

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b>	<b>v</b>
<b>NASKAH SOAL TUGAS AKHIR</b>	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xxiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	<b>xxv</b>
<b>DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN</b>	<b>xxvi</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xxix</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxx</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Asumsi dan Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>5</b>
2.1. Perbandingan Jenis Teknologi <i>Fuel Cell</i>	5
2.2. <i>Dead-End Anode</i> PEM Fuel Cell	9
2.3. Pengujian Karakteristik DEA-PEMFC <i>Stack</i>	14
<b>BAB III DASAR TEORI</b>	<b>17</b>
3.1. <i>Fuel Cell</i>	17
3.1.1. Mesin konversi energi <i>fuel cell</i>	17
3.1.2. Perkembangan <i>fuel cell</i>	19
3.1.3. Jenis-jenis <i>fuel cell</i>	19
3.2. <i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>	20
3.2.1. Prinsip kerja <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	20

3.2.2.	Komponen penyusun <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	22
3.3.	Termodinamika Dasar dari <i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>	25
3.3.1.	Reaksi dasar <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	25
3.3.2.	Nilai kalor hidrogen	27
3.3.3.	Energi teoritis <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	29
3.3.4.	Tegangan teoritis <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	31
3.3.5.	Deviasi terhadap temperatur dan tekanan secara teoritis	32
3.3.6.	Efisiensi teoritis <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	33
3.3.7.	Penyimpangan efisiensi mesin Carnot pada <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	34
3.4.	Elektrokimia dari <i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>	35
3.4.1.	Kinetik elektroda	35
3.4.2.	<i>Losses</i> tegangan	39
3.4.3.	Kurva polarisasi tegangan	45
3.4.4.	Pengembangan kurva polarisasi	46
3.5.	Sistem <i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>	47
3.5.1.	Sistem penunjang <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	47
3.5.2.	Sistem jalur hidrogen	47
3.5.3.	Sistem jalur oksigen atau udara	49
3.5.4.	Sistem pendingin	50
3.5.5.	Sistem jalur elektrik dan kendali	50
3.5.6.	Efisiensi sistem <i>proton-exchange membrane fuel cell</i>	53
<b>BAB IV</b>	<b>METODE PENELITIAN</b>	<b>54</b>
4.1.	Lokasi Penelitian	54
4.2.	Instrumen Penelitian	54
4.2.1.	Komponen uji	54
4.2.2.	Skematik <i>testbench</i>	55
4.2.3.	Perangkat pada <i>testbench</i>	56
4.2.4.	Perangkat lunak	59
4.3.	Pengaturan Eksperimen	62
4.3.1.	Kontrol eksperimen	62

4.3.2. Variabel bebas	62
4.3.3. Luaran data	63
4.4. Metode Analisis dan Pengolahan Data	64
4.4.1. Metode analisis periode dan lama waktu <i>anode purging</i>	64
4.4.2. Metode analisis proses kendali yang terjadi	64
4.4.3. Metode pengolahan data konsumsi selama proses <i>anode purging</i>	64
4.4.4. Analisis performa <i>anode purging</i> dan performa <i>stack benchline</i>	64
4.5. Diagram Alir Penelitian	65
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>66</b>
5.1. Hasil <i>Data Logger</i> Pengujian <i>Fuel Cell</i>	66
5.1.1. Hasil <i>data logger</i> pengujian tanpa beban (0 Watt)	66
5.1.2. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 25 Watt	68
5.1.3. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 50 Watt	70
5.1.4. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 75 Watt	72
5.1.5. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 100 Watt	74
5.1.6. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 150 Watt	76
5.1.7. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 200 Watt	78
5.1.8. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 250 Watt	80
5.1.9. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 300 Watt	82
5.1.10. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 350 Watt	84
5.1.11. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 400 Watt	86
5.1.12. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 450 Watt	88
5.1.13. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 500 Watt	90
5.1.14. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 550 Watt	92
5.1.15. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 600 Watt	94
5.1.16. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 650 Watt	96
5.1.17. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 700 Watt	98
5.1.18. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 750 Watt	100
5.1.19. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 800 Watt	102

