Y. Lan, and Z. Chen, "Flow field design and parameter optimization of PEMFC based on leaf vein structure," *Renew. Energy*, vol. 241, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2024.122317.

[19] H. Ma and F. Widiharsa, "FUEL CELL SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF PENGISI BATERAI DENGAN PENGENDALI PANAS," 2016.

[20] F. Ramadhani, M. A. Hussain, and H. Mokhlis, "A comprehensive review and

© 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

technical guideline for optimal design and operations of fuel cell-based cogeneration systems," 2019, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/pr7120950.

[21] 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," *Micromachines (Basel).*, vol. 13, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/mi13050665.

[22] 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.*, vol. 164, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114464.

[23] D. Bokach, S. ten Hoopen, N. Muthuswamy, M. E. M. Buan, and M. Rønning, "Nitrogen-doped carbon nanofiber catalyst for ORR in PEM fuel cell stack: Performance, durability and market application aspects," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 39, pp. 17616–17630, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.137.

[24] L. Xing *et al.*, "Membrane electrode assemblies for PEM fuel cells: A review of functional graded design and optimization," Jun. 15, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.084.

[25] L. Rostami, P. Mohamad Gholy 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, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.132.

[26] D. Gopalasingam, B. Rakhshani, and C. Rodriguez, "Hydrogen Propulsion Technologies for Aviation: A Review of Fuel Cell and Direct Combustion Systems Towards Decarbonising Medium-Haul Aircraft," *Hydrogen*, vol. 6, no. 4, p. 92, Oct. 2025, doi: 10.3390/hydrogen6040092.

[27] Z. Zhang, J. Zhang, Y. Shang, and T. Zhang, "Study on the Optimal Cross-Sectional Shapes of the PEMFC Endplates by Using a Moment of Inertia and 3D FEM Models," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/su141912939.

[28] B. A. Braz, C. S. Moreira, V. B. Oliveira, and A. M. F. R. Pinto, "Effect of the current collector design on the performance of a passive direct methanol fuel cell,"

© 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

Electrochim. Acta, vol. 300, pp. 306–315, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.electacta.2019.01.131.

[29] A. P. Manso, F. F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, and M. Garmendia Mujika, "Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review," 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.076.

[30] T. Wilberforce, O. Ijaodola, A. Baroutaji, E. Ogungbemi, and A. G. Olabi, "Effect of Bipolar Plate Material on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance," *Energies (Basel).*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15051886.

[31] K. M. Cheon, U. E. Akpudo, A. B. Kareem, O. C. Nwabufo, H. R. Jeon, and J. W. Hur, "An FEA-Assisted Decision-Making Framework for PEMFC Gasket Material Selection," *Energies (Basel).*, vol. 15, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15072580.

[32] S. T. Alam Rimon, S. R. Shajid, M. Mourshed, and M. S. Hasan Khan Tushar, "Flow field configurations in PEMFCs: Design, Modeling, and performance insights," Oct. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101263.

[33] Y. Wang *et al.*, "Review of Flow Field Designs for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," May 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16104207.

[34] C. Putri, "PENGARUH LAMA WAKTU PEWARNAAN TERHADAP LAJU KOROSI DAN KETAHANAN ASAM PADA ALUMINIUM 5052 MELALUI PROSES ANODIZING MENGGUNAKAN PEWARNA ALAMI TEMULAWAK," 2025.

[35] J. Arif, Pungkas Prayitno, and Halan Al Hafidh, "Analisis static pada aluminium 5052 dengan variasi sudut menggunakan solidworks," *TEKNOSAINS : Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika*, vol. 10, no. 1, pp. 38–50, Jan. 2023, doi: 10.37373/tekno.v10i1.269.

[36] T. Bohackova, J. Ludvik, and M. Kouril, "Metallic material selection and prospective surface treatments for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates—a review," 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma14102682.

[37] R. Sukarno, W. Sugita, and A. Syaefudin, "PELATIHAN DASAR-DASAR CAD/CAM/CAE DAN SOFTWARE AUTOCAD UNTUK GURU-GURU SMK BIDANG KEAHLIAN TEKNIK MESIN DI WILAYAH KABUPATEN BEKASI."

© 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

[38] D. Patil and S. Kadam, "Basics of computational fluid dynamics: An overview," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1130/1/012042.

[39] Musa Abbasov, "Investigating pressure drops and flow uniformity in fuel cell flow channels.," 2022.

[40] Q. Song *et al.*, "Performance Improvement of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by a New Coupling Channel in Bipolar Plate," *Energies (Basel).*, vol. 18, no. 15, Aug. 2025, doi: 10.3390/en18154068.

[41] 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," *American Journal of Energy Research*, vol. 9, no. 2, pp. 84–91, Oct. 2021, doi: 10.12691/ajer-9-2-2.

[42] K. Liu, Y. Liu, Q. Han, P. Pei, L. Zhang, and H. Sun, "Enhancing PEMFC performance through dome-like variable cross-section channels: A study on mass transfer and power density optimization," *International Journal of Electrochemical Science* , vol. 20, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2024.100920.

[43] X. Chen *et al.*, "Performance study on a stepped flow field design for bipolar plate in PEMFC," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 336–347, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.01.003.

[44] Moh Nurkhamal, V. Rizkia, Vina Nanda Garjati, and Radhi Maladzi, "Enhancing Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Performance through Optimized Design of Parallel Channel Bipolar Plates," *Recent in Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 01, pp. 42–57, Jan. 2025, doi: 10.59511/riestech.v3i01.94.

[45] L. S. M. Mathiyazhagan S, "Validating Analytical and Numerical Predictions of Hydrodynamic Characteristics in Microchannel with Experimental Results," 2022.

