

JEECAE

by Nikita Syaharani

Submission date: 02-Jul-2021 05:32PM (UTC+0700)

Submission ID: 1614903154

File name: Final_Jurnal_Nikita_Syaharani_Template_Jeeca_02.07.2021-MGH.doc (613.5K)

Word count: 3570

Character count: 22151

SIMULASI PENGARUH VARIASI KECEPATAN ALIRAN LAMINAR ELEKTROLIT TERHADAP PERFORMA *SOLUBLE LEAD-ACID REDOX FLOW BATTERY (SLFB)*

Nikita Syaharani¹⁴
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia
nikitasyaharani4@gmail.com

Satria Pamungkas Panji Kumara
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

Irfan Fajar Hidayah
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

Silvi Hadila¹⁴
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

Ervinka Felindia
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

Mauludi Ariesto Pamungkas
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya

Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

Kurriawan Budi Pranata
Program Studi Pendidikan Fisika
Universitas PGRI Kanjuruhan Malang
Jl. S. Supriadi No.48 Malang, 65148

Muhammad Ghufri¹⁴
Program Studi Fisika, FMIPA
Universitas Brawijaya
Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia
mghufri@ub.ac.id

Abstrak— Pemenuhan pasokan energi listrik baru terbarukan membutuhkan media penyimpanan energi dalam skala besar. *Soluble Lead Acid Flow Battery (SLFB)* merupakan salah satu jenis baterai sekunder yang memenuhi kriteria tersebut. Simulasi sel tunggal *SLFB* model 2D dengan memvariasikan kelajuan aliran laminar elektrolit sebesar 0,025 m/s (*SLFB*₁), 0,075 m/s (*SLFB*₂), 0,1 m/s (*SLFB*₃), dan 0,2 m/s (*SLFB*₄) menggunakan *software COMSOL Multiphysics 5.1* telah berhasil dilakukan. Pada simulasi ini digunakan densitas arus tetap 300 A/m² selama pengisian 4 jam dan pengosongan 4 jam dengan istirahat selama 1 menit. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran laminar elektrolit pada *SLFB* mampu menurunkan nilai tegangan pengisian (*charge*) dan meningkatkan nilai tegangan pengosongan (*discharge*). Kecepatan aliran laminar elektrolit pada *SLFB* tidak berpengaruh terhadap nilai konsentrasi PbO₂ dan PbO pada permukaan elektroda positif selama pengisian-pengosongan baterai. Dengan menaikkan kelajuan aliran laminar elektrolit *SLFB* dapat meningkatkan nilai efisiensi energinya pada range 72,8% - 73,3%. *SLFB*₄ merupakan baterai dengan performa terbaik berdasarkan performa tegangan dan efisiensi.

Kata kunci— *Baterai aliran redoks asam timbal; Kelajuan Aliran Elektrolit; Tegangan; Konsentrasi di Permukaan Baterai; Efisiensi Energi.*

I. PENDAHULUAN

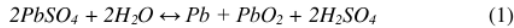
Konsumsi energi terutama energi listrik terus naik seiring dengan pertumbuhan penduduk dan ekonomi pada suatu negara yang terus berkembang. Tahun 2019 Indonesia telah menjadi negara pendorong pertumbuhan konsumsi energi primer terbesar nomor 3 setelah China dan India. Dalam dekade terakhir konsumsi energi primer di Indonesia menunjukkan peningkatan sebesar 54,7 %, dimana pada tahun 2009 sebesar 5,76 moe naik menjadi 8,91 moe pada tahun 2019[1]. Konsumsi pada sektor komersial di Indonesia

menyatakan bahwa penggunaan energi listrik paling mendominasi dari pada penggunaan energi lainnya [2]. Hal ini memaksa pemerintah Indonesia menciptakan penyediaan akses energi listrik ke seluruh wilayah Indonesia secara merata. Maka dari [25] timbulah upaya pemerintah Indonesia dalam membangun pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT) yang masih rendah dari segi pemanfaatannya [3]. Dalam menciptakan pasokan energi listrik yang memadai di seluruh wilayah Indonesia dibutuhkan media penyimpanan energi dengan skala besar.

Salah satu solusi yang masih terus dikembangkan adalah *Redox Flow Battery (RFB)* atau baterai dinamis yang merupakan baterai sekunder dimana komponen aktif baterainya berada di wadah terpisah [4–6]. Adapun Bahan – bahan yang sering digunakan dalam pengembangan *Redox Flow Battery (RFB)* salah satunya adalah baterai aliran larutan asam timbal atau *soluble lead acid flow battery (SLFB)*. Keunggulan *SLFB* ini adalah dapat beroperasi hanya dengan satu elektrolit dalam konfigurasi yang tidak terbagi dan untuk masalah produksi dan daur ulang bahan kimia asam timbal (*lead acid*) ini sudah dapat teratasi dengan baik [7], [8].

