

Simulasi Pengaruh Durasi Pengisian-Pengosongan Terhadap Performa Baterai Dinamis Asam Timbal

Ervinka Felindia¹, Silvi Hadila¹, Irfan Fajar Hidayah¹, Satria Pamungkas Panji Kumara¹, Gancang Saroja¹, Kurriawan Budi Pranata², Muhammad Ghufron^{1*}

¹Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, 65154

²Jurusan Pendidikan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Kanjuruhan Malang, Jl. Sudancho Supriyadi 48, Malang, 65148

* Corresponding author. E-mail: mghufron@ub.ac.id (Muhammad Ghufron)

ABSTRAK

Baterai dinamis asam timbal berbasis redoks adalah jenis baterai sekunder yang dapat diisi ulang atau *rechargeable* dengan kondisi elektrolit dialirkan melewati sel oleh pompa. Sistem baterai yang dibuat adalah simulasi menggunakan *software COMSOL Multiphysics.5.1.Win.SSQ*. Simulasi dilakukan pada 1 sel baterai dinamis asam timbal pada suhu kerja 300 K, volume 1000 cc, densitas arus 200 mA/cm² dengan 4 variasi durasi pengisian-pengosongan yaitu 1 jam, 1,5 jam, 2 jam dan 2,5 jam selama satu siklus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bertambahnya waktu pengisian-pengosongan mampu meningkatkan tegangan kerja baterai, meningkatkan konsentrasi dipermukaan elektroda dan jumlah ion aktif pada elektrolit. Hal ini menunjukkan bahwa pengisian baterai dinamis asam timbal dari 1 jam hingga 2,5 jam belum mencapai pengisian penuh baterai yang dibuat karena tegangan akhir belum mencapai 2,4 Volt. Efisiensi energi pada baterai dinamis asam timbal memiliki rentang 72%-73%.

Kata Kunci : Baterai Dinamis Asam Timbal; Durasi Pengisian-Pengosongan; Tegangan Kerja; Efisiensi Energi

ABSTRACT

Lead acid redox flow battery (LARFB) is a type rechargeable battery with electrolytes flowing through to cell by the pump. The battery system created is a simulation using *COMSOL Multiphysics.5.1.Win.SSQ*. The simulation was carried out by building one cell LARFB at a working temperature of 300 K, volume of 1000 cc, current density of 200 mA/cm² with 4 variations in the duration of charge-discharge, namely 1.0 hour, 1.5 hours, 2.0 hours and 2.5 hours for one cycle. The results showed that the longer the charging-discharging time, the higher the working voltage, increase the concentration on the surface of the electrode and increase the number of active ions in the electrolyte. This shows that the lead acid dynamic battery charging from 1 hour to 2.5 hours has not reached the full charge. The energy efficiency of lead acid dynamic batteries has a range of 72% -73%.

Keywords: Lead Acid Battery; Duration Of Charging-Discharging; Energy Efficiency; Working Voltage

1. Pendahuluan

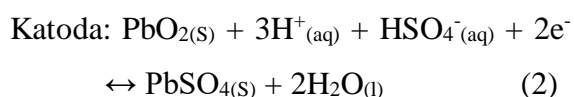
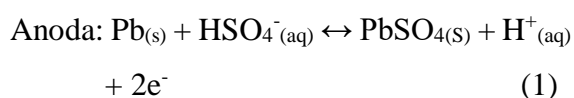
Dewasa ini kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan pada setiap tahunnya. Tingkat konsumsi energi Indonesia juga mengalami peningkatan sebanyak 8,91% pada tahun 2019 [1]. Pemenuhan energi listrik nasional dilakukan dengan banyak upaya yakni dengan memanfaatkan berbagai sumber energi seperti minyak bumi (32%), batu bara (32%), gas (20%) dan EBT (16%). Pengembangan EBT pada sektor ketenagalistrikan sebagian besar didominasi oleh air, bioenergi, dan panas bumi [2]. Pembangkit listrik tenaga surya merupakan pembangkit listrik yang dihasilkan oleh energi sinar matahari yang kemudian diubah

menjadi energi listrik. Pembangkit listrik tenaga surya memiliki beberapa bagian penting diantaranya adalah bagian penghasil yaitu panel surya, pengkonversian yaitu inverter dan penyimpanan yaitu baterai [3]. Kemampuan penyimpanan baterai dapat berbeda bergantung pada kapasitas baterai yang berkorelasi dengan umur baterai, keadaan baterai, parameter *charging-discharging*, dan temperatur pemakaian [4].