[46] "Fundamental Mass Transfer Concepts in Engineering Applications."

[47] M. S. H. Talukder, "Thermofluids," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 13, no. 05, pp. 22–29, May 2016, doi: 10.9790/1684-1305022229.

[48] T. Q. R. Engineering and M. Kaplan, "A Numerical Parametric Study on the Impacts of Mass Fractions of Gas Species on PEMFC Performance," *The Asian*

© 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

Institute of Research Engineering and Technology Quarterly Reviews, vol. 5, no. 2, pp. 38–45, 2022, [Online]. Available: https://www.asianinstituteofresearch.org/

[49] M. Sajid 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*, vol. 42, no. 8, pp. 5272–5283, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.042.

[50] Z. Xia, H. Chen, W. Shan, R. Zhang, T. Zhang, and P. Pei, "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," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 36, pp. 13650–13668, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.187.

[51] M. Wu *et al.*, "Performance Analysis of PEMFC with Non-Equidistant Depth 3D Flow Field," *ACS Omega*, vol. 11, no. 6, pp. 10785–10797, Feb. 2026, doi: 10.1021/acsomega.5c13005.

[52] D. Gong, S. Xu, and Y. Gao, "Investigation of Water and Heat Transfer Mechanism in PEMFCs Based on a Two-Phase Non-Isothermal Model," *Energies (Basel).*, vol. 16, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020697.

[53] A. Janković, 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," *Journal of Building Engineering*, vol. 102, May 2025, doi: 10.1016/j.jobe.2025.111931.

[54] A. Jankovic, G. Chaudhary, and F. Goia, "Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems," *Energy Build.*, vol. 250, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111298.

[55] A. Apriyani and P. Hernowo, "Prosiding Semnastek FT-UBJ 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."

[56] A. Amiruddin and S. Lubis, "Effectiveness of CNC Turning and CNC Milling in

© 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

Machining Process," *International Journal of Economic, Technology and Social Sciences*, vol. 2, pp. 575–583.

[57] H. TARIGAN, "ANALISA PENGARUH KECEPATAN PEMAKANAN DAN WAKTU PEMBERIAN PENDINGIN TERHADAP KEAUSAN HASIL PERMESINAN CNC MILLING PADA BAJA ST 40," 2025.

[58] F. Nayorama, "ANALISA SUMBU Z PADA PROSES KALIBRASI DAN PERGERAKAN MESIN CNC ROUTER," 2016.

[59] R. Maladzi *et al.*, "Optimization of Bipolar Plate Machining Process Using the Taguchi Method on CNC 3-Axis," *Recent in Engineering Science and Technology*, vol. 4, no. 01, pp. 42–48, Jan. 2026, doi: 10.59511/riestech.v4i01.140.

[60] A. Sulton, "RANCANG BANGUN MESIN MINI CNC MILING PORTABEL SKALA LABORATORIUM.," 2023.

[61] Hanafusa, "US10218007."

[62] "US11652219".

[63] L.-T. Horst, "US011152627."

[64] E. Carcadea *et al.*, "Effects of geometrical dimensions of flow channels of a large-active-area PEM fuel cell: A CFD study," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 25, pp. 13572–13582, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.150.

[65] M. Z. Chowdhury, O. Genc, and S. Toros, "Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10798–10809, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.149.

[66] L. Xia, Z. Yu, G. Xu, S. Ji, and B. Sun, "Design and optimization of a novel composite bionic flow field structure using three-dimensional multiphase computational fluid dynamic method for proton exchange membrane fuel cell," *Energy Convers. Manag.*, vol. 247, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114707.

[67] D. K. Dang and B. Zhou, "Investigation of liquid water behaviors inside a PEMFC cathode with a leaf-like biomimetic flow field design based on Murray's Law," *Int. J. Green Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 577–591, 2022, doi: 10.1080/15435075.2021.1951739.

[68] D. K. Madheswaran, M. Thangamuthu, S. Gnanasekaran, S. Gopi, T. Ayyasamy,

© 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

and S. S. Pardeshi, "Powering the Future: Progress and Hurdles in Developing Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components to Achieve Department of Energy Goals—A Systematic Review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 22, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152215923.

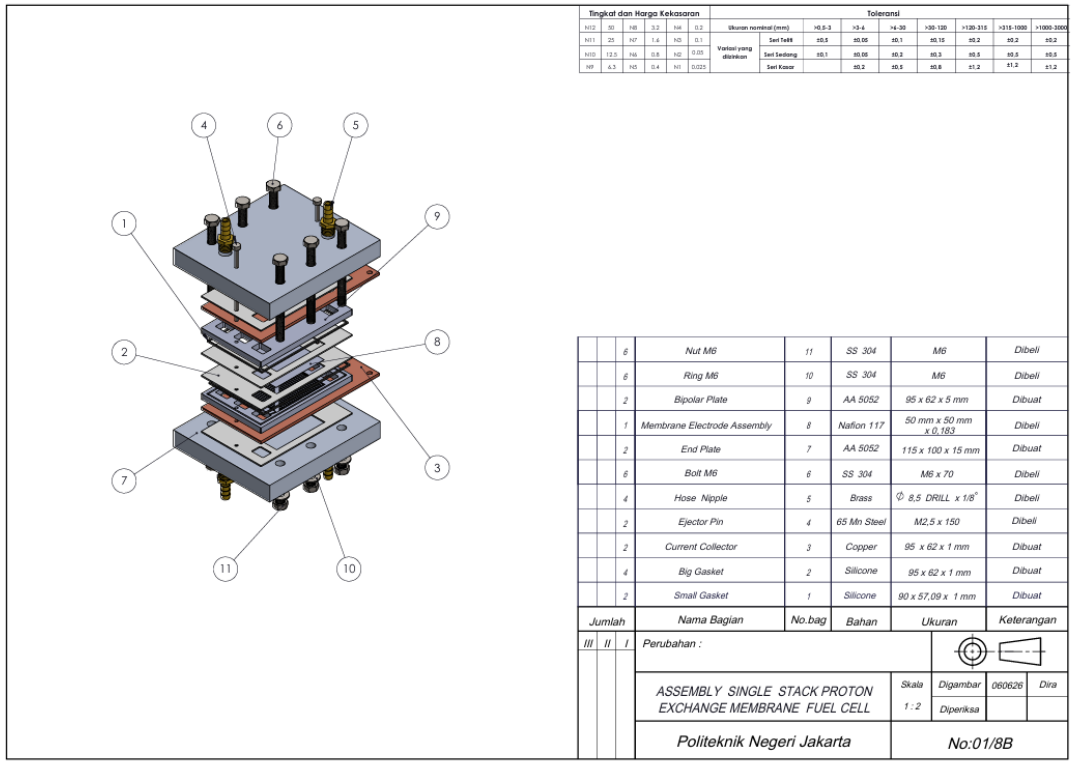
© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

