UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN Error! Bookmark not defined.

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI **iv**

NASKAH SOAL TUGAS AKHIR **v**

HALAMAN PERSEMBAHAN **vi**

KATA PENGANTAR **vii**

DAFTAR ISI **x**

DAFTAR GAMBAR **xiv**

DAFTAR TABEL **xvii**

DAFTAR LAMPIRAN **xviii**

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN **xxi**

INTISARI **xxiv**

ABSTRACT **xxv**

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Asumsi dan Batasan Masalah 4

1.5 Manfaat Penelitian 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **5**

2.1 *Fuel Cell* Secara Umum 5

2.1.1 Pemahaman umum dan klasifikasi fuel cell 5

2.1.2 *Polymer electrolyte membrane* & permeabilitas liquid 5

2.2 Pembentukan air pada PEMFC **6**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2.1 Proses kimia fuel cell 6
2.2.2 Metode transpor massa pada membran 7
2.2.3 Perbandingan kinerja fuel cell ideal vs praktis 8
2.2.4 Fenomena dehidrasi membran pada PEMFC 8
2.2.5 Fenomena “flooding” pada PEMFC 8
2.3 Studi sebelumnya tentang metode pengujian perpindahan dan pembentukan air PEMFC 9
2.3.1 *Pulsed-field gradient NMR (PFG-NMR)* 9
2.3.2 *Direct visualisation method* 9
2.3.3 *Streaming potential method* 10
2.3.4 *Concentration cell method* 10
2.4 Celah Penelitian dan Perkembangan Terkini 11
BAB III LANDASAN TEORI 13
3.1 Prinsip Kerja PEMFC 13
3.2 Komponen Fisik PEMFC 14
3.3 Prinsip Termodinamika dan Reaksi Elektrokimia pada PEMFC 19
3.3.1 Potensial sel reversibel 21
3.3.2 Efek kondisi operasi 21
3.3.3 Laju reaksi elektrokimia 23
3.3.4 Konstanta reaksi dan koefisien transfer 24
3.3.5 Kurva polarisasi 26
3.4 Mode Operasi PEMFC 30
3.4.1 Mode operasi open-end 31
3.4.2 Mode operasi dead-end anoda 32
3.5 Pembentukan dan Transport Air 33

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.5.1 Pembentukan air 33
3.5.2 Transport air 35
3.5.3 Fenomena flooding 36
3.6 Proses *Purging* 37
3.6.1 Pembagian rezime *purging* 37
3.6.2 Dinamika transportasi air membran (PEM menuju CCL) 39
3.6.3 Kinetika desorpsi pada ionomer lapisan katalis (CCL) 40
3.6.4 Kondisi batas dan transisi rezime pengeringan 41
3.6.5 Pemodelan *purging* 43
3.7 Akuisisi Data dengan Hygrometer **46**
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN **48**
4.1 Konfigurasi Pengujian 48
4.1.1 Skematik penelitian 48
4.1.2 Diagram alir penelitian 51
4.1.3 Perangkat penelitian 52
4.2 Kondisi Pengujian 53
4.2.1 Kendali pengujian 53
4.2.2 Variabel bebas 53
4.2.3 Variabel masukkan simulasi 54
4.3 Metode Pengujian 55
4.3.1 Perakitan fasilitas uji dan uji kebocoran 56
4.3.2 Kalibrasi instrumen 57
4.3.3 Pengkondisian membran dan aktivasi pembebanan 61
4.3.4 *Purging* pasca pembebanan 62
4.4 Metode Analisis Data Eksperimen 63