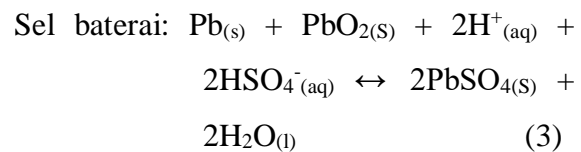
Sistem baterai aliran redoks (*Redox Flow Battery (RFB)*) merupakan jenis baterai yang dapat digunakan sebagai solusi alternatif baterai sekunder untuk pembangkit listrik skala besar [5], [6]. Pada baterai ini energi listrik disimpan di dalam

reservoir yang mengandung elektrolit dimana terdapat tangki elektrolit tambahan di luar sistem baterai [4]. Elektrolit tersebut kemudian dialirkan dengan dipompa melalui sel dengan elektroda berpori. Setelah elektrolit melalui sel maka terjadi konversi energi antara energi listrik dengan energi kimia yang terjadi terus menerus di elektroda [7].

Baterai asam timbal adalah jenis baterai sekunder yang dapat diisi ulang atau *rechargeable* dan bisa dimodifikasi menjadi baterai aliran redoks (RFB) [8]. Pada baterai asam timbal digunakan bahan PbO_2 (*Lead Peroxide*) sebagai elektroda positif (katoda), Pb (*lead sponge*) sebagai elektroda negatif (anoda) dan *Methane Sulphonic Acid* (CH_3SO_3H) sebagai elektrolit [9]. Sel baterai asam timbal tersusun dari anoda timbal (Pb) dan katoda PbO_2 . Keping-keping Pb dan PbO_2 dibenamkan ke dalam elektrolit. Reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dapat dilihat pada persamaan 1, 2 dan 3. Reaksi di atas dapat dikembalikan ke kiri dengan bantuan arus listrik. $PbSO_4$ diuraikan lagi menjadi Pb dan PbO_2 . Oleh karena itu sel asam timbal yang sudah habis dapat kita isi (*recharged*) kembali [10].



+



Penelitian sebelumnya berkaitan dengan *Lead Acid Redox Flow Battery* telah banyak dilakukan diantaranya pemvariasian konsentrasi elektrolit asam sulfat (H_2SO_4) untuk mengetahui karakteristik baterai asam timbal dimana hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan kapasitas dan efisiensi baterai yang berbanding lurus dengan peningkatan konsentrasi dalam rentang 20% sampai 40% dan mengalami penurunan pada konsentrasi 50% [11]. Pengaruh variasi luas permukaan elektroda untuk mengetahui karakteristik baterai asam timbal juga dilakukan dengan hasil semakin besar luas permukaan elektroda maka kapasitas dan efisiensi baterai semakin meningkat [12]. *State of Charge* (SoC) merupakan salah satu bagian penting dalam analisa baterai dan sudah banyak pula dilakukan pada berbagai macam baterai seperti pada baterai dinamis asam timbal [10], [13]–[15]. Namun selama ini masih belum banyak pembahasan mengenai reaksi pada permukaan elektroda dan konsentrasi pada elektrolit diukur secara realtime. Hal ini berkaitan dengan kesulitan yang dihadapi dalam melakukan pengukuran secara langsung pada baterai karena akan

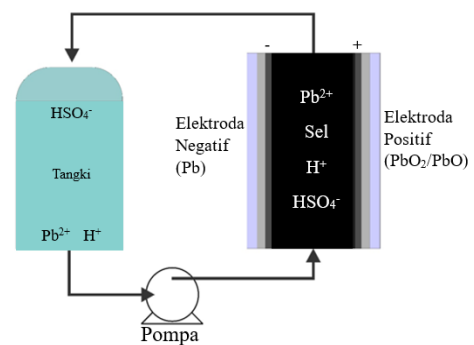
merusak baterai tersebut selama pengujian siklibilitas dilakukan.