Sistem dari baterai aliran redoks asam timbal (*SLFB*) yaitu terdiri dari sebuah sel baterai yang menampung dua elektroda, wadah atau tangki untuk menampung larutan elektrolit, pompa tunggal untuk mengalirkan elektrolit melalui sel baterai pada proses *charging* dan terakhir *power supply* untuk mengeluarkan energi listrik dari hasil reaksi di dalam sel baterai pada proses *discharge* [9–12]. Reaksi redoks pada baterai asam timbal yang dapat menghasilkan energi listrik terjadi ketika asam sulfat (H₂SO₄) bergabung dengan timbal (Pb) dan timbal oksida (PbO₂) dan menghasilkan timbal sulfat

(PbSO₄) dan air (H₂O) [13]. Dalam proses sistem baterai asam timbal, terdapat proses pengisian (*charging*) dan proses pengosongan (*discharging*) baterai dalam 1 siklus. Pada saat siklus pengisian baterai, timbal sulfat (2PbSO₄ (s)) akan berubah menjadi timbal (Pb(s)) dan timbal dioksida (PbO₂) pada elektroda negatif dan elektroda positif secara berturut-turut serta ion sulfat (SO₄²⁻) akan mengikat hidrogen membentuk larutan elektrolit asam sulfat (2H₂SO₄ (aq)). Pada saat siklus pengosongan baterai, material aktif pada elektroda negatif yaitu timbal (Pb) dan timbal dioksida (PbO₂) pada elektroda positif akan bereaksi dengan komponen aktif elektrolit (H₂SO₄ (aq)) membentuk timbal sulfat (PbSO₄(s)) dan air (H₂O(l)) [13], [14]. Reaksi redoks pada baterai asam timbal adalah:



Dalam simulasi baterai aliran redoks asam timbal (SLFB) ini diterapkan beberapa asumsi – asumsi sebagai berikut, pertama Aliran Laminar diasumsikan dalam permodelan sel baterai larutan asam timbal karena laju aliran elektrolit dalam sistem ini cukup rendah. Aliran jenis ini dapat menyelesaikan permasalahan kecepatan dan tekanan elektrolit didalam sistem simulasi baterai dengan persamaan 2 dan persamaan 3 berikut: [15]

$$\rho \nabla u + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

Asumsi kedua adalah persamaan Nerst-Planck dengan distribusi arus tersier diasumsikan pada bagian tangki untuk menentukan nilai potensial listrik sel dan nilai konsentrasi spesies aktif pada elektrolit. Persamaan ini juga digunakan untuk mendeskripsikan bahwa didalam tangki akan terjadi perpindahan muatan listrik (ion) seperti pada persamaan 4 melalui mekanisme difusi, migrasi dan konveksi [15], [16].

$$I_i(x) = -D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} - \frac{Z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} + C_i v(x) \quad (4)$$

Asumsi ketiga adalah reaksi pada bagian permukaan (*Surface Reaction*) diasumsikan untuk menentukan nilai-nilai konsentrasi spesies pada permukaan elektroda. Reaksi elektroda akan menghasilkan fluks molekul spesies yang bereaksi dipermukaan elektroda. Transpor massa diterapkan pada permodelan ini untuk memasang fluks spesies yang bereaksi pada batas kepadatan arus reaksi di elektroda (menurut hukum elektrolisis Faraday). Konsentrasi PbO₂ dan PbO pada permukaan elektroda diasumsikan seragam dan bervariasi dengan waktu, sesuai dengan keseimbangan massa [15], [17].

$$\frac{\partial C_{\text{PbO}_2}}{\partial t} = \frac{j_{\text{PbO}_2}}{F} - \frac{j_{\text{PbO}}}{F} \quad (5)$$

dan

$$\frac{\partial C_{\text{PbO}}}{\partial t} = \frac{j_{\text{PbO}}}{F} \quad (6)$$

Asumsi terakhir yang diterapkan adalah persamaan differensial biasa atau *ordinary differential equation (ODE)*. Suatu persamaan differensial dengan satu variabel bebas dan mengandung turunan biasa dinamakan sebagai persamaan differensial biasa (*ODE*). Persamaan *ODE* digunakan untuk menyelesaikan (penjelasan secara pendekatan numerik) dalam komputasi pada simulasi ini [18].