5.1.20. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 850 Watt	104
5.1.21. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 900 Watt	106
5.1.22. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 950 Watt	108
5.1.23. Hasil <i>data logger</i> pengujian beban 1000 Watt	110
5.1.24. Pembahasan <i>data logger</i> proses <i>anode purging</i>	112
5.1.25. Hasil pengamatan <i>anode purging</i>	113
5.2. Periode dan Lama Waktu Purging	114
5.2.1. Analisis periode <i>anode purging</i>	114
5.2.2. Analisis lama waktu <i>anode purging</i>	118
5.3. Logika Kendali <i>Anode Purging</i>	122
5.3.1. <i>Feedback</i> kendali	122
5.3.2. Logika kendali periode <i>anode purging</i>	123
5.3.3. Logika kendali lama waktu <i>anode purging</i>	125
5.4. Performa <i>Anode Purging</i> dan PEMFC <i>stack benchline</i>	125
5.4.1. Utilisasi hidrogen	125
5.4.2. <i>Benchline polarization curve</i>	128
5.4.3. <i>Benchline</i> efisiensi	131
<b>BAB VI PENUTUP</b>	<b>134</b>
6.1. Kesimpulan	134
6.2. Saran	135
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>136</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>139</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Tahapan dan proses rantai pasok hidrogen	2
Gambar 2.1.	Ilustrasi reaksi yang terjadi pada masing-masing jenis <i>fuel cell</i> : (a) SOFC, (b) AFC, (c) PEMFC, (d) MCFC, (e) PAFC, (f) DMFC	8
Gambar 2.2.	Ilustrasi model strategi utilisasi hidrogen pada sistem PEMFC: (a) <i>open-end anode</i> , (b) <i>recirculation anode</i> , (c) <i>dead-end anode</i> , (d) <i>dead-end anode</i> dengan resirkulasi	10
Gambar 2.3.	Perbandingan densitas daya dari <i>open-end anode</i> dan <i>dead-end anode</i>	11
Gambar 2.4.	Ilustrasi proses perpindahan spesi pada <i>dead-end anode</i> PEMFC	12
Gambar 2.5.	Ilustrasi pembuatan strategi <i>purging</i>	13
Gambar 2.6.	Hasil kenaikan efisiensi dari penelitian Belverde et al.	14
Gambar 2.7.	Skematik diagram <i>fuel cell test bench</i> : GB-gas ballon, FA-fuel arrestor, V-valve, GR-gas regulator, GFC-gas flow controller, VS-valve solenoid, F-fan	15
Gambar 2.8.	Model <i>fuel cell test bench</i> oleh Loskutov et al.	15
Gambar 2.9.	Karakteristik yang timbul dari beban dinamis pada PEMFC	16
Gambar 3.1.	Perbandingan proses konversi energi <i>fuel cell</i> , baterai, dan mesin kalor; (a) output energi listrik, (b) output energi mekanik	17
Gambar 3.2.	Skema sel galvanic dengan proses elektrokimia yang terjadi	18
Gambar 3.3.	Kemiripan antara <i>fuel cell</i> dan baterai terletak dengan adanya elektroda dan elektrolit	18
Gambar 3.4.	Linimasa perkembangan teknologi <i>fuel cell</i>	19
Gambar 3.5.	Perbandingan jenis-jenis <i>fuel cell</i> berdasarkan beberapa parameter	20
Gambar 3.6.	Prinsip dasar dan komponen penyusun PEMFC	21
Gambar 3.7.	Komponen penyusun PEMFC	22