Pemodelan matematis dan simulasi dalam proses perancangan baterai sangat penting dilakukan karena dapat menghasilkan data yang sulit diperoleh pada eksperimen secara langsung selain menghemat biaya dan waktu pengembangan [15]. Apabila model telah divalidasi maka dapat diketahui performa baterai yang telah dibuat. Penelitian ini akan membuat pemodelan 2D *Lead Acid Redox Flow Battery* (2D LARFB) sel tunggal dengan peubah bebas lama pengisian dan lama pengosongan baterai. Diharapkan terjadi perubahan pada variabel terikat tegangan baterai, konsentrasi permukaan elektroda, konsentrasi ion aktif pada elektrolit dan efisiensi energinya. Simulasi menggunakan *software COMSOL Multiphysics. 5.1.Win.SSQ.*

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi dimana terdapat sebuah sistem baterai dinamis asam timbal yang terdiri dari tangki, pompa, selang dan sel yang saling terhubung satu sama lain seperti pada Gambar 1. Elektroda positif dimodelkan dengan menggunakan pelat konduktif PbO_2/PbO sedangkan elektroda negatif menggunakan pelat konduktif Pb. Elektrolit yang digunakan adalah campuran *Lead*

Methane Sulfonate ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_6\text{PbS}_2$), *Methane Sulphonic Acid* ($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$) dan air. Keadaan pengisian baterai ditentukan oleh konsentrasi spesies elektrolit, total volume elektrolit yang mengalir dalam sistem dan juga oleh konsentrasi spesies padat elektroda. Reaksi elektrokimia terjadi ketika elektrolit dialirkan ke sel oleh pompa.



Gambar 1. Sistem fisis baterai dinamis asam timbal

Study I dipilih bentuk 2D untuk jenis aliran fluida laminar. Selanjutnya dibentuk geometri sebagai pemodelan sel elektrokimia yang terdiri dari dua buah elektroda datar berukuran 10 cm^2 , ditempatkan secara paralel dengan jarak diantaranya 12 mm. Kemudian dimasukkan parameter yang akan digunakan seperti pada Tabel 1. Selanjutnya dibuat pemodelan untuk saluran masuk, saluran keluar, elektroda positif dan elektroda negatif dengan batasan yang telah ditentukan. Selanjutnya dibuat pemodelan jaring persegi panjang pada geometri elektroda sebagai batas untuk menyelesaikan curam gradien dalam elektrolit dekat dengan

permukaan elektroda. *Study II* dilakukan pemodelan untuk analisis. Pada fisik antar muka dilakukan pemodelan elektrokimia yaitu *Tertiary Current Distribution* dan *Nernst-Planck Interface* yang selanjutnya dapat diselesaikan dengan menggunakan model matematis yaitu *Ordinary Differential Equation (ODEs) and Differential Algebraic Equation (DAEs) interface*. Diatur siklus *charge/discharge*. Dilakukan definisi dari fungsi analitik untuk mengatur variabel pada elektroda dengan mengimpor file variabel yang telah disediakan oleh *software* ini. Dilakukan pembuatan semua probe agar dapat di plot hasilnya. Setelah itu dilakukan *compute*. Selanjutnya setelah berhasil dilakukan simulasi untuk masing-masing variasi volume elektrolit dan durasi pengisian-pengosongan maka dilakukan analisa data.

Tabel 1. Parameter simulasi baterai dinamis asam timbal

Besaran	Nilai	Keterangan
D_PbII	$0,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi ion Pb
D_H	$9,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi proton
D_HSO ₄	$1,33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi HSO ₄ ⁻
T	300 K	Suhu
c0_PbII	500 mol/m ³	Konsentrasi ion Pb
c0_H	500 mol/m ³	Konsentrasi proton

U _{in}	0,023 m/s	Kecepatan inlet
i _{app}	200 A/m ²	Densitas arus
V	0,001 m ³ (1000 cc)	Volume elektrolit
t _{charge}	Divariasikan	Waktu pengisian
t _{discharge}	Divariasikan	Waktu pengosongan
t _{rest}	60 s	Waktu istirahat

Penelitian ini difokuskan terhadap durasi pengisian-pengosongan dengan waktu yang digunakan pada saat pengisian dan pengosongan divariasikan menjadi 1 jam, 1,5 jam, 2 jam dan 2,5 jam.

2.1. *Tertiary Current Distribution, Nernst-Planck interface*

Tertiary current distribution atau distribusi arus tersier merupakan laju reaksi lokal yang tidak bergantung pada potensial melainkan ditentukan oleh laju transpor massa lokal [16]. *Tertiary Current Distribution, Nernst-Planck interface* dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan *Nernst-Planck* yang tunduk dengan pendekatan *electroneutrality*. Secara eksplisit, ini termasuk dalam transportasi massa yang secara komputasi lebih menuntut ke persamaan menjadi non linier. Oleh karena itu, aplikasinya secara umum meliputi proses pemisahan seperti

elektrodialisis dan pemodelan rinci baterai serta sel bahan bakar [17].