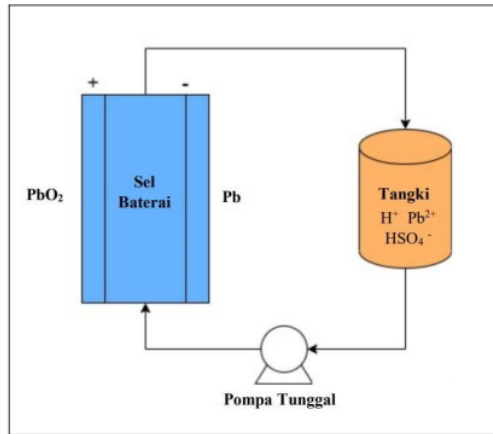
Beberapa penelitian telah dilakukan sebelumnya dalam pengembangan SLFB ini. Telah dilakukan permodelan dengan simulasi dari baterai asam timbal dengan pengaruh konveksi bebas terhadap karakteristik baterainya. Dengan hasil yang menjelaskan bahwa karakteristik baterai ini tidak sensitif atau tidak berpengaruh terhadap kecepatan aliran elektrolitnya [9]. Sedangkan, telah dilakukan juga percobaan dengan eksperimen langsung untuk variasi kecepatan aliran elektrolit terhadap siklus *charging* – *discharging* baterai diamis asam timbal. Dimana hasil percobaan ini menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran elektrolit memiliki pengaruh terhadap siklus dan performa baterai [19]. Namun, berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, belum terdapat penjelasan lebih lanjut mengenai jenis aliran elektrolit apa yang digunakan pada percobaan sistem baterai ini.

Dari beberapa latar belakang ini penulis ingin mengembangkan lebih lanjut tentang baterai aliran redoks asam timbal (SLFB) dengan memvariasi kecepatan aliran jenis laminar pada elektrolit menggunakan simulasi *COMSOL Multiphysics 5.1* dan menganalisis pengaruh dan hubungannya dengan performa baterai aliran redoks asam timbal (SLFB). Penelitian dengan simulasi merupakan salah satu metode alternatif yang bisa digunakan dan menjadi pilihan banyak peneliti saat ini dikarenakan mampu mengurangi waktu dan biaya penelitian pada eksperimen langsung namun memiliki tingkat keakuratan dan keefektifan yang tinggi [14]. Harapan dari hasil pengembangan penelitian ini akan mendapatkan pengetahuan analisis lebih lanjut tentang pengaruh dari variasi kecepatan aliran elektrolit terhadap parameter karakteristik baterai aliran redoks asam timbal (SLFB) yaitu tegangan sel baterai asam timbal untuk menghitung nilai efisiensi, konsentrasi permukaan PbO₂ dan PbO dan densitas arus lokal timbal (Pb), timbal dioksida (PbO₂) dan timbal oksida (PbO) yang didapat ditinjau untuk menganalisa performa baterai.

II. METODOLOGI

Dalam percobaan ini dilakukan simulasi permodelan baterai aliran redoks asam timbal (SLFB) dengan *software COMSOL Multiphysics 5.1*. Pada permodelan ini Langkah pertama yang dilakukan adalah dengan mengasumsikan aliran laminar (*Laminar Flow*) pada model aliran fase tunggal (*Single-Phase Flow*). Selanjutnya pembentukan geometri, memodelkan sel elektrokimia yang terdiri dari dua elektroda berukuran 10 cm x 1 cm berbentuk persegi panjang dan ditempatkan secara paralel dengan jarak 12 mm di antar kedua elektroda. Pemodelan sel SLFB ini dibuat dalam 2D seperti

pada **Gambar 1**. Permodelan sel baterai ini dibagi menjadi empat bagian. Elektroda negatif pada bagian satu disebelah kiri, aliran masuk elektrolit (*Inlet*) pada bagian dua dibawah, aliran keluar elektrolit (*outlet*) pada bagian tiga diatas dan terakhir elektroda positif pada bagian empat disebelah kanan. Selanjutnya, dimasukkan Parameter yang digunakan pada permodelan simulasi ini pada **Tabel 1**.



Gambar 1. Permodelan dua dimensi (2D) SLFB.

Tabel 1. Skema Permodelan Prinsip Kerja *Soluble Lead-Acid Redox Flow Battery* (SLFB).

Keterangan	Nilai
Koefisien difusi ion Pb di elektrolit	$0,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
Koefisien difusi proton di elektrolit	$9,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
Koefisien difusi HSO_4^- di elektrolit	$1,33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
Suhu	300 K
Konsentrasi ion Pb	600 mol/ m^3
Konsentrasi proton	600 mol/ m^3
Tekanan outlet	300 kPa
Kecepatan aliran elektrolit (<i>inlet</i>)	Divariasikan
Arus densitas	300 A/ m^2
Volume elektrolit yang mengalir di dalam tangki	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Konstanta laju reaksi elektroda negatif	$2,1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
Konstanta laju reaksi elektroda positif	$2,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
Waktu pengisian	4 jam
Waktu pengosongan	4 jam
Waktu istirahat	60 s
Ketebalan sel	10 cm