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
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Drawing Assembly Proton Exchange Membran Fuel Cell



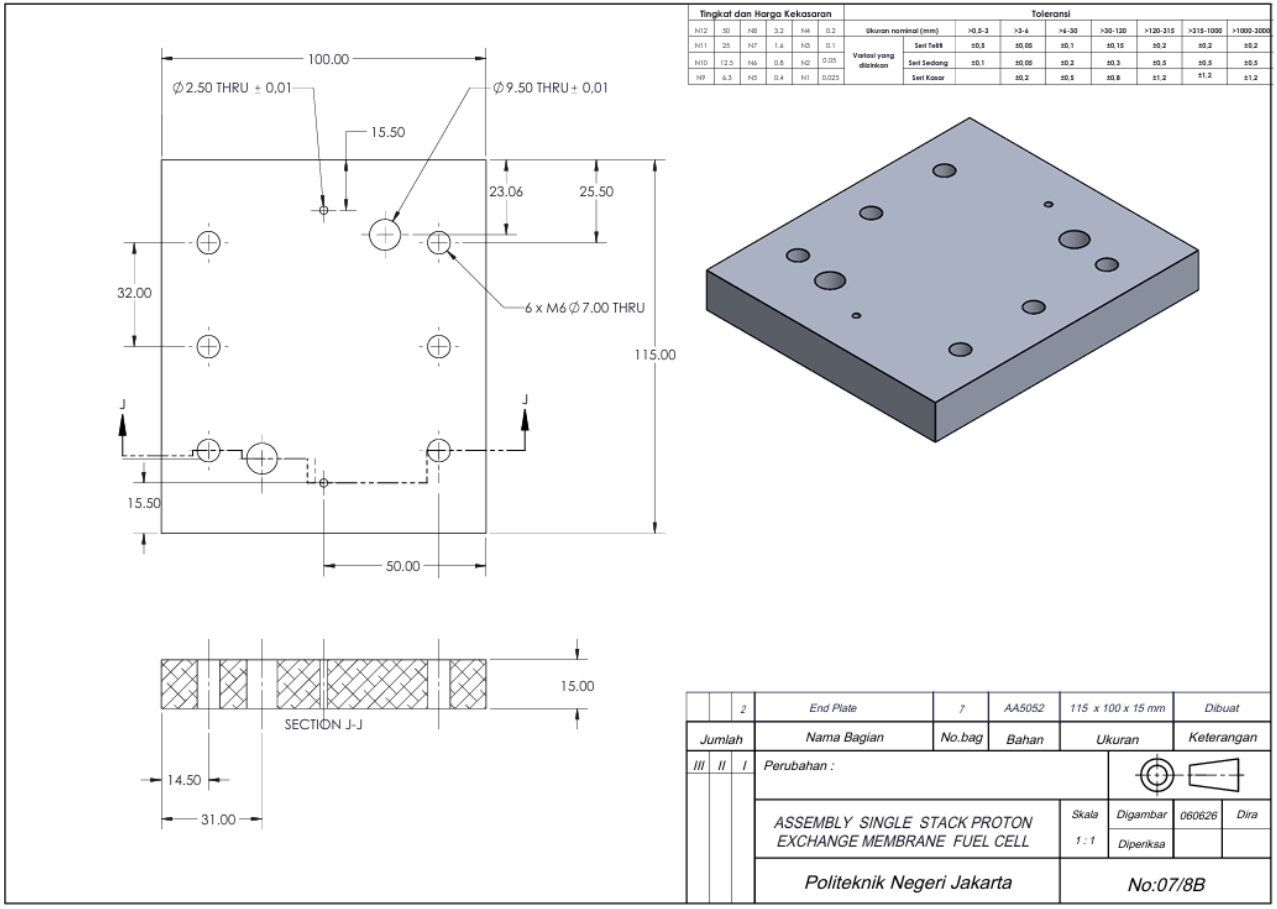
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

© 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, penulis
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 2 Drawing End Plate