Gambar 3.8.	Struktur dari Nafion (PFSA-polymer)	23
Gambar 3.9.	Susunan <i>bipolar plate</i> yang menghubungkan dan juga memisahkan dua sel yang berbeda	24
Gambar 3.10.	Ilustrasi bom kalorimeter pada reaksi pembakaran hidrogen; (a) pengukuran nilai kalor atas / HHV, (b) pengukuran nilai kalor bawah / LHV	28
Gambar 3.11.	Efisiensi dari mesin konversi energi	33
Gambar 3.12.	Efisiensi dari PEMFC sebagai mesin konversi energi	33
Gambar 3.13.	Perbandingan batas efisiensi mesin Carnot dan <i>fuel cell</i>	35
Gambar 3.14.	Sistem PEMFC dengan beban listrik: (a) sirkuit terbuka, (b) sirkuit tertutup	39
Gambar 3.15.	Penyebab <i>losses</i> tegangan	40
Gambar 3.16.	<i>Losses</i> aktivasi	41
Gambar 3.17.	<i>Losses</i> resistif/ohmic	42
Gambar 3.18.	<i>Losses</i> akibat konsentrasi	44
Gambar 3.19.	<i>Losses</i> tegangan pada <i>fuel cell</i>	45
Gambar 3.20.	Kurva polarisasi berdasarkan <i>losses</i> tegangan yang terjadi	45
Gambar 3.21.	Kurva polarisasi dan daya yang dihasilkan <i>fuel cell</i>	46
Gambar 3.22.	Efisiensi <i>fuel cell</i> dengan densitas daya yang dihasilkan	46
Gambar 3.23.	Ilustrasi model strategi utilisasi hidrogen pada sistem PEMFC: (a) <i>open-end anode</i> , (b) <i>recirculation anode</i> , (c) <i>dead-end anode</i> , (d) <i>dead-end anode</i> dengan resirkulasi	48
Gambar 3.24.	Metode pendistribusian oksigen atau udara pada PEMFC: (a) kipas untuk udara bertekanan rendah, (b) kompresor untuk udara bertekanan tinggi, (c) sistem dengan oksigen bertekanan	49
Gambar 3.25.	Mekanisme DC-DC <i>converter</i> yang diperlukan berdasarkan kebutuhan beban	51
Gambar 3.26.	Skematik sistem elektrikal dan kendali pada sistem PEMFC; (a) beban DC, (b) beban AC	52
Gambar 4.1.	Horizon H-1000XP yang diujikan	54
Gambar 4.2.	Kendali dan <i>purging valve</i> yang dianalisis pada penelitian	55

Gambar 4.3.	Skematik <i>testbench</i>	55
Gambar 4.4.	<i>Testbench</i> pengujian <i>fuel cell</i>	56
Gambar 4.5.	GW Instek PEL-3533	56
Gambar 4.6.	GW Instek PSW-80-40.5	57
Gambar 4.7.	Bronkhorst EL-Flow Select F201AV	58
Gambar 4.8.	Bronkhorst EL-Press P602CV	58
Gambar 4.9.	Tampilan layer GW Instek LinkView	59
Gambar 4.10.	Tampilan layer GW Instek PSW Application	60
Gambar 4.11.	Tampilan layer Bronkhorst FlowSuite	60
Gambar 4.12.	Tampilan layar Microsoft Excel	61
Gambar 4.13.	Tampilan layar Kaleidagraph	61
Gambar 4.14.	Diagram alir penelitian	65
Gambar 5.1.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 0W	66
Gambar 5.2.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 0W	66
Gambar 5.3.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 0W	67
Gambar 5.4.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 0W	67
Gambar 5.5.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 0W	67
Gambar 5.6.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 25W	68
Gambar 5.7.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 25W	68
Gambar 5.8.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 25W	69
Gambar 5.9.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 25W	69
Gambar 5.10.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 25W	69
Gambar 5.11.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 50W	70
Gambar 5.12.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 50W	70
Gambar 5.13.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 50W	71
Gambar 5.14.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 50W	71
Gambar 5.15.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 50W	71
Gambar 5.16.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 75W	72
Gambar 5.17.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 75W	72
Gambar 5.18.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 75W	73
Gambar 5.19.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 75W	73

Gambar 5.20.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 75W	73
Gambar 5.21.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 100W	74
Gambar 5.22.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 100W	74
Gambar 5.23.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 100W	75
Gambar 5.24.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 100W	75
Gambar 5.25.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 100W	75
Gambar 5.26.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 150W	76
Gambar 5.27.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 150W	76
Gambar 5.28.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 150W	77
Gambar 5.29.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 150W	77
Gambar 5.30.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 150W	77
Gambar 5.31.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 200W	78
Gambar 5.32.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 200W	78
Gambar 5.33.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 200W	79
Gambar 5.34.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 200W	79
Gambar 5.35.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 200W	79
Gambar 5.36.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 250W	80
Gambar 5.37.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 250W	80
Gambar 5.38.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 250W	81
Gambar 5.39.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 250W	81
Gambar 5.40.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 250W	81
Gambar 5.41.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 300W	82
Gambar 5.42.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 300W	82
Gambar 5.43.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 300W	83
Gambar 5.44.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 300W	83
Gambar 5.45.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 300W	83
Gambar 5.46.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 350W	84
Gambar 5.47.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 350W	84
Gambar 5.48.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 350W	85
Gambar 5.49.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 350W	85
Gambar 5.50.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 350W	85