Pada bagian parameter masukan ini, kecepatan aliran elektrolit (*inlet*) dilakukan empat variasi (SLFB_n) yang dituliskan pada **Tabel 2**. Besar variasi kelajuan aliran elektrolit ini telah dihitung nilai bilangan Reynoldnya (Re). Variasi kelajuan aliran elektrolit yang diterapkan harus sesuai dengan dengan pernyataan Streeter dan Wylie pada tahun

1992 dimana suatu aliran dapat dikatakan aliran laminar dimana nilai bilangan Reynoldnya kurang dari 2300 [20]. Pada variasi SLFB₁ bilangan Reynoldnya sebesar 250, variasi SLFB₂ bilangan Reynoldnya sebesar 750, variasi SLFB₃ bilangan Reynoldnya sebesar 1000, dan terakhir variasi SLFB₄ bilangan Reynoldnya sebesar 2000.

Tabel 2. Variasi Kecepatan Aliran Elektrolit Pada Simulasi *Soluble Lead-Acid Redox Flow Battery*.

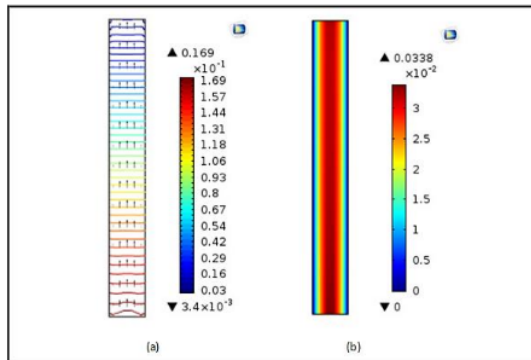
Nama	Deskripsi	Re
SLFB ₁	Kelajuan Aliran Elektrolit 0,025 m/s	250
SLFB ₂	Kelajuan Aliran Elektrolit 0,075 m/s	750
SLFB ₃	Kelajuan Aliran Elektrolit 0,1 m/s	1000
SLFB ₄	Kelajuan Aliran Elektrolit 0,2 m/s	2000

Selanjutnya digunakan jaring persegi panjang yang dipetakan (*Mesh 1*) yang digunakan untuk menyelesaikan gradien curam pada elektrolit yang dekat dengan permukaan elektroda. Setelah menyelesaikan bagian *Mesh 1* maka telah diselesaikan dengan *Compute 1*. Maka selanjutnya akan dilakukan diterapkan asumsi persamaan fisika dan matematika pada simulasi baterai asam timbal ini yaitu Persamaan Nerst Planck dengan Distribusi Arus Tersier, *Surface Reaction* dan Persamaan *ODE*. Siklus yang dilakukan pada simulasi ini adalah beban pengisian 4 jam, istirahat 60 detik, pengosongan 4 jam, diterapkan empat variasi aliran elektrolit pada sistem baterai asam timbal. Setelah menyelesaikan semua bagian diatas diselesaikan dengan *Compute 2*.

III. HASIL DAN ANALISA

Grafik keluaran pertama dari hasil *compute 1* pada simulasi SLFB ini adalah grafik distribusi kecepatan dan tekanan dalam sel baterai asam timbal (**Gambar 2**). Berdasarkan **Gambar 2** dapat diperhatikan bahwa fluida dalam permodelan sel baterai asam timbal ini menghasilkan lapisan-lapisan geser (*shear layers*) yang membentuk profil kecepatan (garis panah hitam) yang besarnya sama (konstan) pada setiap ketinggian sel baterai ini yang dapat membuktikan bahwa asumsi aliran laminar pada sistem ini berhasil (terpenuhi). Adapun data yang didapatkan pada grafik di **Gambar 2 (a)** diketahui nilai distribusi kecepatan di bagian permukaan ke bagian tengah dalam sel baterai sebesar 0 m/s ditandai dengan warna biru, mengalami kenaikan ke bagian tengah sel baterai menjadi 0,0338 m/s. Juga dapat dianalisa distribusi kecepatan dari bagian bawah (*inlet*) ke bagian atas (*outlet*) dalam sel baterai memiliki warna yang sama pada setiap ketinggian sel baterai, dimana dapat disimpulkan bahwa besar kecepatan dalam sel baterai ini konstan. Selanjutnya, data yang didapatkan pada grafik di **Gambar 2 (b)** ini yaitu nilai tekanan pada bagian bawah yaitu aliran masuk (*inlet*) sebesar 0,169 Pa, mengalami penurunan sampai ke bagian atas yaitu aliran keluar (*outlet*) menjadi $3,4 \times 10^{-3}$ Pa. Penurunan besar nilai tekanan pada sel baterai asam timbal ini dapat dibuktikan dengan mengamati perubahan kontur warna pada grafik di **Gambar 2 (b)**. Berdasarkan hasil analisa data dari kedua

grafik pada **Gambar 2** dapat disimpulkan bahwa simulasi ini sesuai dengan Hukum Bernoulli. Ketika suatu ketinggian aliran fluida mengalami kenaikan yaitu dari bagian bawah (*inlet*) ke bagian atas (*outlet*) maka energi potensial yang dihasilkan akan meningkat, namun nilai kecepatan aliran elektrolit dari bagian bawah (*inlet*) ke bagian atas (*outlet*) konstan dikarenakan sistem aliran alimar yang diterapkan maka nilai energi kinetiknya sama. Efek yang dihasilkan yaitu nilai tekanan pada sistem baterai ini akan menurun dari bagian bawah (*inlet*) ke bagian atas (*outlet*) [21].