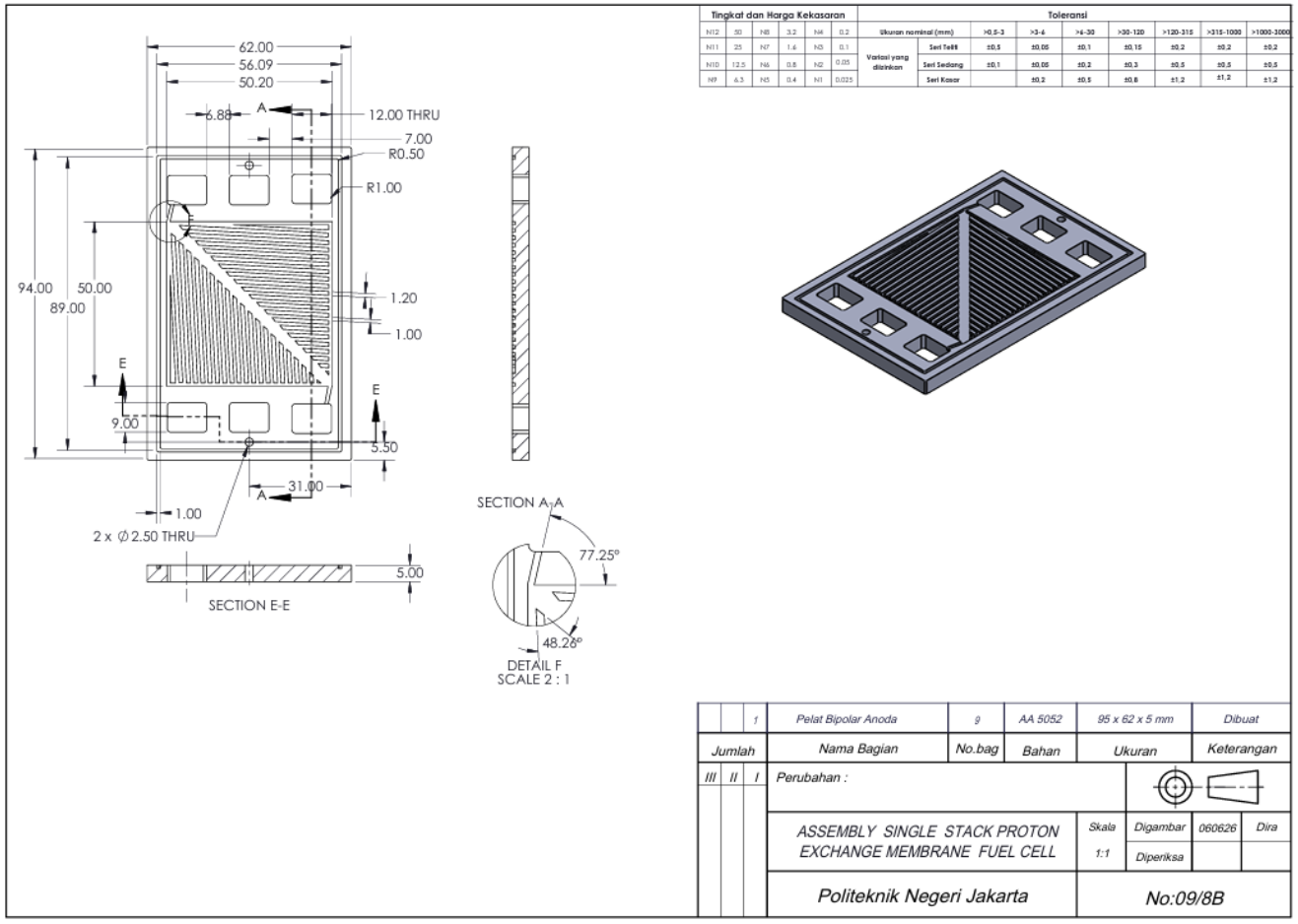
NEGERI JAKARTA

© 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, penulisa
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 3 Drawing Pelat Bipolar Anoda