Transfer massa merupakan perpindahan material dalam larutan dari satu lokasi menuju lokasi lain yang disebabkan oleh perbedaan potensial listrik atau kimia pada dua lokasi tersebut atau perpindahan elemen volume larutan. Adapun proses transfer massa meliputi migrasi, difusi dan konveksi. Migrasi merupakan perpindahan benda bermuatan akibat pengaruh medan listrik (gradien potensial listrik). Difusi merupakan perpindahan jenis yang disebabkan oleh pengaruh gradien potensial kimia (gradien konsentrasi). Konveksi merupakan gerakan atau transfer hidrodinamika yang pada aliran fluida umumnya terjadi akibat konveksi natural (disebabkan oleh gradien kerapatan) dan konveksi terpaksa (dicirikan oleh daerah stagnan, aliran laminar dan aliran turbulensi. Untuk menyatakan transfer massa menuju elektroda digunakan persamaan *Nernst-Planck*. Persamaan ini ditulis untuk transfer massa satu dimensi di sepanjang sumbu x :

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

Keterangan persamaan Nernst-Planck *Interface*:

$J_i(x)$: fluks jenis i ($\text{mol sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$) pada jarak x dari permukaan

D_i : koefisien difusi (cm^2/s)

$\frac{\partial C_i(x)}{\partial x}$: gradien konsentrasi pada jarak x

$\frac{\partial \phi(x)}{\partial x}$: gradien potensial listrik

z_i : muatan jenis

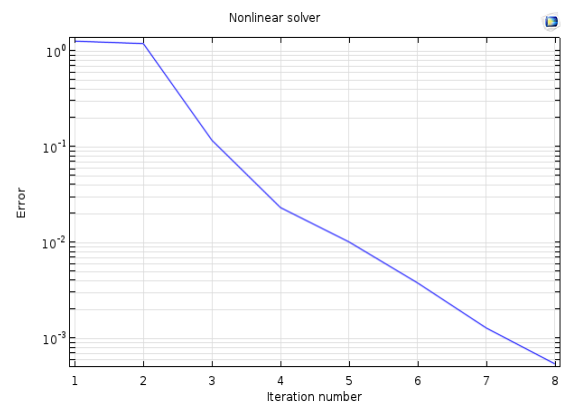
C_i : konsentrasi jenis

Berdasarkan persamaan tersebut, tiga suku di sebelah kanan berturut-turut merupakan kontribusi dari difusi, migrasi dan konveksi terhadap fluks [18].

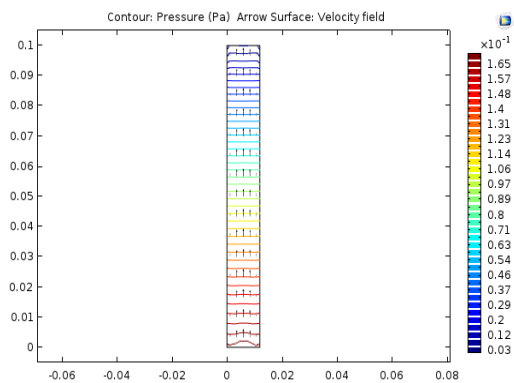
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi

Setelah berhasil dilakukan pemodelan geometri baterai dinamis asam timbal maka dilakukan *running*. Pada pemodelan ini *compute* berhasil dilakukan yang dapat dilihat pada Gambar. 2(a). yaitu didapatkan grafik konvergen pada iterasi 8.



(a)



(b)

Gambar 2. Grafik hasil simulasi baterai dinamis asam timbal 1 jam pengisian-pengosongan : (a). Hasil *compute*, (b). distribusi tekanan terhadap geometri baterai.

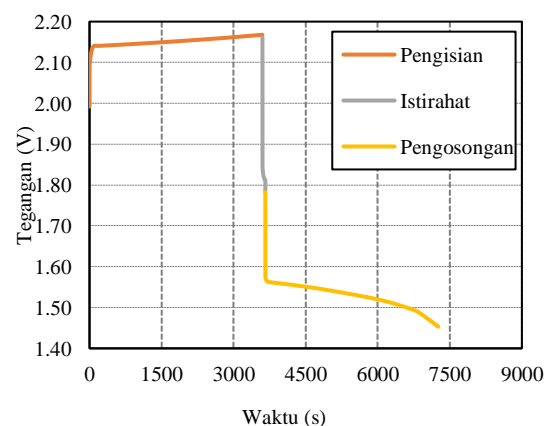
Pada proses pengosongan, tegangan mengalami penurunan secara tajam dari 1,58 V menjadi 1,55 V pada detik awal pengosongan. Selanjutnya tegangan menurun secara lambat hingga mencapai tegangan akhir pengosongan 1,45 V pada waktu 1 jam. Hal ini disebabkan karena pada saat pengosongan terjadi proses baterai mengeluarkan energi yang disimpannya.