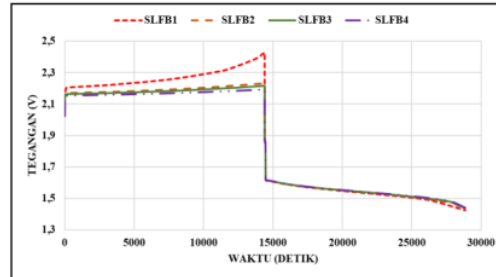


Gambar 2. Grafik keluaran *Compute I* (a) Grafik distribusi kecepatan aliran didalam sel baterai *SLFB* dan (b) Grafik distribusi tekanan didalam sel baterai *SLFB*.

Selanjutnya, hasil grafik keluaran dari *compute II* akan digabungkan untuk perbandingan di setiap variasi kelajuan aliran elektrolit yang diterapkan. **Gambar 3** adalah grafik gabungan tegangan baterai terhadap waktu pengisian-pengosongan dari *SLFB*. Trend grafik yang didapatkan pada grafik di **Gambar 3** ini adalah saat proses pengisian (*charge*) terjadi kenaikan tegangan sel baterai, hal ini mengidentifikasi bahwa pada proses pengisian terjadi penyimpanan muatan pada elektroda. Selanjutnya, pada proses pengosongan (*discharge*) dapat diamati terjadi penurunan tegangan sel baterai, hal ini mengidentifikasi bahwa pada proses pengosongan sedang mengeluarkan muatan dari elektroda yang semula disimpan.

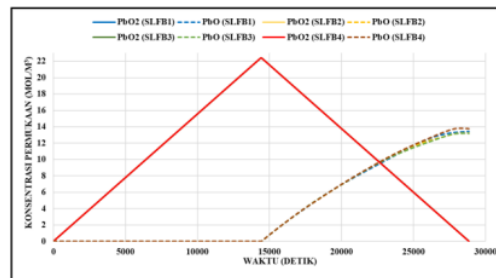
Adapun data nilai tegangan awal baterai saat proses pengisian (*charge*) dibagian A nilainya konstan sebesar 2,02 V untuk semua baterai. Nilai tegangan awal ini dapat timbul karena terdapat reaksi redoks didalam sel baterai yaitu reaksi antara elektrolit dengan kedua elektroda [22]. Selanjutnya, dengan menaikkan kelajuan aliran elektrolit pada sistem baterai asam timbal, akan menurunkan nilai tegangan baterai asam timbal pada proses pengisian (*charge*) baterai asam timbal. Efek yang timbul akibat dari reaksi pengenceran elektrolit pada proses pengisian akan menurunkan sedikit nilai tegangan pada baterai. Sedangkan dengan menaikkan kelajuan aliran elektrolit pada sistem baterai asam timbal, akan

menaikkan sedikit nilai tegangan baterai asam timbal pada proses pengosongan (*discharge*). Reaksi pada proses pengosongan di dalam sel baterai akan lebih cepat dengan menaikkan laju aliran pengosongannya, maka dari itu pada proses pengosongan ini nilai tegangan potensial baterai akan mengalami sedikit kenaikan [13].



Gambar 3. Grafik Gabungan Dari Tegangan Baterai *SLFB* Terhadap Waktu Pengisian – Pengosongan.

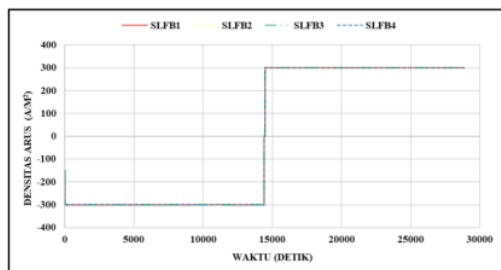
Selanjutnya, **Gambar 4** adalah Grafik gabungan konsentrasi permukaan di elektroda positif yaitu timbal dioksida (PbO_2) dan timbal oksida (PbO) dengan variasi kelajuan aliran elektrolit yang diterapkan. Pada grafik ini dapat dianalisa bahwa terjadi kenaikan trend grafik saat proses pengisian (*charge*) yang menandakan bahwa terjadi pembentukan material timbal dioksida (PbO_2) saat proses pengisian. Dan kenaikan trend grafik saat proses pengosongan (*discharge*) yang menandakan bahwa terjadi pembentukan timbal oksida (PbO) saat proses pengosongan. Dengan menerapkan variasi kelajuan aliran elektrolit pada sistem baterai asam timbal, nilai konsentrasi permukaan PbO_2 dan PbO berdasarkan trend grafik tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Nilai konsentrasi permukaan di elektroda positif untuk PbO dan PbO_2 tidak berpengaruh terhadap variasi kelajuan aliran elektrolit yang diterapkan.