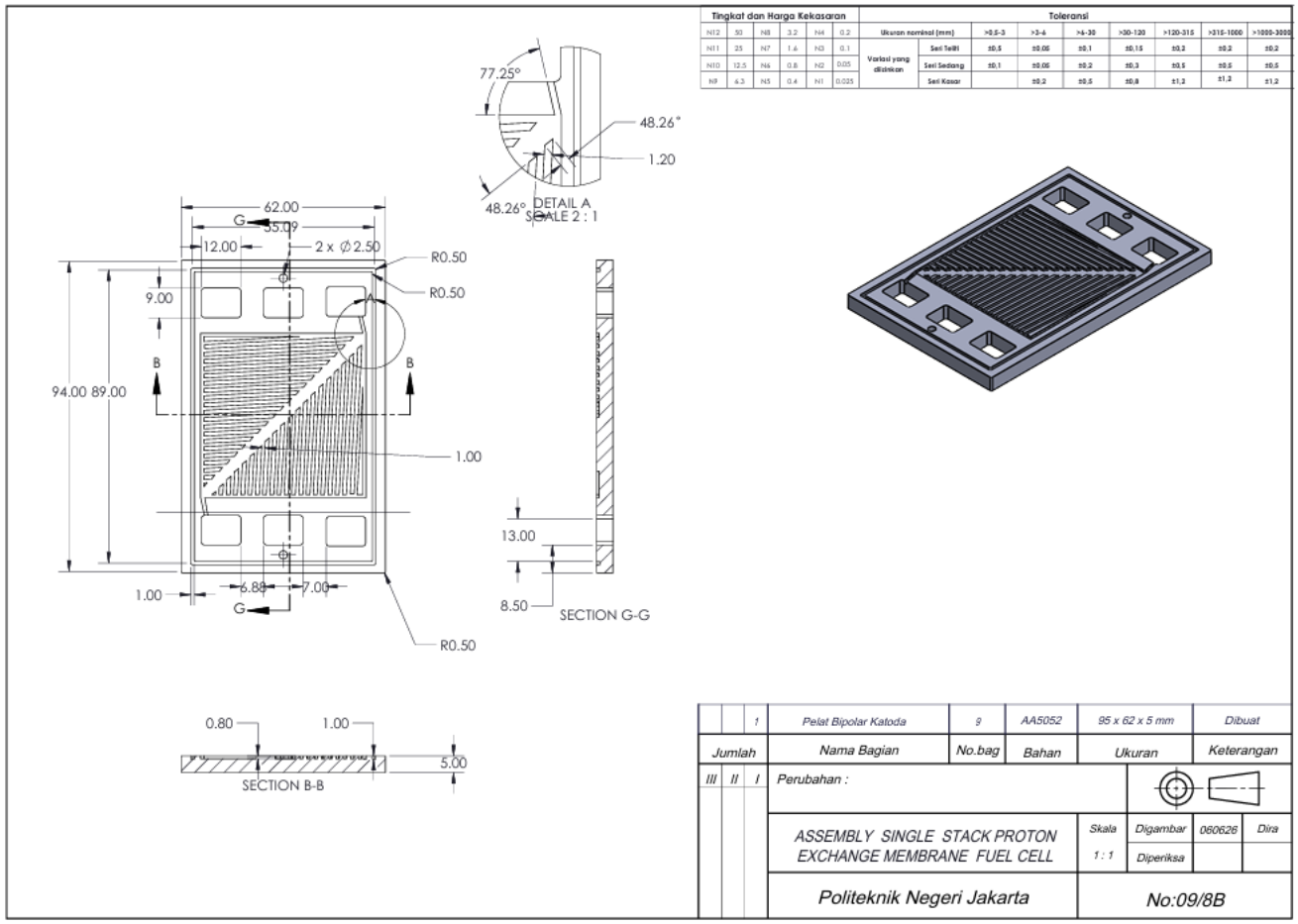


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

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
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 4 Drawng Pelat Bipolar Katoda

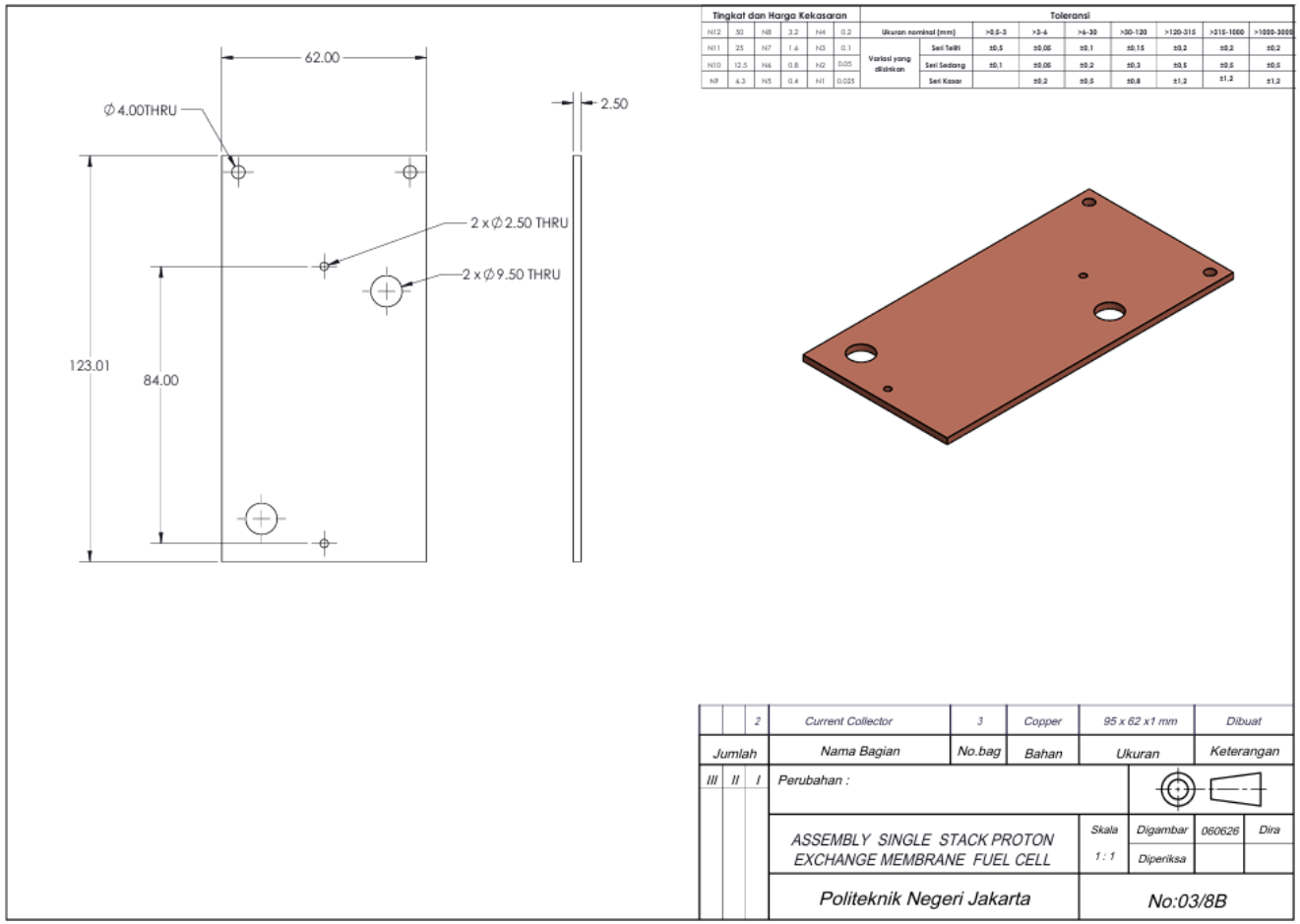


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

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, penulisa
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 5 Drawing Current Collector