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.5 Simulasi Matlab 64

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 67

5.1 Kuantifikasi Pembentukan Air 67

5.1.1 Logging kelembapan relatif 67

5.1.2 Kuantifikasi pembentukan air pada katoda 69

5.1.3 Kuantifikasi pembentukan air pada anoda 71

5.2 Pengaruh Arus dan Suhu Terhadap Perpindahan Air 73

5.3 Simulasi *Purging* 77

5.3.1 Perbandingan grafik kelembapan relatif 77

5.3.2 Perbandingan grafik massa air 82

BAB VI HASIL DAN KESIMPULAN 87

6.1 Kesimpulan 87

6.2 Saran 88

DAFTAR PUSTAKA 90

LAMPIRAN 92

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Reaksi Elektrokimia pada PEMFC. 13
Gambar 3. 2 Komponen PEMFC Sel Tunggal. 15
Gambar 3. 3 Geometri saluran medan aliran yang umum digunakan: (a) paralel, (b) serpentine, (c) paralel serpentine, (d) *interdigitated*. 16
Gambar 3. 4 Struktur Polimer PFSA. 19
Gambar 3. 5 Macam-macam kerugian elektrokimia pada *fuel cell.* 30
Gambar 3. 6 Mode operasi *fuel cell*: (a) *Dead-End Anode* (b) *Open-End Anode.* 31
Gambar 3. 7 Mode operasi *fuel cell anode recirculation* menggunakan pompa (atas) dan menggunakan ejector (bawah). 32
Gambar 3. 8 Skematik fitur mikro-struktural Nafion untuk kandungan air rendah dan tinggi. 34
Gambar 3. 9 Contoh pembagian rezime pada proses *purging.* 39
Gambar 3. 10 Kode fungsi pada rezime 1. 44
Gambar 3. 11 Kode fungsi pada rezime 2. 45
Gambar 3. 12 diagram blok pada pemodelan aplikasi Matlab Simulink. 46
Gambar 4.1 Skematik P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) fasilitas uji 48
Gambar 4.2 Meja kerja alat pengujian. 49
Gambar 4.3 paket perangkat *fuel cell* Thinkru Hydrogen T-ALF-100-500 dengan sel tunggal. 50
Gambar 4.4 Diagram alir penelitian. 51
Gambar 4.5 Skematik P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) fasilitas uji kalibrasi *hygrometer.* 58
Gambar 4.6 tampak fasilitas uji kalibrasi *hygrometer.* 58
Gambar 4.7 Grafik kalibrasi kalibrasi *hygrometer.* 59
Gambar 4.8 Kurva respons pembacaan *hygrometer* PCE DPM-3 pada pergantian aliran basah ke kering. 60
Gambar 4.9 Perbandingan kurva respons pembacaan *hygrometer* PCE DPM-3 dengan simulasi. 61
Gambar 4.10 Sistem pemodelan pseudo-2 Dimensi pada aplikasi Matlab Simulink. 65

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.1 Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging.* 68
Gambar 5.2 Pembagian rezime *purging.* 69
Gambar 5.3 Pembentukan air pada GDL sisi katoda pengujian suhu 40 °C. 70
Gambar 5.4 Pembentukan air pada GDL sisi katoda pengujian suhu 50 °C. 70
Gambar 5.5 Pembentukan air pada GDL sisi anoda pengujian suhu 40 °C. 73
Gambar 5.6 Pembentukan air pada GDL sisi anoda pengujian suhu 50 °C. 73
Gambar 5.7 Perbandingan massa air pada GDL sisi katoda pengujian arus 1 A. 74
Gambar 5.8 Perbandingan massa air pada GDL sisi katoda pengujian arus 1.75 A. 75
Gambar 5.9 Perbandingan massa air pada GDL sisi katoda pengujian arus 2.5 A. 76
Gambar 5.10 Contoh perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 2.5 A waktu pembebanan 10 menit. 78
Gambar 5.11 Contoh terjadinya bump pada pengujian suhu 50 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 20 menit. 79
Gambar 5.12 Contoh terjadinya *bump* pada pengujian suhu 50 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 30 menit. 80
Gambar 5.13 Contoh terjadinya *bump* pada pengujian suhu 50 °C arus 2.5 A waktu pembebanan 20 menit. 80
Gambar 5.14 Contoh terjadinya *bump* pada pengujian suhu 50 °C arus 2.5 A waktu pembebanan 30 menit. 81
Gambar 5.15 Terjadinya pelandaian asimtotik pada pengujian suhu 40 °C arus 2.5 A waktu pembebanan 30 menit. 82
Gambar 5.16 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 40 °C arus 1 A. 83
Gambar 5.17 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 40 °C arus 1.75 A. 83
Gambar 5.18 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 40 °C arus 2.5 A. 84
Gambar 5.19 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 50 °C arus 1 A. 84

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.20 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 50 °C arus 1.75 A. 84

Gambar 5.21 Perbandingan massa air yang terbentuk di katoda pada pengujian suhu 50 °C arus 2.5 A. 85

Gambar 5.22 Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian, simulasi, dan simulasi fisis sebelum diberikan waktu jeda. 86

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi teknis pelat bipolar. 17
Tabel 3. 2 Nilai entalpi dan entropi hidrogen, oksigen, dan air pada suhu 25 °C. 20
Tabel 4. 1 Spesifikasi Teknis paket perangkat *fuel cell* Thinkru Hydrogen T-ALF-100-500. 50
Tabel 4. 2 Spesifikasi Teknis MEA Gore-Select M665.12. 51
Tabel 4. 3 Variabel kendali dan metode kendali. 53
Tabel 4. 4 Matrix variabel bebas. 54
Tabel 4. 5 Variabel masukkan simulasi *purging* pasca pembebanan. 55

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 92
Lampiran 2. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 92
Lampiran 3. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 93
Lampiran 4. Pembacaan kelembapan relatif pada proses purging pada pengujian suhu 40°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 93
Lampiran 5. Pembacaan kelembapan relatif pada proses purging pada pengujian suhu 40°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 94
Lampiran 6. Pembacaan kelembapan relatif pada proses purging pada pengujian suhu 40°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 94
Lampiran 7. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 95
Lampiran 8. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 95
Lampiran 9. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 40°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 96
Lampiran 10. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 96
Lampiran 11. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 97
Lampiran 12. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 97
Lampiran 13. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 98
Lampiran 14. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 98
Lampiran 15. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 1.75 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 99