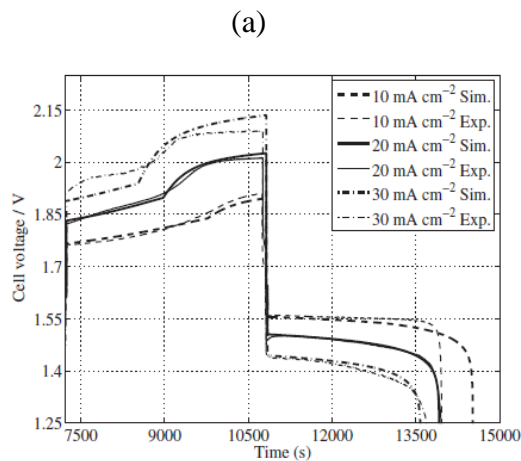
3.2. Karakteristik Tegangan Baterai Dinamis Asam Timbal

Keadaan awal baterai dinamis asam timbal yaitu belum memiliki muatan listrik. Hal ini dikarenakan belum terjadi proses pencampuran antara kedua elektroda dengan elektrolit. Apabila elektrolit tersebut dicampurkan maka akan terjadi reaksi reduksi-oksidasi (redoks) di kedua elektroda. Ketika

terjadi reaksi tersebut maka akan menghasilkan padatan timbal (II) sulfat pada kedua elektroda sehingga terdapat beda potensial pada kedua elektroda.

Gambar. 3(a). merupakan grafik nilai tegangan yang dihasilkan dari simulasi baterai dinamis asam timbal untuk variasi 1 jam pengisian-pengosongan. Berdasarkan grafik tersebut, pada saat pengisian tegangan meningkat seiring bertambahnya waktu yaitu dari nilai tegangan awal baterai (V_0) 1,99 V meningkat tajam menjadi 2,09 V pada waktu 1 hingga 2 detik. Kemudian nilai tegangan terus mengalami peningkatan secara lambat menjadi 2,16 V sampai pada waktu 1 jam. Peningkatan tegangan yang terjadi selama proses pengisian menunjukkan bahwa pada baterai terjadi proses penyimpanan energi listrik. Selanjutnya pada istirahat 60 detik terjadi reaksi spontan yang menyebabkan tegangan mengalami penurunan menjadi 1,78 V pada waktu 60 detik.





(b)

Gambar 3. Grafik tegangan terhadap waktu baterai dinamis asam timbal: (a). Grafik tegangan hasil simulasi 1 jam pengisian-pengosongan, (b). Grafik tegangan terhadap waktu baterai dinamis asam timbal [19] .

Apabila dibandingkan hasil simulasi dengan literatur yaitu grafik tegangan

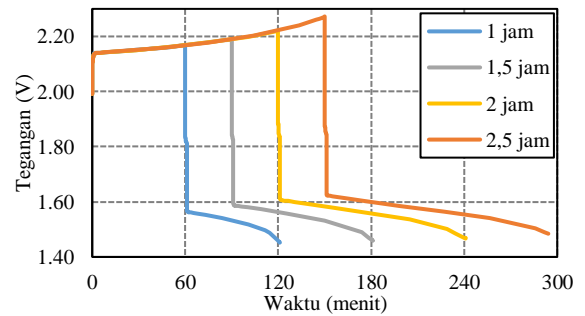
terhadap waktu pada Gambar. 3(a), (b). didapatkan tren grafik serupa yang menunjukkan bahwa sistem baterai dinamis asam timbal pada simulasi ini memiliki karakter yang sama dengan literatur. Akan tetapi nilai tegangan yang dihasilkan pada simulasi dengan literatur berbeda yang disebabkan oleh perbedaan parameter yang digunakan seperti volume elektrolit, luas elektroda, densitas arus dan parameter lainnya. Nilai tegangan yang dihasilkan pada simulasi sesuai dengan literatur yaitu nilai tegangan akhir pengisian pada rentang 1,9-2,15 V dan tegangan akhir pengosongan pada rentang 1,4-1,55 V [19].