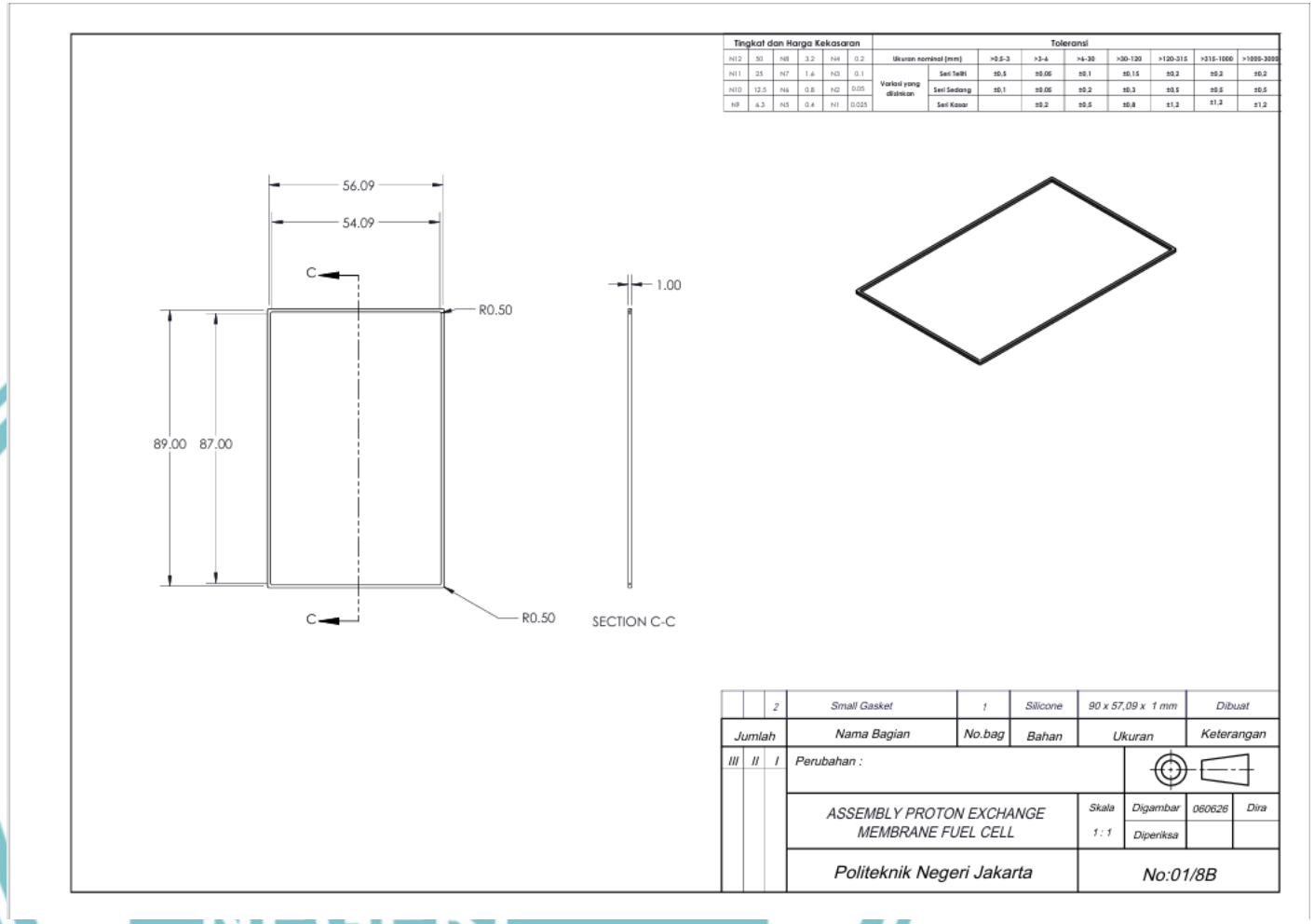


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

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
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 6 Drawing Small Gasket