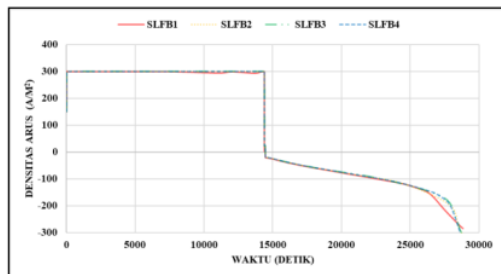
Gambar 4. Grafik Gabungan Dari Konsentrasi Permukaan di Elektroda Positif untuk PbO dan PbO_2 Baterai *SLFB* Terhadap Waktu Pengisian – Pengosongan.

Disajikan pada **Gambar 5** yaitu grafik gabungan distribusi densitas arus timbal (Pb), timbal dioksida (PbO_2) dan timbal oksida (PbO) dengan variasi kelajuan aliran elektrolit yang diterapkan. Pada simulasi ini telah ditetapkan

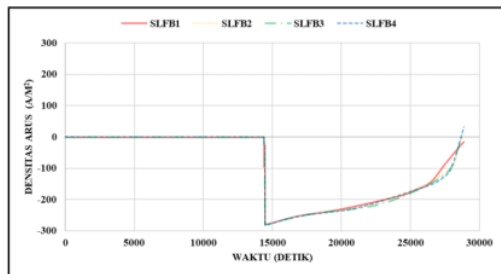
densitas arus konstan sebesar 300 A/m^2 (**Tabel 1**). **Gambar 5** menunjukkan bahwa selama proses pengisian (*charge*), pada elektroda negatif nilai densitas arus timbal (Pb) konstan sebesar -300 A/m^2 dan pada elektroda positif nilai densitas arus timbal dioksida (PbO_2) konstan sebesar 300 A/m^2 . Selanjutnya selama proses pengosongan (*discharge*), pada elektroda negatif nilai densitas arus timbal (Pb) konstan sebesar 300 A/m^2 karena terjadi reaksi oksidasi dan pada elektroda positif nilai densitas arus timbal dioksida (PbO_2) menurun dari 0 A/m^2 sampai -300 A/m^2 dan terdapat nilai densitas arus timbal dioksida (PbO) naik dari -300 A/m^2 sampai 0 A/m^2 karena reaksi reduksi. Timbal oksida (PbO) pada elektroda positif ini merupakan material sampingan hasil reaksi reduksi dari ion Pb^{4+} menjadi Pb^{2+} saat proses pengosongan (*discharge*). Dapat dianalisa bahwa sistem baterai aliran redoks larutan asam timbal (*SLFB*) ini bekerja dengan baik, dimana nilai densitas arus yang dihasilkan pada **Gambar 5** sebesar 300 A/m^2 sesuai dengan yang diterapkan pada parameter.



(a)



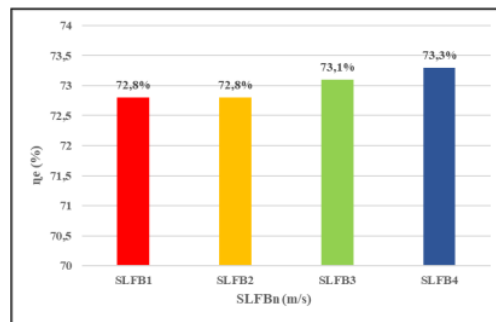
(b)



(c)

Gambar 5. Grafik Gabungan Distribusi Densitasi Arus untuk Pb (a), PbO_2 (b) dan Pb (c) pada Baterai *SLFB* Terhadap Waktu Pengisian – Pengosongan.

Performa suatu baterai dapat ditinjau dari besar efisiensinya. Setelah mendapatkan nilai tegangan selama proses pengisian (*charge*) sampai pengosongan (*discharge*) baterai dari keempat variasi kelajuan aliran elektrolit (SLFB_n) pada baterai aliran redoks larutan asam timbal. Nilai efisiensi energi (η_e) dari berbagai variasi kelajuan aliran elektrolit (SLFB_n) pada baterai asam timbal ditunjukkan pada **Gambar 6**. Dapat diamati bahwa baterai dengan variasi pertama SLFB_1 memiliki efisiensi terkecil sebesar 72,8%, baterai dengan variasi kedua SLFB_2 memiliki efisiensi sebesar 72,8%, baterai dengan variasi ketiga SLFB_3 memiliki efisiensi sebesar 73,1%, dan baterai dengan variasi terakhir SLFB_4 memiliki efisiensi terbesar sebesar 73,3%. Dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan menaikkan kelajuan aliran elektrolit baterai asam timbal, maka akan menaikkan nilai efisiensi baterainya.