Tabel 2. Hasil simulasi baterai dinamis asam timbal durasi pengisian-pengosongan 1 jam

Parameter	Charging		Discharging	
	Keadaan awal	Keadaan akhir	Keadaan awal	Keadaan akhir
V (Volt)	1,99	2,16	1,58	1,45
Konsentrasi H ⁺ di inlet (mol/m ³)	500	770	770	580
Konsentrasi Pb ²⁺ (mol/m ³)	500	365	365	460
Densitas arus reaksi lokal rata-rata PbO ₂ (A/m ²)	100	200	11	-183
Densitas arus reaksi lokal I rata-rata PbO (A/m ²)	0	0	-11	-17
Densitas arus reaksi lokal rata-rata Pb (A/m ²)	-100	-200	0	200
Konsentrasi permukaan PbO ₂ (mol/m ²)	0	7,5	7,5	0
Konsentrasi permukaan PbO (mol/m ²)	0	0	0	4,3

Berdasarkan data hasil simulasi pada Tabel 2. tersebut diketahui bahwa pada saat pengisian nilai tegangan naik dan pada pengosongan tegangan menurun. Hal tersebut berarti pada saat pengisian terjadi penyimpanan muatan pada baterai sedangkan pada saat pengosongan muatan yang disimpan pada baterai keluar. Ketika awal pengisian, jumlah konsentrasi ion Pb^{2+} dan H^+ sebesar 500 mol/m^3 . Selanjutnya ketika proses pengisian baterai, ion Pb menurun secara konstan karena terjadi reaksi kimia antara elektrolit dengan elektroda yaitu pada elektroda positif ion Pb^{2+} mengalami oksidasi dan pada elektroda negatif mengalami reduksi menjadi logam Pb(s). Sedangkan ion H^+ mengalami kenaikan konsentrasi secara konstan yaitu dua kali lipat jumlah penurunan ion Pb^{2+} . Pada saat pengisian arus 200 A/m^2 terjadi reaksi oksidasi pada elektroda positif yang menyebabkan pembentukan PbO_2 dan densitas arus -200 A/m^2 konstan pada elektroda negatif yang menyebabkan pembentukan logam Pb. Ketika pengosongan terjadi kebalikan proses pada pengisian. Pada elektroda positif, terdapat arus baru yaitu PbO ($Pb^{2+} + O^{2-}$). Hal ini menunjukkan bahwa pada elektroda positif terjadi 2 proses reaksi kimia yaitu terjadi pembentukan PbO

pada elektroda positif ketika terjadi reaksi reduksi. PbO terbentuk dari PbO_2 saat pengosongan yang akan dioksidasi kembali membentuk PbO_2 saat pengisian [19].



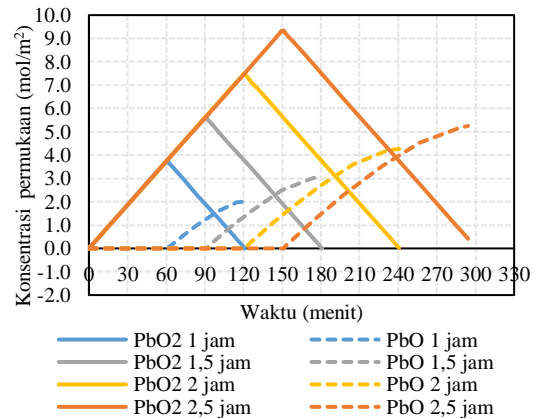
Gambar 4. Grafik tegangan terhadap waktu baterai dinamis asam timbal dengan variasi durasi pengisian-pengosongan

Gambar. 4. merupakan grafik hasil simulasi hubungan tegangan terhadap waktu baterai dinamis asam timbal untuk masing-masing variasi durasi pengisian-pengosongan. Saat proses pengisian, nilai tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya durasi pengisian. Begitupun pada saat pengosongan, nilai tegangan menurun seiring dengan bertambahnya durasi pengosongan. Peningkatan tegangan yang terjadi selama proses pengisian menunjukkan bahwa pada baterai terjadi proses penyimpanan energi listrik sedangkan pada saat pengosongan terjadi proses baterai mengeluarkan energi yang disimpannya. Dari grafik