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Lampiran 16. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 10 menit. 99
Lampiran 17. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 20 menit. 100
Lampiran 18. Pembacaan kelembapan relatif pada proses *purging* pada pengujian suhu 50°C arus 2.5 A dengan waktu pembebanan 30 menit. 100
Lampiran 19. Kode fungsi matlab simulink pergantian fase rezime halaman 1. 101
Lampiran 20. Kode fungsi matlab simulink pergantian fase rezime halaman 2. 102
Lampiran 21. Kode matlab iterasi massa yang tersimpan pada GDL halaman 1. 103
Lampiran 22. Kode matlab iterasi massa yang tersimpan pada GDL halaman 2. 104
Lampiran 23. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 1 A waktu pembebanan 10 menit. 104
Lampiran 24. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 1 A waktu pembebanan 20 menit. 105
Lampiran 25. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 1 A waktu pembebanan 30 menit. 105
Lampiran 26. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 10 menit. 106
Lampiran 27. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 20 menit. 106
Lampiran 28. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 30 menit. 107
Lampiran 29. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 40 °C arus 2.5 A waktu pembebanan 10 menit. 107
Lampiran 30. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 1 A waktu pembebanan 10 menit. 108
Lampiran 31. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 1 A waktu pembebanan 20 menit. 108
Lampiran 32. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 1 A waktu pembebanan 30 menit. 109

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Lampiran 33. Perbandingan kurva kelembapan relatif hasil pengujian dengan simulasi pada pengujian suhu 50 °C arus 1.75 A waktu pembebanan 10 menit. 109

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

ACL : *Anode Catalyst Layer*

AFC : *Alkaline Fuel Cell*

CCD : *Charged Coupled Devices*

CCL : *Cathode Catalyst layer*

CL : *Catalyst layer*

DEA : *Dead End Anode*

DEN : Dewan Energi Nasional

DMFC : *Direct Methanol Fuel Cell*

EBT : Energi Baru Terbarukan

EOD : *Electro-osmotic drag*

ESDM : Energi dan Sumber Daya Mineral

GDL : *Gas Diffusion Layer*

GRK : Gas Rumah Kaca

MCFC : *Molten Carbonate Fuel Cell*

MEA : *Membrane Electrode Assembly*

NZE : *Net Zero Emission*

OCV : *Open Circuit Voltage*

ORR :*Oxygen Reduction Reaction*

PAFC : *Phosphoric Acid Fuel Cell*

PBB : Persatuan Bangsa Bangsa

PEM : *Proton Exchange Membrane*

PEMFC : *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

PFG-NMR : Pulsed-Field Gradient Nuclear Magnetic Resonance

PTFE : Polietilen Tetrafluoroetilen

RH : *Relative Humidity*

SOFC : *Solid Oxide Fuel Cell*

TPB : *Triple Phase Boundary*

ΔG : Energi bebas Gibbs

$\overline{\Delta S^{\circ}}$: Perubahan Entropi

F : Konstanta Faraday

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

E^o : Potensial Sel Reversibel standard pada suhu 25°C

ΔH : Perubahan Entalpi

R : Konstanta Gas Universal

I : Arus

i : Flux Arus / Rapat Arus

j : Flux molekul

k_f : Koefisien Reaksi Reduksi

k_b : Koefisien Reaksi Oksidasi

R_i : hambatan total

$R_{i,i}$: hambatan ionic

$R_{i,e}$: hambatan elektronik

$R_{i,c}$: hambatan kontak

C_B : konsentrasi massal reaktan

j_D : Flux mol reaktan difusi

J_{EOD} : Flux mol reaktan *electro-osmotic drag*

D : Koefisien difusi

A : Luas area elektroda

δ : jarak difusi

ρ_{mem} : densitas kering membrane

M_{eq} : massa ekuivalen relatif membran

λ : kandungan air

n_d : koefisien *electro-osmotic drag*

H_{mem} : ketebalan membran

H_{cl} : ketebalan lapisan katalis

H_{gdl} : ketebalan *Gas Difffusion Layer*

ε_{cl} : porositas lapisan katalis

ε_{gdl} : porositas *Gas Difffusion Layer*

D_h : Diameter hidrolik

D_{v,N_2} : koefisien difusi uap air dalam nitrogen

C_{sat} : konsentrasi uap air tersaturasi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Arus dan Suhu kepada Pembentukan dan Perpindahan Air pada Fuel Cell Sel Tunggal
Naufal Athiyya Hammam, Dr. Ir. Jayan Sentanuhady, S.T., M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

C_{gas_inlet}	: konsentrasi uap air yang masuk
m_{liq}	: massa air dalam fase cair yang tersimpan dalam *Gas Difffusion Layer*
$m_{critical}$	: massa air kritis
y	: RH bacaan hygrometer setelah jeda
x	: RH fisis *realtime*