Gambar 6. Grafik Gabungan Nilai Efisiensi Baterai Aliran Redokd Larutan (*SLFB*) Asam Timbal dengan Variasi Kelajuan Aliran Elektrolit.

IV. KESIMPULAN

Simulasi baterai aliran redoks larutan asam timbal (*SLFB*) ini telah sesuai dengan Hukum Bernoulli dan asumsi aliran laminar yang digunakan pada sistem ini telah berhasil terpenuhi. Hasil trend grafik yang didapatkan untuk satu siklus pengisian–pengosongan yaitu, pada proses pengisian (*charge*) terjadi kenaikan trend grafik dan mengalami penurunan pada proses pengosongan (*discharge*). Dengan menaikkan laju aliran elektrolit pada sistem baterai ini, akan menurunkan nilai tegangan baterai selama proses pengisian (*charge*) dan akan menaikkan nilai tegangan baterai selama proses pengosongan (*discharge*), namun tidak berpengaruh pada nilai konsentrasi PbO_2 dan PbO pada elektroda positif selama proses pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*). Nilai efisiensi pada sistem baterai aliran redoks asam timbal (*SLFB*) dengan variasi aliran kelajuan aliran elektrolit didapatkan pada kisaran 72,8% - 73,3%. Kenaikkan laju aliran elektrolit pada sistem baterai aliran redoks asam timbal (*SLFB*) mampu meningkatkan nilai efisiensi energinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy," globally consistent data on world energy markets, p. 66, 2020, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [2] PT, *Indonesia Energy Outlook 2020 - Special Edition Dampak Pandemi COVID-19 terhadap Sektor Energi di Indonesia*, 2020.
- [3] IESR, "Sustainable electricity access for rural communities: Status, Challenges, and Opportunities," *22nd Energi - Seri Disk.*, p. 11, 2019, [Online]. Available: <http://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/05/Proceeding-PE-11.pdf>.
- [4] C. Ponce de León, A. Frías-Ferrer, J. González-García, D. A. Szánto, and F. C. Walsh, "Redox flow cells for energy conversion," *J. Power Sources*, vol. 160, no. 1, pp. 716–732, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.095.
- [5] A. Z. Weber, M. M. Mench, J. P. Meyers, P. N. Ross, J. T. Gostick, and Q. Liu, "Redox flow batteries: A review," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 41, no. 10, pp. 1137–1164, 2011, doi: 10.1007/s10800-011-0348-2.
- [6] N. Khairati, M. Ghuftron, and K. B. Pranata, "Optimasi Kapasitas Baterai Dinamis Asam Timbal (Redox Flow Battery)," *SMARTICS J.*, vol. 4, no. 2, pp. 44–48, 2018, doi: 10.21067/smartics.v4i2.2666.
- [7] E. J. Fraser, K. K. J. R. Dinesh, and R. G. A. Wills, "Development of a two-dimensional, moving mesh treatment for modelling the reaction chamber of the soluble lead flow battery as a function of state of charge for Pb/PbO₂ deposition and dissolution," *J. Energy Storage*, vol. 31, no. January, p. 101484, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101484.
- [8] Y. Yu, Y. Song, and J. Mao, "Quantitative analysis of the material, energy and value flows of a lead-acid battery system and its external performance," *Sci. Total Environ.*, vol. 688, pp. 103–111, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.169.
- [9] M. Nandanwar and S. Kumar, "A modelling and simulation study of soluble lead redox flow battery: Effect of presence of free convection on the battery characteristics," *J. Power Sources*, vol. 412, no. October 2018, pp. 536–544, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.11.070.
- [10] S. Hadila *et al.*, "Simulasi Pengaruh Luas Permukaan Elektroda Terhadap Tegangan Dan Konsentrasi Permukaan Elektroda Pada Lead Acid Redox Flow Battery," vol. 14, no. April, pp. 12–17, 2021.
- [11] C. P. Zhang, S. M. Sharkh, X. Li, F. C. Walsh, C. N. Zhang, and J. C. Jiang, "The performance of a soluble lead-acid flow battery and its comparison to a static lead-acid battery," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 12, pp. 3391–3398, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.07.006.
- [12] M. N. Nandanwar and S. Kumar, "Modelling of Effect of Non-Uniform Current Density on the Performance of Soluble Lead Redox Flow Batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 161, no. 10, pp. A1602–A1610, 2014, doi: 10.1149/2.0281410es.
- [13] S. Laestander, "Battery-and Degradation Modeling of Hybrid Electric Heavy-Duty Long Hauler," 2017.
- [14] R. Dini Barkah, "Simulasi Charge Discharge Model Baterai Lead Acid," *J. Ilmu dan Inov. Fis.*, vol. 3, no. 2, pp. 128–134, 2019, doi: 10.24198/jiif.v3i2.23257.
- [15] A. Bates, S. Mukerjee, S. C. Lee, D. H. Lee, and S. Park, "An analytical study of a lead-acid flow battery as an energy storage system," *J. Power Sources*, vol. 249, pp. 207–218, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.090.
- [16] M. Hadi, A. J. Bard, L. R. Faulkner, E. Methods, and S. Elektrokimia, "Analisa Dinamika Difusi Ionik *," pp. 1–20, 2006.
- [17] A. A. Shah, X. Li, R. G. A. Wills, and F. C. Walsh, "A Mathematical Model for the Soluble Lead-Acid Flow Battery," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, no. 5, p. A589, 2010, doi: 10.1149/1.3328520.
- [18] A. Basuki and N. Ramadijanti, *Metode Numerik dan Algoritma Komputasi*. Yogyakarta: Andi, 2005.
- [19] M. Ghuftron, I. Istiroyah, C. A. Perwita, L. Gobay, F. R. Ramadhan, and K. B. Pranata, "Studi Kelajuan Elektrolit Terhadap Kapasitas Baterai Dinamis Asam Timbal Sel Tunggal," *Pros. SNFA (Seminar Nas. Fis. dan Apl.)*, vol. 5, pp. 148–156, 2020, doi: 10.20961/prosidingsnfa.v5i0.46605.
- [20] V. L. Streeter, E. B. Wylie, and A. Prijono, *Mekanika Fluida : Jilid I*. Jakarta: Erlangga, 1992.
- [21] M. Davids, R. Neff, K. Wedding, and P. Zitzewitz, *Merril Physical Science Teacher Wraparound Edition*. New York: ENCOE McGraw-Hill., 1995.
- [22] M. Ghuftron, K. B. Pranata, I. Istiroyah, M. Yumawanto, and C. A. Perwita, "Charging time influence on dynamic lead acid battery capacity with H₂SO₄ electrolyte," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2021, no. October 2018, 2018, doi: 10.1063/1.5062756.