Gambar 5.51.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 400W	86
Gambar 5.52.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 400W	86
Gambar 5.53.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 400W	87
Gambar 5.54.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 400W	87
Gambar 5.55.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 400W	87
Gambar 5.56.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 450W	88
Gambar 5.57.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 450W	88
Gambar 5.58.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 450W	89
Gambar 5.59.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 450W	89
Gambar 5.60.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 450W	89
Gambar 5.61.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 500W	90
Gambar 5.62.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 500W	90
Gambar 5.63.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 500W	91
Gambar 5.64.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 500W	91
Gambar 5.65.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 500W	91
Gambar 5.66.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 550W	92
Gambar 5.67.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 550W	92
Gambar 5.68.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 550W	93
Gambar 5.69.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 550W	93
Gambar 5.70.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 550W	93
Gambar 5.71.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 600W	94
Gambar 5.72.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 600W	94
Gambar 5.73.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 600W	95
Gambar 5.74.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 600W	95
Gambar 5.75.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 600W	95
Gambar 5.76.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 650W	96
Gambar 5.77.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 650W	96
Gambar 5.78.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 650W	97
Gambar 5.79.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 650W	97
Gambar 5.80.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 650W	97
Gambar 5.81.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 700W	98

Gambar 5.82.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 700W	98
Gambar 5.83.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 700W	99
Gambar 5.84.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 700W	99
Gambar 5.85.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 700W	99
Gambar 5.86.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 750W	100
Gambar 5.87.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 750W	100
Gambar 5.88.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 750W	101
Gambar 5.89.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 750W	101
Gambar 5.90.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 750W	101
Gambar 5.91.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 800W	102
Gambar 5.92.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 800W	102
Gambar 5.93.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 800W	103
Gambar 5.94.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 800W	103
Gambar 5.95.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 800W	103
Gambar 5.96.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 850W	104
Gambar 5.97.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 850W	104
Gambar 5.98.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 850W	105
Gambar 5.99.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 850W	105
Gambar 5.100.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 850W	105
Gambar 5.101.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 900W	106
Gambar 5.102.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 900W	106
Gambar 5.103.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 900W	107
Gambar 5.104.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 900W	107
Gambar 5.105.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 900W	107
Gambar 5.106.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 950W	108
Gambar 5.107.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 950W	108
Gambar 5.108.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 950W	109
Gambar 5.109.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 950W	109
Gambar 5.110.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 950W	109
Gambar 5.111.	Hasil <i>data logger</i> tegangan pada beban 500W	110
Gambar 5.112.	Hasil <i>data logger</i> arus pada beban 500W	110

Gambar 5.113.	Hasil <i>data logger</i> daya output aktual pada beban 500W	111
Gambar 5.114.	Hasil <i>data logger flowrate</i> pada beban 500W	111
Gambar 5.115.	Hasil <i>data logger pressure</i> aktual pada beban 500W	111
Gambar 5.116.	Proses <i>anode purging</i> yang terbaca pada kurva <i>flowrate</i> pada beban 100W	112
Gambar 5.117.	Proses <i>anode purging</i> yang terbaca pada kurva <i>flowrate</i> pada beban 200W	112
Gambar 5.118.	Sinyal purging dalam fungsi waktu	114
Gambar 5.119.	Analisis periode <i>anode purging</i>	115
Gambar 5.120.	<i>Scatter</i> dari analisis periode dan regresi yang sesuai	116
Gambar 5.121.	Titik transisi yang terlihat pada <i>scatter anode purging</i>	117
Gambar 5.122.	Hasil sampel kurva beban 1000W untuk analisis lama waktu <i>anode purging</i>	118
Gambar 5.123.	Hasil sampel kurva beban 200W untuk analisis lama waktu <i>anode purging</i>	119
Gambar 5.124.	Hasil sampel kurva beban 500W untuk analisis lama waktu <i>anode purging</i>	119
Gambar 5.125.	Fungsi tangga lama waktu <i>anode purging</i> terhadap beban	120
Gambar 5.126.	Model integrasi numeris konsumsi selama <i>anode purging</i>	120
Gambar 5.127.	Nilai konsumsi dari integrasi numeris <i>anode purging</i>	121
Gambar 5.128.	Relasi antara lama waktu <i>anode purging</i> dan konsumsi <i>anode purging</i>	121
Gambar 5.129.	<i>Scatter</i> periode <i>anode purging</i> terhadap tegangan	122
Gambar 5.130.	<i>Scatter</i> periode <i>anode purging</i> terhadap arus	123
Gambar 5.131.	<i>Curve fitting</i> periode <i>anode purging</i> terhadap arus	124
Gambar 5.132.	Fungsi tangga lama waktu <i>anode purging</i> terhadap arus	125
Gambar 5.133.	Konsumsi <i>anode purging</i> dan <i>steady flow</i>	126
Gambar 5.134.	<i>Scatter</i> utilisasi hydrogen terhadap beban	128
Gambar 5.135.	Utilisasi hydrogen terhadap arus	128
Gambar 5.136.	Kurva polarisasi PEMFC <i>stack</i> dengan kondisi <i>existing</i>	129
Gambar 5.137.	<i>Losses</i> tegangan hasil pengujian terhadap arus	130

Gambar 5.138. Kurva polarisasi satu sel pada PEMFC <i>stack</i> yang diuji	131
Gambar 5.139. Efisiensi hasil pengujian	133

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Komparasi jenis <i>Fuel Cell</i> berdasarkan spesifikasi operasi	5
Tabel 2.2.	Komparasi jenis <i>Fuel Cell</i> berdasarkan karakterisasi teknis	6
Tabel 2.3.	Perbedaan antara <i>open-end anode</i> dengan <i>dead-end anode</i> PEMFC	11
Tabel 2.4.	Parameter operasi dari penelitian Belverde et al.	14
Tabel 2.5.	Output pengujian <i>steady</i> dan <i>dynamic</i> load PEMFC	16
Tabel 3.1.	Fungsi dan persyaratan <i>bipolar plate</i>	24
Tabel 3.2.	Nilai entalpi pembentukan standar substansi hidrogen, oksigen, dan air	26
Tabel 3.3.	Rangkuman nilai kalor hidrogen	29
Tabel 3.4.	Nilai entropi pembentukan standar dari hidrogen, oksigen, dan air	30
Tabel 3.5.	Kebutuhan sistem penunjang PEMFC	47
Tabel 4.1.	Spesifikasi teknis PEMFC <i>stack</i> H-1000XP	54
Tabel 4.2.	Spesifikasi GW Instek PEL-3533	57
Tabel 4.3.	Spesifikasi GW Instek PSW-80-40.5	57
Tabel 4.4.	Spesifikasi Bronkhorst EL-Flow Select F201AV	58
Tabel 4.5.	Spesifikasi Bronkhorst EL-Press P602CV	58
Tabel 4.6.	Parameter kontrol pengujian	62
Tabel 4.7.	Variasi beban dan lama logger yang digunakan	63
Tabel 4.8.	Parameter luaran eksperimen	63
Tabel 5.1.	Jumlah <i>anode purging</i> selama pengujian	113
Tabel 5.2.	Hasil analisis periode <i>anode purging</i> terhadap beban	115
Tabel 5.3.	Koefisien empiris persamaan regresi periode <i>purging</i> terhadap beban	117
Tabel 5.4.	Nilai batas arus pada logika kendali	123
Tabel 5.5.	Koefisien empiris dan koefisien determinasi dari masing-masing <i>region</i> logika	124
Tabel 5.6.	Logika kendali lama waktu <i>anode purging</i>	125

Tabel 5.7.	Utilisasi hidrogen terhadap beban	127
Tabel 5.8.	Komponen penyusun persamaan empiris polarisasi	130
Tabel 5.9.	Koefisien empiris persamaan polarisasi	130
Tabel 5.10.	Parameter perhitungan efisiensi	132

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Spesifikasi Teknis PEMFC <i>Stack</i>	139
-------------	---------------------------------------	-----

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

AC	: <i>Alternating current</i>
AFC	: <i>Alkaline Fuel Cell</i>
CHP	: <i>Combines Heat Power</i>
CP	: <i>Control Power</i>
DC	: <i>Direct current</i>
DEA-PEMFC	: <i>Dead-End Anode Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
DMFC	: <i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
EBT	: Energi Baru dan Terbarukan
ESDM	: Energi dan Sumber Daya Mineral
GC	: <i>Gas Cylinder</i>
GDL	: <i>Gas Diffusion Layer</i>
HHV	: <i>Higher heating value</i>
LHV	: <i>Lower heating value</i>
MCFC	: <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
MEA	: <i>Membrane Electrode Assembly</i>
MFM	: <i>Mass Flowmeter</i>
NTP	: <i>Normal Temperature and Pressure</i>
NZE	: <i>Net Zero Emission</i>
PAFC	: <i>Phosporic Acid Fuel Cell</i>
PBB	: Perserikatan Bangsa-Bangsa
PC	: <i>Pressure Controller</i>
PEMFC	: <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PG1	: <i>Upstream Pressure Indicator</i>
PG2	: <i>Downstream Pressure Indicator</i>
PLC	: <i>Programmable Logic Controller</i>
PV	: <i>Purging Valve</i>
PWM	: <i>Pulse Width Modulation</i>
SOFC	: <i>Solid-Oxide Fuel Cell</i>
SV	: <i>Supply Valve</i>
CH <sub>3</sub> OH	: Methanol
CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksida
H <sub>2</sub>	: Hidrogen
H <sub>2</sub> O	: Air
N <sub>2</sub>	: Nitrogen
O <sub>2</sub>	: Oksigen
a	: Koefisien empiris
b	: Koefisien empiris
c	: Koefisien empiris



$d$	: Koefisien empiris
$e$	: Koefisien empiris
$E$	: Tegangan sel (Volt)
$E^\circ$	: Nilai tegangan teoritis (V)
$E_n^\circ$	: Tegangan <i>thermoneutral</i>
$f$	: Koefisien empiris
$F$	: Konstanta Faraday (96.485 Coulomb/(mol-elektron))
$\overline{\Delta G}$	: Energi bebas Gibbs
$\overline{h_f^\circ}$	: Entalpi pembentukan standar (kJ/mol)
$\overline{\Delta H^\circ}$	: Perubahan Entalpi (kJ/mol)
$\Delta H$	: Nilai kalor per massa (kJ/kg)
$\overline{\Delta H}$	: Nilai kalor per mol (kJ/mol)
$i$	: <i>Current density</i>
$I$	: Arus (A)
$j$	: Flux laju reaktan (mol/s.cm <sup>2</sup> )
$m_{H_2, purge}$	: konsumsi <i>purging</i> (ln)
$\dot{m}_{H_2, avg}$	: <i>Average flowrate</i> (ln/min)
$\dot{m}_{H_2, steady}$	: <i>Steady flow</i> (ln/min)
$M_{H_2}$	: Massa molar dari hidrogen (kg/kmol)
$n$	: Jumlah elektron tiap molekul
$N$	: Jumlah sel
$N_{avg}$	: Bilangan Avogadro ( $6,022 \times 10^{23}$ molekul/mol)
$P_{fc}$	: Daya <i>fuel cell</i> (W)
$P_L$	: Daya output (W)
$P_{PSU}$	: Daya Power Supply (W)
$\bar{q}$	: Muatan listrik per mol (Coulomb/mol)
$q_{el}$	: Muatan dari 1 elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$ ) Coulomb/elektron)
$R^2$	: Koefisien determinasi
$\overline{\Delta S}$	: Perubahan entropi (kJ/ (mol. K))
$\overline{\Delta S^\circ}$	: Entropi pembentukan standar (kJ/ (mol. K))
$t$	: Lama waktu <i>anode purging</i> (s)
$T$	: Temperatur (K)
$T_{fl}$	: Logika <i>purging</i> lama (s)
$T_{fl}^+$	: Logika <i>purging</i> optimasi (s)
$\Delta V_{act}$	: <i>Activation Losses</i>
$\Delta V_{ohm}$	: <i>Ohmic Losses</i>
$\Delta V_{conc}$	: <i>Concentration Losses</i>
$\Delta V$	: <i>Total Losses</i>

$\overline{W}_{el}$	: Kerja listrik (J/mol)
$\tau$	: Periode <i>anode purging</i> (s)
$\eta_{teoritis}$	: Efisiensi teoritis (%)
$\eta_{fuel}$	: Utilisasi hidrogen
$\eta_{react}$	: Reaction efficiency (%)
$\eta_{gross}$	: Gross efficiency (%)
$\eta_{net}$	: Net efficiency (%)