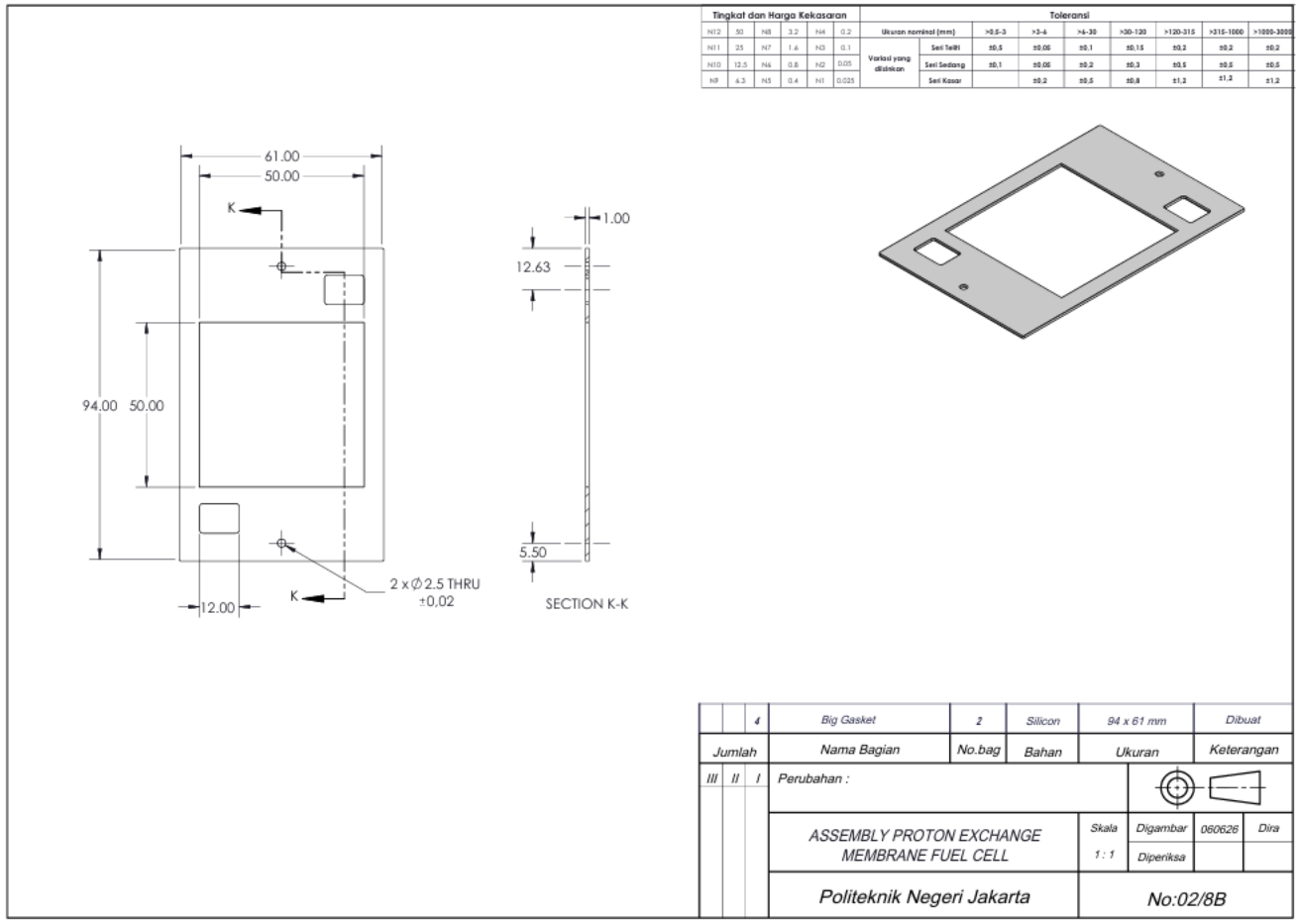


© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

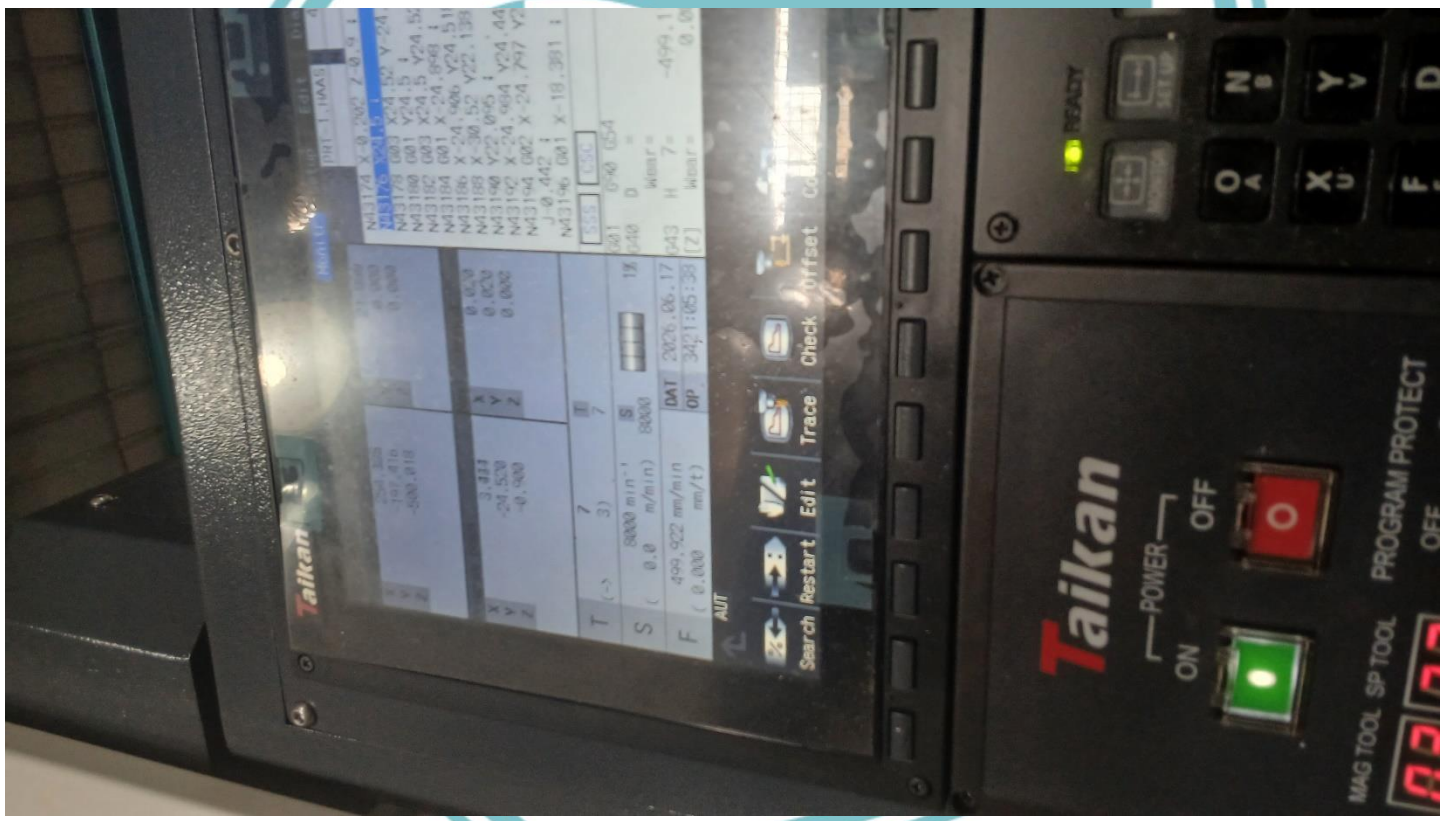
Hak Cipta :

