

## SIMULASI PENGARUH LUAS PERMUKAAN ELEKTRODA TERHADAP TEGANGAN DAN KONSENTRASI PERMUKAAN ELEKTRODA PADA LEAD ACID REDOX FLOW BATTERY

Silvi Hadila<sup>1</sup>, Ervinka Felindia<sup>1</sup>, Nikita Syaharani<sup>1</sup>, Satria Pamungkas Panji Kumara, Irvan Fajar Hidayah<sup>1</sup>, Gancang Saroja<sup>1</sup>, Kurriawan Budi Pranata<sup>2</sup>, Muhammad Ghufron<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya  
Jalan Veteran Malang 65145 Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Kanjuruhan Malang,  
Jalan S. Supriadi No. 48, Malang 65148, Indonesia

Email: \*mghufron@ub.ac.id

### ABSTRACT

*Energy storage systems (ESS) with large storage capabilities, easy made, and low cost are in high demand. Dynamic lead acid battery (DLAB) as a breakthrough design compared conventional lead acid batteries offers a solution to these problems. Two Dimensional (2D) DLAB simulations with surface area variations of 8 cm<sup>2</sup>, 12 cm<sup>2</sup>, 16 cm<sup>2</sup> and 20 cm<sup>2</sup> were successfully build using the principle of tertiary current distribution and Nerst-Planck Interface. The results for one cycle charge-discharge test showed that the increase in surface area succeeded in increasing the final charging voltage with a value of 2.16 V; 2, 21 V; 2.30 V and 2.32 V and increase the initial discharging voltage by a value of 1.58 V; 1.59 V; 1.60 V and 1.62 V respectively but did not affect the electrode surface concentration. Dynamic lead acid battery has high energy efficiency of 70.6% -71.5%.*

*Keywords: ESS, Dynamic Lead Acid Battery, Voltage, Surface Concentration, Energy Efficiency.*

### PENDAHULUAN

Indonesia berhasil menjadi negara urutan ketiga dalam pertumbuhan pasar energi dunia di bawah China dan India pada tahun 2019. Pertumbuhan terbesar sumber energi listrik dunia terletak pada sektor energi terbarukan sebanyak 40% dan untuk pertama kali lebih besar dibandingkan dengan pertumbuhan pada sektor minyak bumi. Sementara itu, tingkat konsumsi energi Indonesia juga meningkat sebanyak 8,91% yang mana nilai ini naik 0,68% dibandingkan tahun 2018 [1]. Pertumbuhan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia juga mengalami kenaikan terbesar dibandingkan sektor lainnya yakni sebesar 6,5% pertahun, hal ini membuat persentase bauran energi nasional untuk EBT mencapai 16% pada tahun 2020, naik 5% dari tahun 2018 [2]. Meskipun begitu, hingga tahun 2020 rasio elektrifikasi di seluruh Indonesia masih mencapai 99,2 % dan Nusa Tenggara Timur (NTT) menjadi daerah yang perlu menjadi perhatian pemerintah karena memiliki rasio elektrifikasi yang rendah [3].

EBT merupakan kumpulan penyedia sumber energi yang bisa diperbaharui dan menjadi perhatian banyak negara di dunia sebagai salah satu sumber energi dimasa depan karena sifatnya yang ramah lingkungan, rendah atau hampir tidak menghasilkan gas karbon. Adapun contoh EBT yang telah dikembangkan di Indonesia walaupun belum maksimal adalah EBT dengan sumber seperti angin, laut, sinar matahari, biogas, biomassa, biofuel, panas bumi, hidro dan sampah kota [4]. Salah satu yang terus dilakukan dalam

beberapa tahun terakhir ini adalah penggunaan sel surya pada daerah-daerah yang menerima sinar matahari cukup diseluruh Indonesia sesuai dengan target pemerintah dimana penggunaan sel surya bisa mencapai 900 MW [5].

Penggunaan sel surya memang memiliki banyak keuntungan namun juga memiliki tantangan yang nyata diantaranya ketidakpastian alam, ketidakstabilan pengoperasian dan permasalahan penyimpanan energi [6]. Penyimpanan energi sel surya atau biasa dikenal dengan istilah *Energy Storage System* (ESS) dapat berupa baterai [7], sistem penyimpanan energi (ESS) hidro yang dipompa, Gravity ESS, ESS magnetik superkonduktor dan penyimpanan energi udara terkompresi (CAES) [8].

Salah satu baterai yang dikembangkan adalah baterai aliran redoks (*Redox Flow Battery* (RFB)) dimana baterai jenis ini merupakan baterai sekunder yang bisa diisi ulang dan memiliki keunggulan menyimpan energi dalam jumlah yang besar dan mudah dalam manajemen perawatan [9]. Beberapa jenis model RFB yang bisa ditemui saat ini diantaranya adalah baterai aliran redoks berbasis Vanadium (VRFB) [10], Zink-Bromine [11] dan asam timbal [12]–[14]. Baterai aliran redoks asam timbal atau dikenal juga dengan baterai dinamis asam timbal (*Dynamic Lead Acid Battery* (DLAB)) memiliki keuntungan dibandingkan baterai redoks lainnya yang dimana hanya dibutuhkan satu elektrolit dalam pengoperasiannya sedangkan jenis

yang lain membutuhkan dua buah elektrolit dan membran khusus yang hanya membolehkan proton lewat.

DLAB menjadi baterai aliran redoks yang banyak diperhitungkan sejak karakteristik DLAB sel tunggal dipublikasikan [15]–[17]. Namun laporan mengenai reaksi di permukaan antara elektroda dan elektrolit masih belum banyak ditemui terkait sulitnya mengukur hal ini secara eksperimen. Reaksi dipermukaan elektroda merupakan reaksi redoks antara spesies aktif elektrolit dengan elektroda negatif Pb dan elektroda positif PbO<sub>2</sub> [18].

Di sisi lain, simulasi menjadi salah satu metode yang banyak digunakan untuk memodelkan suatu keadaan yang kompleks atau rumit untuk kemudian dicari solusinya. Pemodelan atau simulasi memiliki keuntungan diantaranya dengan menggunakan model yang benar maka kita bisa memperoleh hasil yang diharapkan, waktu yang relatif singkat dan mudah dikembangkan sesuai/mendekati kenyataan yang ada. Simulasi biasanya digunakan sebagai kegiatan praeksperimen yang berbiaya mahal atau penyederhaan sistem yang rumit [19], [20]. Seringkali, keberhasilan simulasi divalidasi dengan hasil eksperimen sebelum dilakukan analisa lebih mendalam terhadap variabel-variabel fisis yang digunakan [21].

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi terkait dengan pembuatan model DLAB satu sel dan memunculkan karakteristik baterainya. Kemudian dilakukan variasi luas permukaan elektroda untuk dilakukan analisa tentang variabel baterai yang terpengaruh akibat perubahan luas elektroda terutama dinamika tegangan dan konsentrasi zat aktif dalam sistem baterai. Saat dilakukan pengisian baterai dengan arus konstan diharapkan baterai akan menyimpan muatannya dalam sel, lebih spesifik lagi di dalam elektroda sehingga bila luasan elektroda diperbesar maka semakin banyak pula muatan yang bisa tersimpan. Peningkatan jumlah muatan ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi baterai. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Comsol Multiphysics dengan model 2D.

## METODOLOGI PENELITIAN

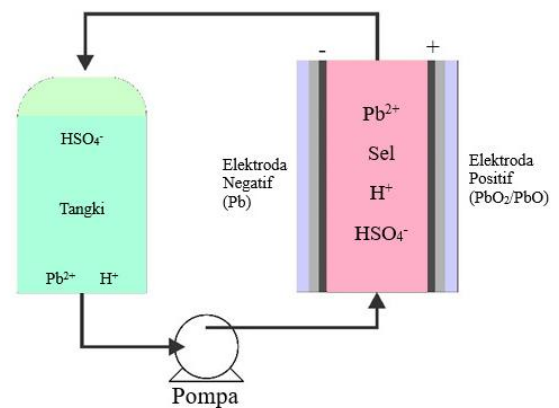
Penelitian dilakukan dengan membuat geometri baterai DLAB seperti keadaan fisisnya pada Gambar 1. Sistem fisis baterai terdiri dari 3 bagian yakni (1) sel baterai yang terdiri dari elektroda positif (PbO<sub>2</sub>) dan elektroda negatif (Pb) yang di dalamnya terdapat elektrolit dari campuran air, asam metana sulfonat dan timbal metana sulfonat yang akan menghasilkan ion aktif H<sup>+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> saat terjadi disosiasi.

Transport massa saat terjadi proses redoks dapat dijelaskan dengan menggunakan distribusi arus tersier (*tertiary current distribution*) dan Nerst-Planck *Interface*. Pada kasus ini, mobilisasi muatan lebih banyak disebabkan oleh perbedaan potensial di dalam sel potensial termasuk di dalam elektrolit, selain itu difusi partikel karena perbedaan konsentrasi dan konveksi juga diperhitungkan pada simulasi seperti tampak pada Persamaan 1.

$$J_i(x) = -D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} + C_i v(x) \quad (1)$$

Keterangan persamaan Nerst-Planck *Interface*:

- $J_i(x)$  : fluks jenis (mol s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>) pada jarak x dari permukaan
- $D_i$  : koefisien difusi (cm<sup>2</sup>/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
- $v(x)$  : kecepatan elemen volume larutan yang bergerak di sepanjang sumbu x (m/s)



Gambar 1. Sistem fisis DLAB terdiri dari pompa yang mengalirkan elektrolit dari tanki elektrolit ke sel baterai.

Potensial listrik pada kedua elektroda diasumsikan tidak bergantung ruang (*space independent*) dan elektroda negatif dibumikan (*ground*). Pada elektroda positif, potensial listrik dihitung untuk memenuhi kondisi rapat arus yang ditentukan oleh siklus beban menggunakan syarat batas dan batas antarmuka elektrolit-batas elektroda. Kinetika reaksi pada kedua elektroda (dalam bentuk densitas arus listrik) diekspresikan dengan persamaan Butler-Volmer.

Saat sistem baterai dijalankan, diasumsikan pompa akan mengalirkan elektrolit dengan jenis aliran fluida laminar dikarenakan dari segi ketebalan, elektrolit memiliki bilangan Reynold (Re) 300. Beberapa parameter penting lain yang dimasukkan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Proses pengisian-pengosongan dilakukan pada suhu 300K dan variasi luas elektroda sebanyak 4 yakni 8 cm<sup>2</sup> (DLAB1), 12 cm<sup>2</sup> (DLAB2), 16 cm<sup>2</sup> (DLAB3) dan 20 cm<sup>2</sup> (DLAB4). Densitas arus 200 A/m<sup>2</sup>, jarak antar elektroda 12 mm, volume elektrolit 1500 cc, waktu pengisian dan pengosongan dibuat sama yakni 2 jam dengan jeda 60 s dan lebar elektroda 0,01 cm diterapkan sebagai parameter masukan lainnya.

Tabel 1. Parameter masukan pada simulasi DLAB

Parameter	Nilai	Keterangan
D_PbII	$0,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi ion Pb dielektrolit
D_H	$9,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi proton dielektrolit
D_HSO <sub>4</sub>	$1,33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Koefisien difusi HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> dielektrolit
c0_PbII	500 mol/m <sup>3</sup>	Konsentrasi ion Pb
c0_H	500 mol/m <sup>3</sup>	Konsentrasi proton
p_out	300 kPa	Tekanan outlet
U_in	0,023 m/s	Kecepatan inlet
K0_Pb	$2,1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	Konstanta kelajuan reaksi elektroda negative
K0_PbO <sub>2</sub>	$2,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	Konstanta kelajuan reaksi elektroda positif
K0f	K0b x 100000	Konstanta kelajuan reaksi maju PbO
K0b	$2,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	Konstanta kelajuan reaksi mundur PbO

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Keadaan Fisis Sistem Baterai

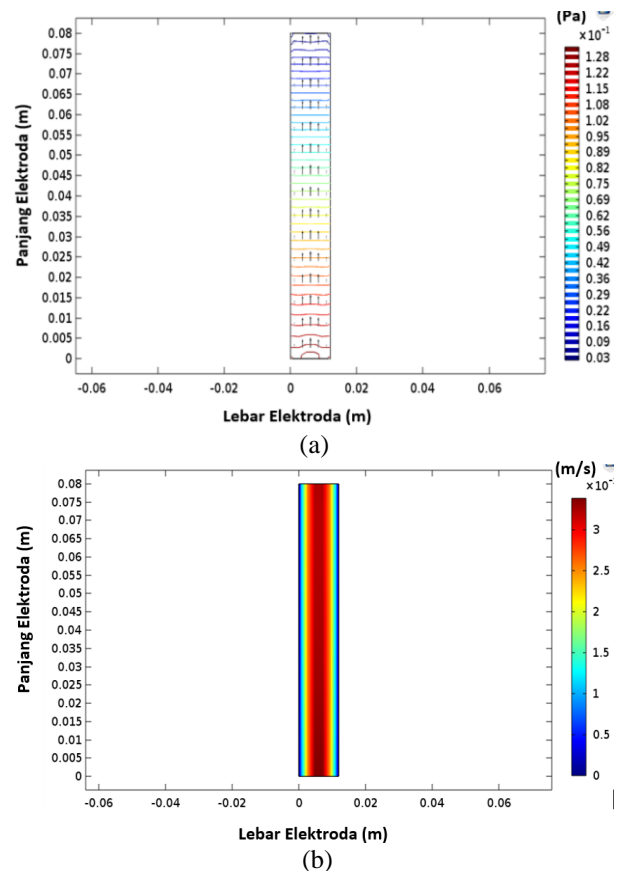
Hasil simulasi sistem fisis menunjukkan bahwa aliran fluida (elektrolit) berjalan dengan baik seperti tampak pada Gambar 2 yang memperlihatkan distribusi tekanan (Gambar 2 (a)) dan kelajuan alir elektrolit (Gambar 2(b)). Tekanan mengalami kenaikan dari atas (*outlet*) menuju ke bawah (*inlet*) pada range nilai 0,003-0,128 Pa pada Gambar 2(a) dan Gambar 2b menunjukkan aliran laminar telah terjadi pada sistem dimana terlihat kecepatan aliran elektrolit meningkat dari bagian permukaan elektroda menuju ke tengah dan nilai kecepatan elektrolit dari bawah ke atas bernilai sama untuk semua ketinggian.

Adanya perbedaan tekanan pada fluida sepanjang ketinggiannya menunjukkan hukum fisika sudah berlaku dimana energi total yang dihasilkan dalam sistem fisis konstan sesuai dengan hukum Bernoulli. Bernoulli menyatakan bahwa jumlah tekanan, energi kinetik persatuan volume dan energi potensial persatuan volume pada semua titik selalu konstan. Pada sistem baterai ini, saat ketinggian elektrolit naik maka energi potensial juga meningkat, sedangkan kecepatan aliran elektrolit di bagian *inlet* hingga *outlet* memiliki nilai yang sama pada semua ketinggian sebagai efek dari aliran laminar (Gambar 2 (b)), maka tekanan akan menurun seiring kenaikan ketinggian.

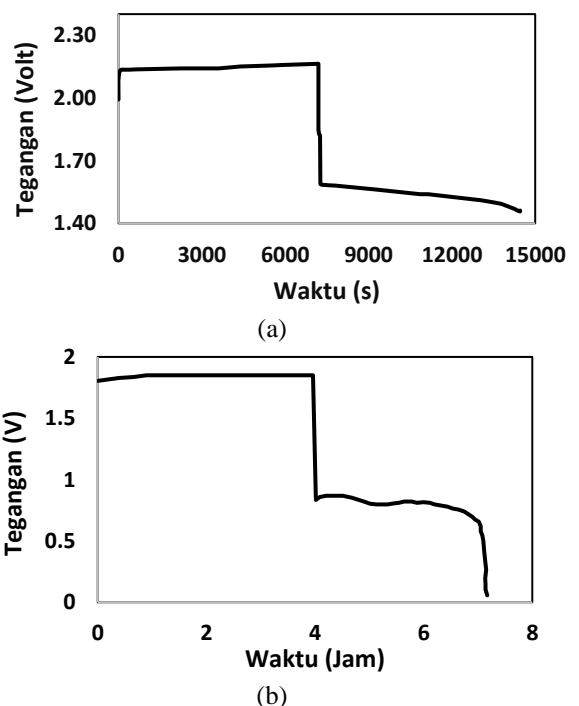
### Karakteristik Baterai DLAB

Gambar 3 menunjukkan perbandingan tegangan baterai yang didapatkan dari simulasi dan penelitian sebelumnya [22] dimana dapat kita temukan bahwa terdapat trend yang sama pada kedua baterai (Gambar 3(a) dan Gambar 3(b)) selama proses *charging* maupun *discharging*. Pada proses pengisian, tegangan naik pesat diawal pengisian yang dilanjutkan kenaikan lambat setelahnya hingga akhir pengisian. Sementara selama fase istirahat, tegangan baterai nampak jatuh. Hal ini terjadi karena selama fase istirahat sudah tidak ada lagi energi listrik yang diberikan dan justru terjadi reaksi spontan di dalam sel baterai. Pada proses pengosongan nampak tegangan turun secara pelan hingga akhir.

Perbedaan angka-angka antara eksperimen dan simulasi terjadi karena perbedaan luas elektroda dan karakteristik instrinsik elektroda dan elektrolit yang digunakan seperti dijelaskan pada bagian metodologi dan yang terlihat pada Tabel 1.

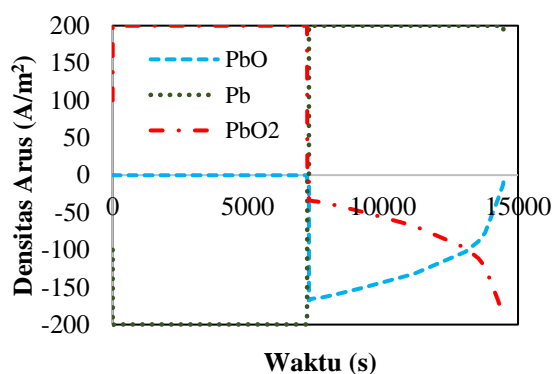


Gambar 2. Grafik 2D distribusi (a) tekanan dan (b) kecepatan terhadap geometri DLAB1.

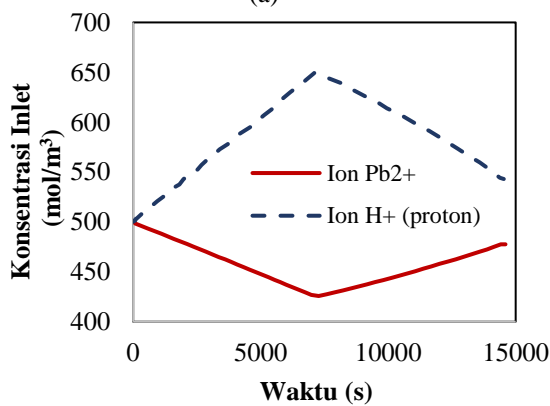


Gambar 3. Tegangan terhadap waktu pada DLAB (a) simulasi dan (b) penelitian sebelumnya[22].

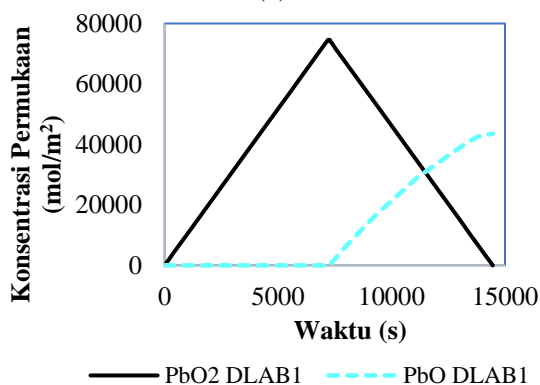
Sementara itu, selama pengisian nampak sistem baterai bekerja dengan baik yang ditunjukkan dengan densitas arus yang memasuki kedua elektroda selalu sama dengan  $200 \text{ A/m}^2$  (Gambar 4 (a)). Ketika proses *charging*, reaksi oksidasi pada elektroda negatif mengalami densitas arus konstan  $-200 \text{ A/m}^2$  sebaliknya pada elektroda positif terjadi arus konstan  $200 \text{ A/m}^2$  dan hal sebaliknya terjadi saat proses pengosongan baterai dilakukan. Densitas arus positif terjadi pada elektroda negatif dimana rekasi oksidasi terjadi dan sebaliknya densitas arus negatif terjadi pada elektroda positif saat reaksi reduksi berlangsung. Reaksi reduksi ion  $\text{Pb}^{4+}$  pada elektroda positif membentuk  $\text{PbSO}_4$  dan  $\text{PbO}$ .  $\text{PbO}$  merupakan produk sampingan yang bisa berubah kembali menjadi  $\text{PbO}_2$  saat proses pengisian pada siklus kedua dilakukan.



(a)



(b)



(c)

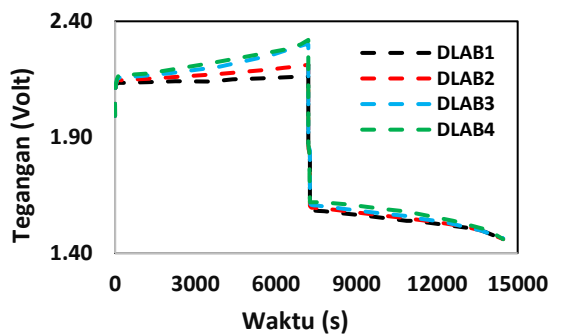
Gambar 4. (a) Densitas Arus (b) Konsentrasi Inlet dan (c) Konsentrasi Permukaan

Gambar 4 (b) menunjukkan konsentrasi ion aktif pada inlet selama proses pengisian-pengosongan. Konsentrasi proton (ion  $\text{H}^+$ ) meningkat dengan kecepatan reaksi dua kali lebih banyak dibandingkan penurunan konsentrasi ion  $\text{Pb}^{2+}$  yang disebabkan oleh jumlah koefisien dalam stoikiometri reaksi totalnya berbeda. Penurunan nilai konsentrasi ion  $\text{Pb}^{2+}$  mengindikasikan bahwa selama proses pengisian ion  $\text{Pb}^{2+}$  berubah menjadi padatan  $\text{Pb}$  dan  $\text{PbO}_2$ . Hal sebaliknya terjadi saat pengosongan baterai dilakukan. Sementara itu Gambar 4 (c) memperlihatkan jumlah konsentrasi padatan  $\text{PbO}_2$  dan  $\text{PbO}$  yang terbentuk pada elektroda positif selama proses pengisian dan pengosongan. Pada proses pengisian, hanya  $\text{PbO}_2$  saja yang terbentuk sebagai akibat reaksi oksidasi. Sedangkan pada proses reduksi selama pengosongan terjadi pengurangan padatan  $\text{PbO}_2$  dan terjadi pembentukan  $\text{PbO}$  pada elektroda positif.

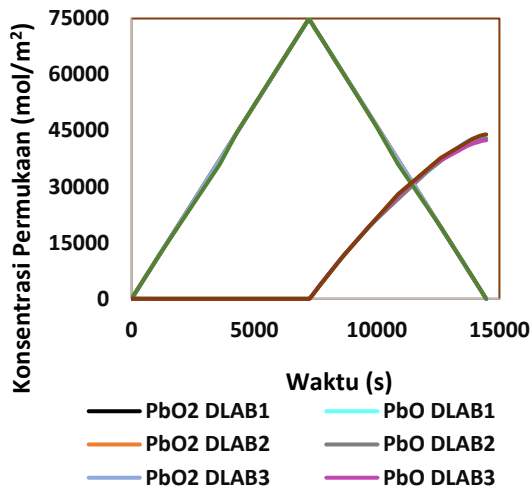
### Pengaruh Luas Elektroda pada Tegangan Baterai dan Konsentrasi Permukaan Elektroda

Penyimpanan muatan dalam elektroda terjadi ketika *charging* yang ditandai dengan kenaikan tegangan. Tegangan turun akibat muatan keluar dari elektroda ketika *discharging*. Gambar 5(a) menunjukkan kenaikan nilai tegangan akibat dari penambahan luas permukaan elektroda selama dilakukan pengisian dan pengosongan. Semakin luas permukaan yang digunakan maka semakin besar muatan yang mampu disimpan dalam elektroda selama pengisian. Peningkatan jumlah muatan ini membuat disparitas muatan menjadi semakin besar menyebabkan tegangannya naik. Muatan yang disimpan ini kemudian dilepas saat pengosongan. DLAB4 yang memiliki luasan terbesar memiliki jumlah muatan yang paling banyak, sehingga saat semua baterai dikosongkan dengan arus yang sama, baterai DLAB4 memiliki kecenderungan tegangan lebih tinggi yang diikuti oleh DLAB3, DLAB2 dan DLAB1.

Senyawa  $\text{PbO}_2$  terbentuk saat reaksi oksidasi pada elektroda positif. Saat dilakukan proses sebaliknya, terjadi reduksi ion  $\text{Pb}^{4+}$  menjadi  $\text{Pb}^{2+}$  menjadi  $\text{PbO}$  dan  $\text{PbSO}_4$  yang bagian kedua ini terdapat pada elektrolit sedangkan bagian pertama terbentuk pada elektroda positif. Jumlah reaksi dipengaruhi oleh konstanta laju reaksi dan penggunaan arus listrik sehingga nampak pada Gambar 5(b) penambahan luas elektroda (DLAB1, DLAB2, DLAB3, dan DLAB4) tidak banyak mempengaruhi konsentrasi permukaan elektroda. Trend grafik menunjukkan tidak ada perbedaan yang menonjol pada konsentrasi permukaan  $\text{PbO}$  maupun  $\text{PbO}_2$  bahkan cenderung tumpang tindih satu dengan yang lainnya.



(a)



Gambar 5. Pengaruh luas permukaan terhadap karakteristik (a) tegangan dan (b) konsentrasi permukaan elektroda.

**Efisiensi Energi DLAB**

Perhitungan efisiensi didasarkan pada nilai tegangan tengah ketika *charging* dan tegangan tengah ketika *discharging* [23].

$$E_c = V_c I_c T_c \tag{2}$$

$$E_d = V_d I_d T_d \tag{3}$$

$$Eff = \frac{E_d}{E_c} \times 100\% \tag{4}$$

Keterangan :

- $E_c$  : densitas energi pengisian ( $J/m^2$ ),
- $E_d$  : densitas energi pengosongan ( $J/m^2$ )
- $V_c$  : tegangan tengah pengisian (V)
- $V_d$  : tegangan tengah pengosongan (V)
- $I_c$  : densitas arus listrik pengisian ( $A/m^2$ )
- $I_d$  : densitas arus listrik pengosongan ( $A/m^2$ )
- $T_c$  : durasi pengisian (s)
- $T_d$  : durasi pengosongan(s)
- $Eff$  : efisiensi energi (%).

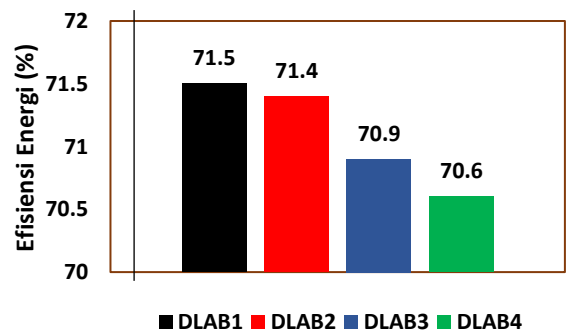
Pengisian dan pengosongan pada semua variasi **DLAB** dilakukan selama 7200 s. Tabel 2 menunjukkan bahwa energi pengisian dan energi pengosongan baterai semakin besar dengan naiknya luas permukaan yang digunakan hal ini berasosiasi langsung dengan naiknya tegangan. Namun bila dilakukan perbandingan antara

energi *discharging* terhadap energi *charging* diperoleh grafik efisiensi energi listrik ( $E_{ff}$ ) seperti pada Gambar 6. Efisiensi energi baterai berkisar dari 71.5 % - 70,6 % dimana semakin besar luas permukaan elektroda menghasilkan nilai efisiensi yang semakin kecil.

Tabel 2. Perhitungan Energi Listrik Ketika *Charge-Discharge* pada **DLAB**

Baterai	$V_t$ (V)	$I$ (mA/m <sup>2</sup> )	$t$ (s)	$E$ (J/m <sup>2</sup> )
<i>Charging</i>				
DLAB1	2,14	200	7200	3081,6
DLAB2	2,17	200	7200	3124,8
DLAB3	2,20	200	7200	3168,0
DLAB4	2,21	200	7200	3182,4
<i>Disharging</i>				
DLAB1	1,53	200	7200	2203,3
DLAB2	1,55	200	7200	2232,0
DLAB3	1,56	200	7200	2246,4
DLAB4	1,56	200	7200	2246,4

Hal ini terjadi karena penggunaan pengosongan pada simulasi tidak dilakukan hingga kapasitas baterai benar-benar habis. Pembatasan durasi pengosongan selama 2 jam membuat baterai dengan luasan terbesar menyisakan lebih banyak muatan seperti tampak pada grafik tegangan (Gambar 5a) dimana *drop voltage* belum terjadi.



Gambar 6 Efisiensi baterai DLAB dengan berbagai macam variasi luas permukaan

**KESIMPULAN**

Simulasi 2D *Dynamic Lead Acid Battery* (DLAB) berhasil dilakukan dengan menggunakan *software* Comsol Multiphysics dengan variasi luas permukaan elektroda. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bertambahnya luas permukaan elektroda meningkatkan jumlah muatan yang disimpan di dalam sel dengan indikasi naiknya tegangan sel pada seluruh variasi luas permukaan. Sementara itu, konsentrasi permukaan elektroda tidak tampak terpengaruh oleh perbedaan luas permukaan dikarenakan jumlah konsentrasi ini dipengaruhi oleh laju reaksi kimia yang terjadi. Efisiensi baterai yang dihasilkan terbilang baik dengan range 70,6% - 71,5% walaupun terdapat tren penurunan konsentrasi dengan bertambahnya luas permukaan elektroda.

## SARAN

Perlu dilakukan simulasi pengisian baterai hingga penuh dan pengosongan baterai hingga benar-benar kosong untuk mengetahui nilai efisiensi baterai secara lebih detail.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Looney, B. 2020, *BP Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets*, 69<sup>th</sup> Edition, BP p.l.c., London.
- [2] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2020). *Indonesia Energy Outlook 2020 - Special Edition Dampak Pandemi COVID-19 terhadap Sektor Energi di Indonesia*.
- [3] CNN Indonesia. (2021, 8 Januari). *Rasio Elektrifikasi Capai 99,2 Persen pada 2020*. Diakses pada 1 Mei 2021, dari <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20210107165757-85-590833/rasio-elektrifikasi-capai-992-persen-pada-2020>.
- [4] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019: The Impact of Increased Utilization of New and Renewable Energy on the National Economy*.
- [5] Kementerian ESDM. (2021, 4 April). 3 Tahun Kinerja Sektor ESDM: Lampu Surya Hemat Energi, Melistriki Desa Belum Berlistrik. April, 1–5. Diakses pada 1 Mei 2021, dari <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/3-tahun-kinerja-sektor-esdm-lampu-surya-hemat-energi-melistriki-desa-belum-berlistrik>.
- [6] Cheng, S., Zhao, G., Gao, M., Shi, Y., Huang, M., & Marefati, M. (2021). A new hybrid solar photovoltaic/ phosphoric acid fuel cell and energy storage system; Energy and Exergy performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(11), 8048–8066.
- [7] Meng, Q., Liu, T., Su, C., Niu, H., Hou, Z., & Ghadimi, N. (2020). A Single-Phase Transformer-Less Grid-Tied Inverter Based on Switched Capacitor for PV Application. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(1), 257–270.
- [8] Kong, L., Yu, J., & Cai, G. (2019). Modeling, control and simulation of a photovoltaic /hydrogen/ supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(46), 25129–25144.
- [9] Reynard, D., Dennison, C. R., Battistel, A., & Girault, H. H. (2018). Efficiency improvement of an all-vanadium redox flow battery by harvesting low-grade heat. *Journal of Power Sources*, 390, 30–37.
- [10] Zhang, Z. H., Wei, L., Wu, M. C., Bai, B. F., & Zhao, T. S. (2021). Chloride ions as an electrolyte additive for high performance vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 289.
- [11] Xu, Z., Fan, Q., Li, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Review of zinc dendrite formation in zinc bromine redox flow battery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(2), 109838.
- [12] Pletcher, D., & Wills, R. (2005). A novel flow battery - A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II): III. The influence of conditions on battery performance. *Journal of Power Sources*, 149(1–2), 96–102.
- [13] Ghufron, M., Istiroyah, Perwita, C. A., Masruroh, Khairati, N., Ramadhan, F. R., Setiawan, Y. E., & Pranata, K. B. (2020). Influence of electrolyte concentration on static and dynamic Lead-Acid battery. *Journal of Physics: Conference Series*, 1595(1), 0–8.
- [14] Ghufron, M., Setiawan, Y. E., Perwita, C. A., Khairati, N., Susilo, R. D., Amirullah, A. A., & Pranata, K. B. (2018). Relationship Between Current Discharge to Static and Dynamic Lead Acid Battery Performance. *International Journal of Engineering Technology and Scientific Innovation*. 3 (6) 250-257.
- [15] Pletcher, D., & Wills, R. (2005). A novel flow battery - A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II): III. The influence of conditions on battery performance. *Journal of Power Sources*, 149(1–2), 96–102.
- [16] Hazza, A., Pletcher, D., & Wills, R. (2005). A novel flow battery - A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II): IV. The influence of additives. *Journal of Power Sources*, 149(1–2), 103–111.
- [17] Pletcher, D., Zhou, H., Kear, G., Low, C. T. J., Walsh, F. C., & Wills, R. G. A. (2008). A novel flow battery-A lead-acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II). Part VI. Studies of the lead dioxide positive electrode. *Journal of Power Sources*, 180(1), 630–634.
- [18] Nandanwar, M. N., Kumar, K. S., Srinivas, S. S., & Dinesh, D. M. (2020). Pump-less, free-convection-driven redox flow batteries: Modelling, simulation, and experimental demonstration for the soluble lead redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 454.
- [19] Barkah, R. D. (2019). Simulasi Charge Discharge Model Baterai Lead Acid. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 3(2), 128–134.
- [20] Khairati, N., Ghufron, M., & Pranata, K. B. (2018). Optimasi Kapasitas Baterai Dinamis Asam Timbal (Redox Flow Battery). *SMARTICS Journal*, 4(2), 44–48.
- [21] Yunata, E. E., & Ghufron, M. (2019). The study of plasma parameter and the effect of experiment set up modification by using modelling software. *Malaysian Journal of Science*, 38(3), 1–9.
- [22] León, C. P., Frías-Ferrer, A., González-García, J., Szánto, D. A., & Walsh, F. C. (2006). Redox flow cells for energy conversion. *Journal of Power Sources*, 160(1), 716–732.
- [23] Masters, G. M. (2013). *Renewable and Efficient*. John Wiley & Sons.