ORIGINALITY REPORT

18%

SIMILARITY INDEX

16%

INTERNET SOURCES

13%

PUBLICATIONS

12%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

eprints.soton.ac.uk

Internet Source

2%

2

Submitted to Konsorsium PTS Indonesia -
Small Campus II

Student Paper

1%

3

jurnal.uns.ac.id

Internet Source

1%

4

journal.uad.ac.id

Internet Source

1%

5

ejournal.unikama.ac.id

Internet Source

1%

6

Submitted to Queen's University of Belfast

Student Paper

1%

7

Submitted to Chiang Mai University

Student Paper

1%

8

open.library.ubc.ca

Internet Source

1%

9

E.J. Fraser, K.K.J. Ranga Dinesh, R.G.A. Wills.
"Development of a two-dimensional, moving

1%

mesh treatment for modelling the reaction chamber of the soluble lead flow battery as a function of state of charge for Pb and PbO₂ deposition and dissolution", Journal of Energy Storage, 2020

Publication

10

Song, Yujie, and Lijun Gao. "Incremental Battery Model Using Wavelet-Based Neural Networks", IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2011.

Publication

1 %

11

Submitted to University of Birmingham

Student Paper

1 %

12

Submitted to Majan College

Student Paper

1 %

13

Windra Irdianto, Imam Muda Nauri, Moh. Nursalim. "Analysis of supercapacitor as a battery substitute in motorcycle", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021

Publication

1 %

14

Tjahjanto, Rachmat Triandi, and Johannes Beck. "A pressure-tight electrode for cyclic voltammetry measurements in liquefied gases as solvents", Measurement, 2013.

Publication

1 %

15	jurnal.unej.ac.id Internet Source	<1 %
16	Submitted to Universidad Carlos III de Madrid Student Paper	<1 %
17	Submitted to University of Edinburgh Student Paper	<1 %
18	Submitted to University of Oxford Student Paper	<1 %
19	www.essays.se Internet Source	<1 %
20	mafiadoc.com Internet Source	<1 %
21	agussugiyono.wordpress.com Internet Source	<1 %
22	www.iisd.org Internet Source	<1 %
23	123dok.com Internet Source	<1 %
24	Submitted to Loughborough University Student Paper	<1 %
25	best-pft.com Internet Source	<1 %
26	eprints.lancs.ac.uk Internet Source	<1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On