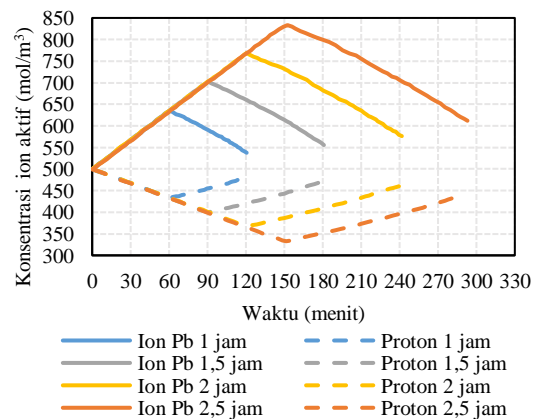
tersebut didapatkan tren yang sama berarti karakteristik untuk masing-masing sistem baterai adalah serupa dengan nilai tegangan yang dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu pada pengisian-pengosongan. Hal ini berarti sistem baterai dengan nilai volume elektrolit $0,001 \text{ m}^3$ (1000 cc) dan luas permukaan elektroda 10 cm^2 masa hidupnya bisa sampai 2,5 jam. Yang mana pada baterai dengan jumlah elektrolit yang banyak maka waktu yang dibutuhkan untuk proses difusi dan meluruhnya baterai semakin lama [20].

Pada Gambar. 5.(a) saat *charging* terjadi pembentukan PbO_2 akibat reaksi kimia yaitu penguraian molekul air dan proton (H^+) bereaksi dengan plat timbal oksida II (Pb^{2+}) yang dibuktikan dengan tren grafik naik. Sedangkan saat *discharging* terjadi pembentukan PbO akibat reaksi kimia yaitu plat timbal oksida (PbO_2) bereaksi dengan sepasang proton (2H^+) menjadi timbal oksida (PbO) kemudian membentuk air (H_2O) yang dapat dibuktikan dengan tren grafik turun. Seiring kenaikan durasi pengisian-pengosongan didapatkan tren grafik yang meningkat pada konsentrasi permukaan PbO_2 dan PbO . Pada Gambar. 5.(b) menunjukkan kenaikan konsentrasi inlet proton berdasarkan tren

grafik ketika *charging* yaitu 2 kali lipat dari konsentrasi inlet ion Pb . Yang mana tren grafik meningkat seiring dengan kenaikan durasi pengisian-pengosongan.



(a)



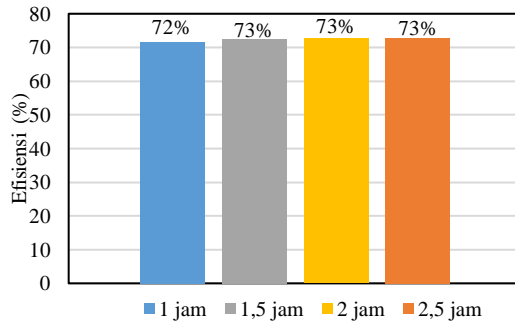
(b)

Gambar 5. (a). Grafik konsentrasi permukaan terhadap waktu baterai dinamis asam timbal, (b). Grafik konsentrasi ion aktif terhadap waktu baterai dinamis asam timbal.

3.3. Efisiensi Energi

Efisiensi energi merupakan rasio antara energi keluaran dan energi masukan yang digunakan untuk mengisi

kembali baterai pada keadaan muatan semula.



Gambar 6. Grafik Efisiensi Energi Baterai Dinamis Asam Timbal

Berdasarkan grafik efisiensi energi hasil simulasi baterai dinamis asam timbal untuk masing-masing variasi didapatkan nilai efisiensi energi yang hampir sama pada penambahan durasi pengisian-pengosongan yaitu pada rentang 72%-73%. Hal ini disebabkan pada penelitian ini belum ditemukan waktu ideal pengisian karena pada keadaan pengisian (State Of Charge, SoC) dengan waktu 4 jam belum 100% [10].

4. Simpulan

Simulasi baterai dinamis asam timbal untuk variasi durasi pengisian-pengosongan telah berhasil dibuat dengan menggunakan *software COMSOL Multiphysics* pada suhu operasi 300K, densitas arus 200 A/m², volume elektrolit 1000 cc dan variasi pengisian-pengosongan 1,0 jam, 1,5

jam, 2,0 jam dan 2,5 jam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bertambahnya waktu pengisian-pengosongan mampu meningkatkan tegangan kerja baterai dimana tegangan akhir pengisian 2,17 V, 2,19 V, 2,22 V dan 2,27 V serta tegangan akhir pengosongan sebesar 1,45 V, 1,46 V, 1,47 V dan 1,48 V berturut-turut untuk variasi durasi 1,0 jam, 1,5 jam, 2,0 jam dan 2,5 jam. Peningkatan durasi pengisian juga mampu meningkatkan konsentrasi di permukaan elektroda dan jumlah ion aktif pada elektrolit. Hal ini menunjukkan bahwa pengisian baterai dinamis asam timbal dari 1 jam hingga 2,5 jam belum mencapai pengisian penuh baterai yang dibuat karena tegangan akhir belum mencapai 2,4 Volt. Efisiensi energi pada baterai dinamis asam timbal memiliki rentang 72%-73%.

5. Referensi

1. BP, "Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing," p. 66, 2020, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/b>

- p/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.
2. BPPT, Indonesia Energy Outlook 2020 - Special Edition Dampak Pandemi COVID-19 terhadap Sektor Energi di Indonesia Diterbitkan. 2020.
 3. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Indonesia Energy Outlook 2019: The Impact of Increased Utilization of New and Renewable Energy on the National Economy. 2019.
 4. Kementerian ESDM, “3 Tahun Kinerja Sektor ESDM: Lampu Surya Hemat Energi, Melistriki Desa Belum Berlistrik,” no. April, pp. 1–5, 2017, [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/3-tahun-kinerja-sektor-esdm-lampu-surya-hemat-energi-melistriki-desa-belum-berlistrik>.
 5. Y. Zhen, C. Zhang, J. Yuan, Y. Zhao, and Y. Li, “A high-performance all-iron non-aqueous redox flow battery,” *J. Power Sources*, vol. 445, no. May 2019, p. 227331, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227331.
 6. H. R. Jiang, J. Sun, L. Wei, M. C. Wu, W. Shyy, and T. S. Zhao, “A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery,” *Energy Storage Mater.*, vol. 24, no. xxxx, pp. 529–540, 2020, doi: 10.1016/j.ensm.2019.07.005.
 7. Q. Meng, T. Liu, C. Su, H. Niu, Z. Hou, and N. Ghadimi, “A Single-Phase Transformer-Less Grid-Tied Inverter Based on Switched Capacitor for PV Application,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 257–270, 2020, doi: 10.1007/s40313-019-00531-5.
 8. 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.
 9. 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.
 10. M. Ghufroon *et al.*, “International Journal of Engineering Technology and Scientific Innovation RELATIONSHIP BETWEEN

- CURRENT DISCHARGE TO STATIC AND,” no. 06, 2018.
11. N. Khairati, M. Ghufron, 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.
 12. Z. Xu, Q. Fan, Y. Li, J. Wang, and P. D. Lund, “Review of zinc dendrite formation in zinc bromine redox flow battery,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, no. 2, p. 109838, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109838.
 13. X. Li, D. Pletcher, and F. C. Walsh, “A novel flow battery: A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II). Part VII. Further studies of the lead dioxide positive electrode,” *Electrochim. Acta*, vol. 54, no. 20, pp. 4688–4695, 2009, doi: 10.1016/j.electacta.2009.03.075.
 14. M. Ghufron *et al.*, “Influence of electrolyte concentration on static and dynamic Lead-Acid battery,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1595, no. 1, pp. 0–8, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1595/1/012012.
 15. D. Pletcher and R. Wills, “A novel flow battery - A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II): III. The influence of conditions on battery performance,” *J. Power Sources*, vol. 149, no. 1–2, pp. 96–102, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.048.
 16. R. Sautebin and D. Landolt, “Anodic Leveling under Secondary and Tertiary Current Distribution Conditions,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 129, no. 5, pp. 946–953, 1982, doi: 10.1149/1.2124071.
 17. E. J. F. Dickinson, H. Ekström, and E. Fontes, “COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review,” *Electrochem. commun.*, vol. 40, pp. 71–74, 2014, doi: 10.1016/j.elecom.2013.12.020.
 18. C. A. J. Appelo, “Solute transport solved with the Nernst-Planck equation for concrete pores with ‘free’ water and a double layer,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 101, no. August, pp. 102–113, 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.030.
 19. 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.
 20. C. Armenta-Deu, “Lead/acid cell



capacity improvement: The use of additional electrolyte volume,” *J. Power Sources*, vol. 70, no. 2, pp. 200–204, 1998, doi: 10.1016/S0378-7753(97)02669-4.