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

Lampiran 7 Drawing Big Gasket



Lampiran 8 Parameter Mesin CNC



© 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

Lampiran 9 Komponen PEMFC Single Cell

© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

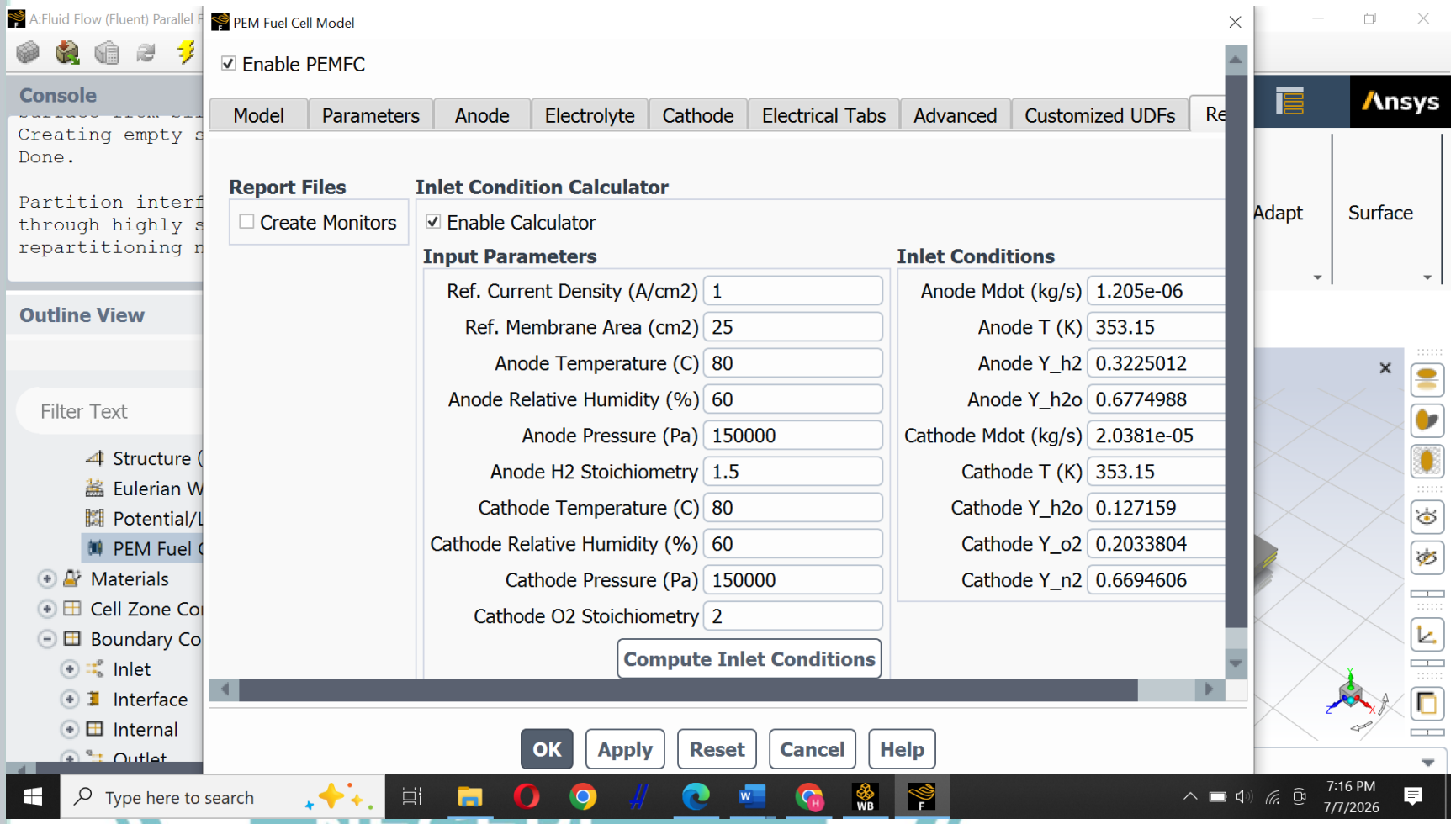
Hak Cipta :

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, penulisa
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

© 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, penulisa
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun

Lampiran 10 Inlet Calculator PEMFC Modul



Lampiran 11 Dokumentasi Proses Pemesinan Komponen PEMFC

© 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

© 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

Lampiran 12 Hasil ANOVA Gas Distribution

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	*P-value*
Model	8	0,000001	0,000000	284,14	0,000
Linear	4	0,000000	0,000000	282,52	0,000
Rib width	2	0,000000	0,000000	352,43	0,000
Channel Depth	2	0,000000	0,000000	212,61	0,000
2-Way Interactions	4	0,000000	0,000000	285,77	0,000
*Rib width**Channel Depth	4	0,000000	0,000000	285,77	0,000
Error	9	0,000000	0,000000		
Total	17	0,000001			

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

Lampiran 13 Hasil ANOVA Water Accumulation

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	*P-value*
Model	8	0,000000	0,000000	2,14	0,139
Linear	4	0,000000	0,000000	2,00	0,179
Rib width	2	0,000000	0,000000	3,42	0,079
Channel Depth	2	0,000000	0,000000	0,58	0,582
2-Way Interactions	4	0,000000	0,000000	2,28	0,139
*Rib width**Channel Depth	4	0,000000	0,000000	2,28	0,139
Error	9	0,000000	0,000000		
Total	17	0,000000			

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA