

## Simulasi Pengaruh Porositas Elektroda Terhadap Karakteristik *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB)

Irvan Fajar H<sup>1</sup>, Silvi Hadila<sup>1</sup>, Ervinka Felindia<sup>1</sup>, Satria P. P. Kumara<sup>1</sup>, Mauludi A. Pamungkas<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, Jl. Veteran, Malang, 65154*

<sup>2</sup>*Jurusan Pendidikan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Kanjuruhan Malang, Jl. Sudancho Supriyadi 48, Malang, 65148*

\*Email: [mghufron@ub.ac.id](mailto:mghufron@ub.ac.id)

### Abstract

The best efficiency electrical energy storage (EES) is needed for the production of renewable electrical energy. The Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) is a battery that plays an important role in the production of renewable energy. COMSOL Multiphysics 5.1 software was used to build 2D VRFB modeling. Modeling of VRFB built up following physics principles such as electrostatics and the Nernst equation that focused on mass, charge, momentum transport, and conservation, as well as a detailed model for vanadium species reactions in a battery system. Experimental data is validated by experimental data. The aim of the study is to see how different electrode porosity (30%, 50%, 70%, and 90%) affect a VRFB device. The increasing of electrode porosity reduced the chemical reaction at the electrode, increased the electrolyte potential, and decreased the molarity of electrolyte species during charging and discharging.

*Keywords: Vanadium Redox Flow Battery, Redox Flow Battery, Electrode Porosity*

### Abstrak

Perkembangan energi listrik terbarukan sangat membutuhkan tempat penyimpanan energi dengan performa terbaik. Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) adalah baterai dengan performa yang menjanjikan yang menjadikannya sebagai peran kunci dalam pengembangan energi listrik terbarukan. Pemodelan VRFB dibuat menggunakan COMSOL Multiphysics sesuai dengan prinsip VRFB yaitu menggunakan persamaan Nernst dan elektrodinamika. Model dua dimensi didasarkan pada uraian komprehensif tentang massa, muatan, momentum transportasi, dan konservasi yang dikombinasikan dengan model kinetik secara menyeluruh untuk reaksi spesies vanadium pada sistem baterai. Model yang digunakan divalidasi dengan data hasil eksperimen untuk mempelajari pengaruh variasi laju alir elektrolit sebesar porositas elektroda sebesar 30%, 50%, 70%, dan 90% pada sistem VRFB. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan nilai porositas elektroda menurunkan reaksi kimia pada elektroda, menaikkan potensial elektrolit, menurunkan molaritas spesies elektrolit saat *charging* dan *discharging*.

*Kata kunci: Vanadium Redox Flow Battery, Redox Flow Battery, Porositas Elektroda*

## 1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi yang pesat membuat kebutuhan listrik semakin tinggi. Menurut data Dewan Energi Nasional (DEN), Indonesia memiliki kebutuhan energi yang besar untuk sektor rumah tangga, setelah itu disusul dengan sektor industri, komersial, dan sektor transportasi. Permintaan energi terus meningkat hingga 49% pada tahun 2018 dan akan terus meningkat hingga tahun 2050 dengan peningkatan tiap tahunnya sebesar 3,9% prosentase kebutuhan listrik pada 2050 akan menjadi 58% untuk *Business as Usual* (BaU), 60% skenario Pembangunan Berkelanjutan (PB), dan 61% untuk skenario rendah karbon (RK)[1]. Sehingga pemerintah membutuhkan energi listrik tambahan untuk memenuhi kebutuhan harian tersebut.

Energi Listrik Baru Terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah panel surya. Daya yang dihasilkan oleh panel surya diperkirakan akan memiliki nilai yang besar yaitu 207,8 GW dibandingkan dengan energi alternatif lainnya[2]. Kurangnya sistem penyimpanan energi (EES) yang efektif, efisien dan seragam merupakan salah satu kendala utama yang menghambat implementasi jenis pembangkit listrik dengan daya yang besar yang menjadi kerugian serius dalam pembangunan EBT[3]. Dalam konteks ini salah satu penyimpanan energi yang dapat diandalkan adalah *redox flow battery* (RFB) yang merupakan perangkat penyimpanan energi yang efisien yang mampu mengubah energi kimia menjadi energi listrik dan sebaliknya. Kapasitas RFB dapat disetel dengan memvariasikan konsentrasi atau volume elektrolit yang disimpan dalam tangki terpisah, sedangkan daya bergantung pada ukuran elektroda dan jumlah sel yang menyusun tumpukan[4].

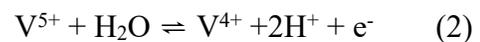
RFB memiliki beberapa jenis dengan berbagai macam bahan yang digunakan, salah satunya baterai aliran redoks berbasis Vanadium (VRFB)[5]. VRFB merupakan baterai dinamis yang memiliki keunggulan kapasitas besar, umur yang panjang, ramah

lingkungan, dan efisiensi yang tinggi[6]-[7]. VRFB memiliki 2 jenis elektrolit dengan spesies  $V^{2+}/V^{3+}$  untuk setengah sel negatif dan  $V^{4+}/V^{5+}$  untuk setengah sel positif yang secara efisien dapat mengurangi kontaminasi silang melalui membran separator[8]. Reaksi yang terjadi pada VRFB adalah reaksi redoks dengan bilangan oksidasi yang berbeda dari elemen vanadium yang sama seperti pada persamaan 1 dan persamaan 2. Penggunaan elektrolit sebagai reaksi redoks memiliki keunggulan untuk mengurangi kontaminasi yang biasa terjadi pada elektroda[9].

- Elektroda negatif



- Elektroda Positif



Peran elektroda pada *Vanadium Redox Flow Battery* lebih sederhana dibandingkan dengan baterai konvensional, yaitu sebagai penyedia permukaan yang aktif ketika terjadi proses reduksi dan oksidasi saat *charge* ataupun *discharge*[10]. Elektroda memainkan peran penting yang memengaruhi kinerja dan umur baterai, sehingga pemilihan bahan pada elektroda harus dipertimbangkan[11].

Ada berbagai kriteria untuk memilih bahan elektroda, seperti konduktivitas listrik, ketahanan terhadap korosi dan luas permukaan spesifik, yang terakhir tergantung pada struktur mikro dan porositas[12-13]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Shah A.A dkk pada tahun 2009 peningkatan porositas dapat mengakibatkan penurunan konduktivitas curah, peningkatan difusi, peningkatan permeabilitas, dan volume elektrolit yang lebih besar dalam elektroda[14]. Sehingga optimasi penggunaan porositas elektroda masih harus dikembangkan. Selain itu peningkatan porositas elektroda mempengaruhi fluks elektron dari reaksi redoks pada permukaan elektroda. Namun, penelitian mengenai struktur elektroda dengan analisis eksperimental sistematis dapat menghabiskan banyak waktu, tenaga, dan sumber daya. Sehingga penggunaan penelitian simulasi

dibutuhkan untuk mencari pengaruh porositas elektroda terhadap fluks elektron dari reaksi redoks pada permukaan elektroda [15]. Telah banyak simulasi maupun disertai dengan penelitian faktual yang telah dilakukan untuk mengetahui efek apa saja yang bisa ditimbulkan oleh porositas VRFB terutama pada kecepatan reaksi kimia, potensial sel, overpotensial dan efisiensi sel [16-18], namun pembahasan terkait dengan parameter seperti distribusi potensial elektrolit, distribusi konsentrasi elektrolit di permukaan sel dan distribusi kecepatan reaksi kimia pada sel secara 2D masih belum dibahas secara lebih dalam. Parameter-parameter ini bisa membantu memberikan penjelasan lebih terkait dengan potensial sel, overpotensial, batas densitas arus listrik, kerugian ohmik dan efisiensi pada VRFB.

Penelitian ini melakukan simulasi terkait dengan pembuatan model 2D VRFB dan memunculkan keluaran karakteristik berupa distribusi potensial elektrolit, kecepatan reaksi kimia dan konsentrasi elektrolit saat pengisian-pengosongan. Kemudian dilakukan analisa pengaruh variasi porositas elektroda terhadap karakteristik baterai. Peningkatan porositas elektroda diharapkan dapat memperlihatkan perubahan karakteristik baterai pada elektroda dengan bertambahnya reaksi antara permukaan elektroda dengan elektrolit yang terjadi pada baterai sehingga dapat meningkatkan performa baterai. Pemodelan *vanadium redox flow battery* (VRFB) dibuat dengan menggunakan aplikasi Comsol Multiphysics 5.1 dan WebPlot Digitizer-3.8.

## 2. Metodologi Penelitian

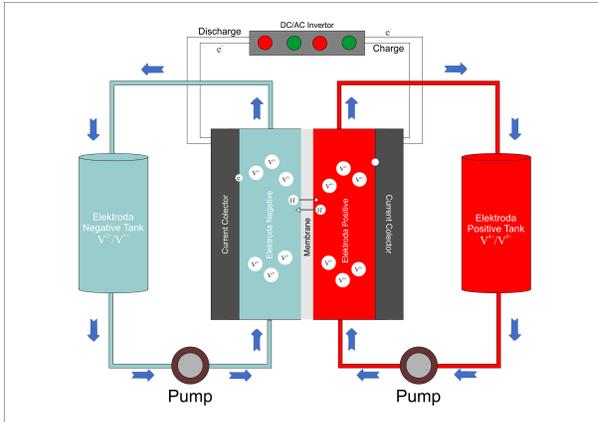
Penelitian ini dibagi menjadi 2 tahap yakni (1) pembuatan pemodelan numerik dan (2) pengujian analisis variasi porositas elektroda terhadap reaksi kimia baterai. Pemodelan VRFB terdiri dari beberapa bagian yang dapat dilihat pada gambar 1. Sistem VRFB dibuat terdiri dari dua buah elektroda positif dan negatif dengan bahan *carbon felt* yang memiliki ukuran  $0,035 \times 0,004 \text{ m}^2$ , di dalamnya dialirkan elektrolit yang terdiri dari ion vanadium

( $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$ ) pada elektroda negatif, ( $\text{VO}^{2+}/\text{VO}_2^+$ ) pada elektroda positif, pompa untuk mengalirkan elektrolit dengan asumsi aliran laminar dan membran pada bagian tengah sel yang memisahkan antara elektroda positif dan negatif.

Proses reaksi redoks dapat dijelaskan dengan menggunakan distribusi arus tersier (*tertiary current distribution*) dan persamaan Nernst-Planck antarmuka. Untuk memodelkan transport massa pada sistem baterai. 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 3.

Potensial listrik pada kedua elektroda diasumsikan tidak bergantung ruang. Bagian elektroda positif memiliki potensial listrik yang dihitung untuk memenuhi kondisi rapat arus yang ditentukan oleh siklus beban menggunakan syarat batas dan batas antarmuka elektrolit-batas elektroda. Reaksi kinetik kedua elektroda pada sistem baterai dapat disimulasikan dengan persamaan Butler-Volmer (dalam bentuk densitas arus listrik).

Saat sistem baterai dijalankan, diasumsikan pompa akan mengalirkan elektrolit dengan kelajuan 30 ml/menit dan jenis aliran fluida laminar bekerja pada sel baterai. Beberapa parameter penting lain yang dimasukkan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Proses pengisian-pengosongan dilakukan pada suhu 293.15 K dan variasi porositas elektroda sebanyak 4 yakni 30% (VRFB1), 50% (VRFB2), 70% (VRFB3) dan 90% (VRFB4).



Gambar 1. Sistem Fisis VRFB Terdiri dari 2 Pompa Yang Mengalirkan 2 jenis Elektrolit Pada Sel Positif Dan Negatif yang Terpisah oleh Membran

### 2.1. Pemodelan Numerik

Pemodelan yang digunakan pada penelitian ini dapat dijelaskan menggunakan transport massa dengan menggunakan distribusi arus tersier (*tertiary current distribution*) yang merupakan penerapan dari persamaan Nernst-Planck. Transport massa terjadi pada permukaan padat elektroda karbon berpori dapat dimodelkan dengan menggunakan hukum Butler-Volmer. Selain itu kesetimbangan potensial pada reaksi didalam sistem baterai dinamis berbasis vanadium dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Nernst-Planck berikut:

$$J_i(x) = -D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} + C_i v(x) \quad (3)$$

Keterangan persamaan Nerst-Planck *Interface*:

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

$D_i$  : koefisien difusi ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$\frac{\partial C_i(x)}{\partial x}$  : 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)

Karena reaksi terjadi pada permukaan ekektroda yang padat, kita menggunakan persamaan Butler-Volmer, dengan persamaan sebagai berikut:

- Elektroda Negatif

$$i_{neg} = L i_{0,n} \left( \exp \left( \left( \frac{(1-a_{neg})F\eta_n}{RT} \right) - \exp \left( -\frac{a_n F \eta_n}{RT} \right) \right) \right) \quad (4)$$

- Elektroda Positif

$$i_p = L i_{0,p} \left( \exp \left( \left( \frac{(1-a_{neg})F\eta_p}{RT} \right) - \exp \left( -\frac{a_{neg} F \eta_p}{RT} \right) \right) \right) \quad (5)$$

dengan L adalah luas permukaan spesifik (satuan SI:  $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) dari elektroda berpori,  $\alpha_{neg}$ ,  $\alpha_{pos}$  merupakan koefisien transfer (tanpa dimensi),  $k_{neg}$ ,  $k_{pos}$  merupakan konstanta laju, dan  $\eta_p$  dan  $\eta_n$  merupakan overpotential. Overpotensial pada elektroda dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq} \quad (6)$$

Diketahui bahwa  $\phi_s$  adalah potensial elektroda (satuan SI: V) dan  $\phi_l$  potensial elektrolit (satuan SI: V). Adapun parameter masukan pada simulasi dipilih sesuai dengan proses elektrokimia yang terjadi pada VRFB selama proses pengisian-pengosongan seperti yang dilaporkan oleh penelitian sebelumnya [19].

Tabel 1. Parameter masukan pada simulasi VRFB

Simbol	Nilai dan satuan	Keterangan
H_cell	0,035[m]	panjang elektroda
W cell	0,0285[m]	tinggi elektroda
L_e	0,004[m]	lebar elektroda
L_m	203x10 <sup>-6</sup> [m]	lebar membran
DV2	2,4x10 <sup>-10</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi V <sup>2+</sup>
DV3	2,4 x10 <sup>-10</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi V <sup>3+</sup>
DV4	3,9 x10 <sup>-10</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi VO <sup>2+</sup>
DV5	3,9 x10 <sup>-10</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi VO <sub>2</sub> <sup>+</sup>
DH	9,31 x10 <sup>-9</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi H <sup>+</sup>
DSO4	1,06 x10 <sup>-9</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
DHSO4	1,33 x10 <sup>-9</sup> [m <sup>2</sup> /s]	koefisien difusi HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>

70	1,48536	1,500248139
80	1,50273	1,530024814
90	1,532506	1,564764268

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Validasi Pemodelan VRFB

Validasi data dilakukan dengan membandingkan luaran VRFB hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh You, dkk pada tahun 2009 yang ada pada Tabel 2. Berdasarkan hasil validasi pemodelan dengan eksperimen pada Tabel 2, didapatkan hasil saat pengisian baterai dengan keadaan awal kapasitas baterai 10% dari total 100% kapasitas baterai terhadap perubahan potensial sel yang ada didalamnya. Keadaan awal potensial sel baterai saat di kapasitas 10 % ada pada angka 1,41 V, dimana angkanya tidak terlampaui jauh dengan yang ada pada hasil eksperimen yang telah dilakukan. Nilai potensial sel akan terus meningkat seiring dengan pengisian baterai tersebut. Pada saat pengisian 50% nilai potensial sel sebesar 1,46 V, dimana nilainya sama dengan nilai hasil eksperimen dari You, dkk pada tahun 2009[20].

Tabel 2. Hasil Simulasi dan Experimen Potensial Sel saat Charge

SOC	Potensial sel	
	Simulasi	Eksperimen [20]
10	1,418362	1,374937965
20	1,430769	1,399751861
30	1,440695	1,425806452
40	1,45062	1,443176179
50	1,460546	1,460545906
60	1,475434	1,481637717

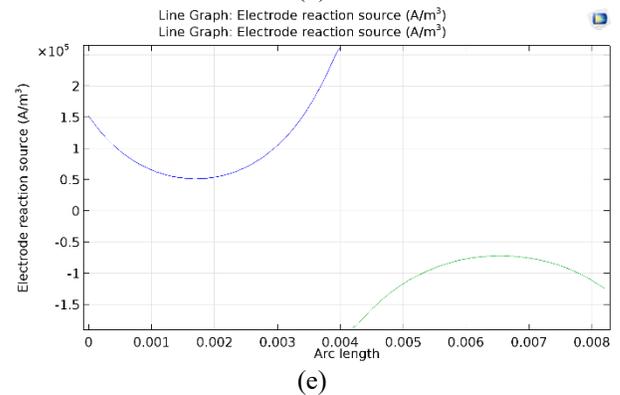
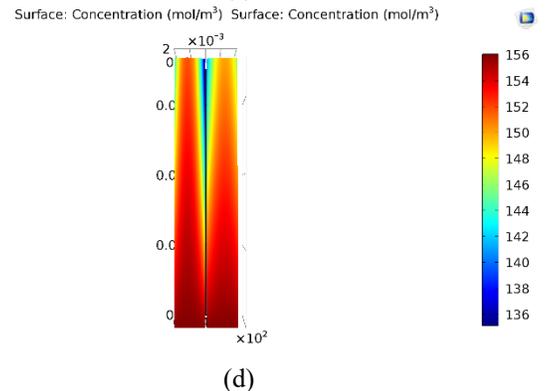
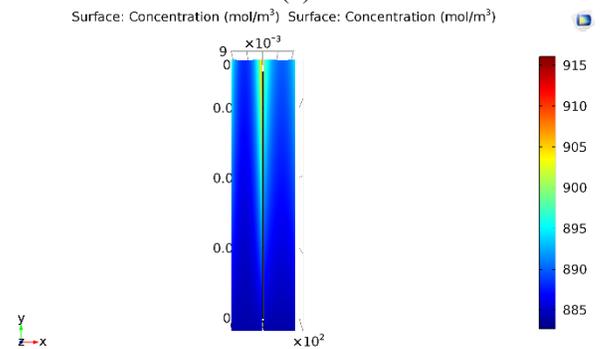
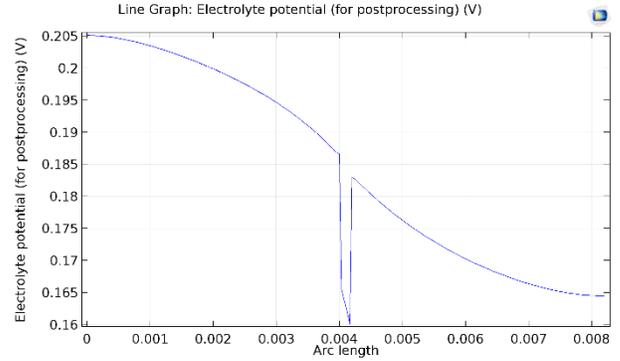
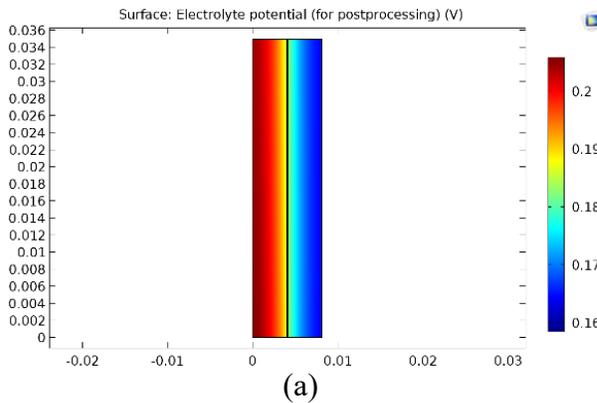
#### 3.2. Karakteristik Baterai

Berdasarkan hasil simulasi sistem fisis baterai dalam 2 dimensi yang ada pada gambar 2 (a-e) memperlihatkan karakteristik *vanadium redox flow battery* (VRFB). Pada Gambar 2(a) memperlihatkan distribusi potensial elektrolit yang mengalami peningkatan dari elektroda negatif menuju elektroda positif pada range nilai 0,16 V hingga 2,0 V saat *charging*. Gambar 2(b) merupakan grafik satu dimensi potensial elektrolit pada VRFB saat *charging* yang memperlihatkan trend distribusi potensial elektrolit pada elektroda positif dan negatif. Pada gambar 2(c) memperlihatkan distribusi molaritas elektrolit saat *charging* dengan spesies vanadium yang mengalami kenaikan dari bawah (*inlet*) ke atas (*outlet*) dengan range 885 hingga 915 mol/m<sup>3</sup>. Pada gambar 2(d) memperlihatkan distribusi molaritas elektrolit saat *discharging* yang mengalami penurunan dari bawah (*inlet*) ke atas (*outlet*) dan pada gambar 2(e) memperlihatkan grafik trend reaksi kimia saat *charging* pada elektroda positif (hijau) dan negatif (biru), dimana reaksi kimia banyak terjadi pada area kolektor arus setelah itu menurun pada bagian tengah elektroda dan naik kembali pada area dekat membran. Nilai negatif pada reaksi kimia di elektroda negatif dikarenakan arah arus pada elektroda positif berlawanan dengan arus di elektroda negatif.

Penurunan nilai potensial elektrolit dari kiri (elektroda negatif) ke kanan (elektroda positif) (Gambar 2(a dan b)) merupakan konsekuensi yang terjadi akibat perbedaan jumlah ion pada posisi tersebut. Menurut persamaan Nernst-Planck, mekanisme di dalam sel *Vanadium Redox Flow Battery* merupakan gabungan dari difusi, migrasi dan konveksi. Proses difusi suatu zat akan mengalami penurunan dengan semakin jauhnya jarak sesuai hukum Fick 1 sehingga semakin ke

kanan nilai transfer massa/transfer ion juga semakin kecil.

Sementara itu, tegangan pada membran tampak drop dibandingkan dengan kedua elektroda, hal ini terjadi karena pada bagian membran tidak terdapat ion-ion aktif pada kedua elektrolit. Peningkatan molaritas pada area outlet dan kolektor arus (Gambar 2(c)) terjadi karena kolektor arus mensuplai elektron sehingga daerah di dekat kolektor arus akan memiliki jumlah elektron yang banyak dan merangsang banyaknya reaksi redoks dan reaksi akan menurun pada bagian inlet karena jaraknya yang jauh dari kolektor arus. Fenomena sebaliknya terjadi saat pengosongan (Gambar 2(d)). Molaritas tinggi di daerah inlet karena menjadi area pertama reaksi redoks saat *discharging* dilakukan. Produk reaksi dan ion-ion yang belum bereaksi naik ke arah outlet yang mana konsentrasi zat aktif ini lebih sedikit menyebabkan reaksi spontan juga berkurang. Perubahan nilai reaksi kimia pada trend grafik gambar 2(e) dipengaruhi oleh evolusi kerapatan arus pada elektroda negatif selama pengisian hal tersebut dijelaskan pada persamaan Butler-Volmer. Kerapatan arus yang maksimum akan membuat nilai reaksi kimia pada elektroda memiliki nilai yang maksimal.



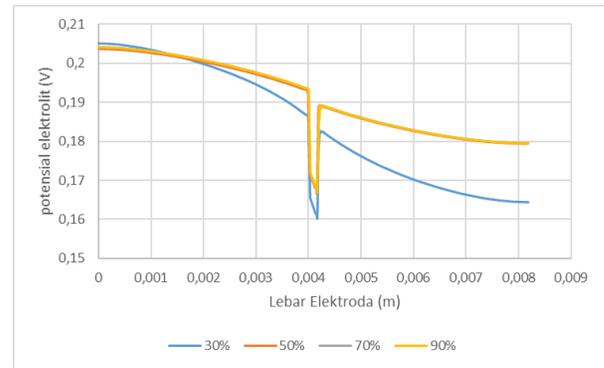
Gambar 2. grafik distribusi (a) potensial elektrolit pada 2d, (b) trend potensial elektrolit saat *charging*, (c) molaritas elektrolit saat *charging*, (d) molaritas elektrolit saat *discharging* terhadap geometri vrfb, dan (e) trend reaksi kimia pada elektroda saat *charging*

### 3.3. Hasil Karakteristik Baterai untuk Variasi Porositas Elektroda

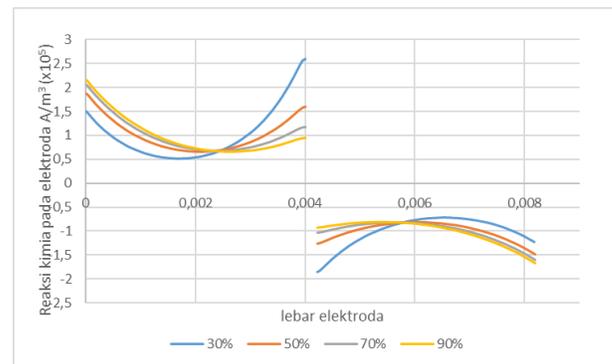
Berdasarkan hasil pengujian variasi porositas terhadap distribusi potensial elektrolit pada elektroda menurunkan densitas arus yang dihasilkan dan perubahan pada potensial elektrolit. Gambar 3(a) yang menunjukkan perubahan nilai potensial elektrolit untuk setiap kenaikan porositas elektroda. Pada gambar tersebut menunjukkan terjadi peningkatan potensial elektrolit pada elektroda saat porositas dinaikkan. Peningkatan terjadi secara keseluruhan dimensi elektroda (dari kiri ke kanan) mulai elektroda negatif, membran, dan elektroda positif seperti tampak pada Gambar 3(a).

Berdasarkan hasil pengujian perubahan porositas elektroda terhadap reaksi kimia pada elektroda pada Gambar 3(b) menunjukkan distribusi reaksi kimia pada elektroda yang menurun saat porositas elektroda dinaikkan. Kenaikan nilai reaksi kimia pada area dekat membran variasi porositas 30% membuat nilai reaksi kimia pada elektroda VRFB1 lebih tinggi dibandingkan yang lain. Untuk VRFB2, 70%, dan 90% memiliki distribusi nilai reaksi kimia yang relative sama.

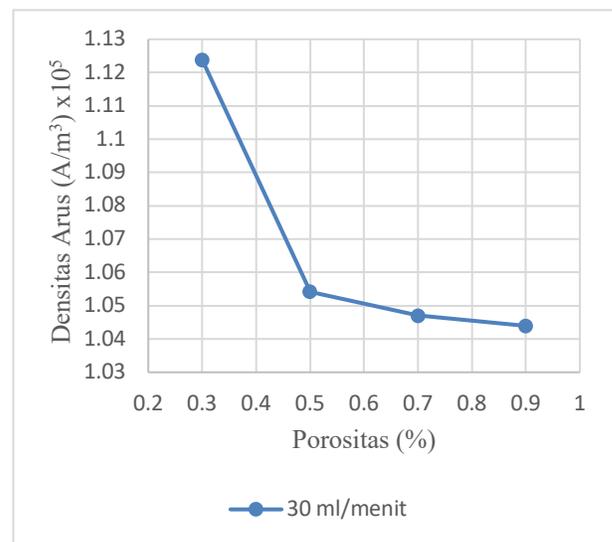
Berdasarkan hasil pengujian pada gambar 3(c) didapatkan grafik densitas arus sebagai efek terjadinya reaksi redoks terhadap porositas elektroda. Gambar 3(c) menunjukkan hasil pengujian pertama pada VRFB1 dengan kecepatan 30 ml/menit berhasil memperoleh nilai terbesar yakni  $1,1238 \times 10^5 \text{ A/m}^3$  diikuti oleh porositas 40% dengan nilai  $1,0541 \text{ A/m}^3$ , 50% dengan nilai 1,047 dan 90% ddengan nilai 1,0439. Nilai reaksi kimia yang tinggi pada elektroda 30% diakibatkan karena kecepatan reaksi yang lebih merata karena ruang didalam elektrodanya yang hanya 30% dari volume elektrodanya dibandingkan dengan porositas 50%, 70% dan 90%, sehingga reaksi kimianya dapat bernilai lebih besar dibandingkan dengan porositas elektroda lainnya.



(a)



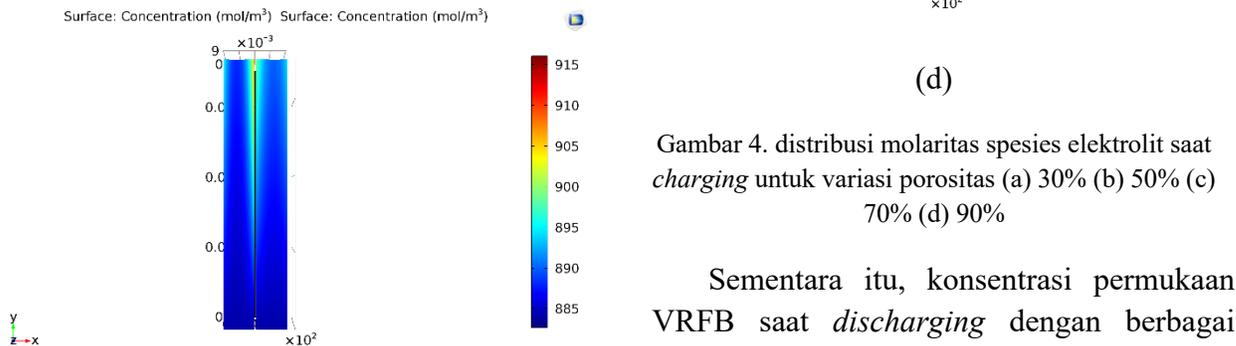
(b)



(c)

Gambar 3(a) distribusi potensial elektrolit pada elektroda dengan variasi porositas 3(b) distribusi reaksi kimia pada elektroda dengan variasi porositas 3(c) perbedaan nilai reaksi kimia pada elektroda pada variasi porositas elektroda saat *charging*

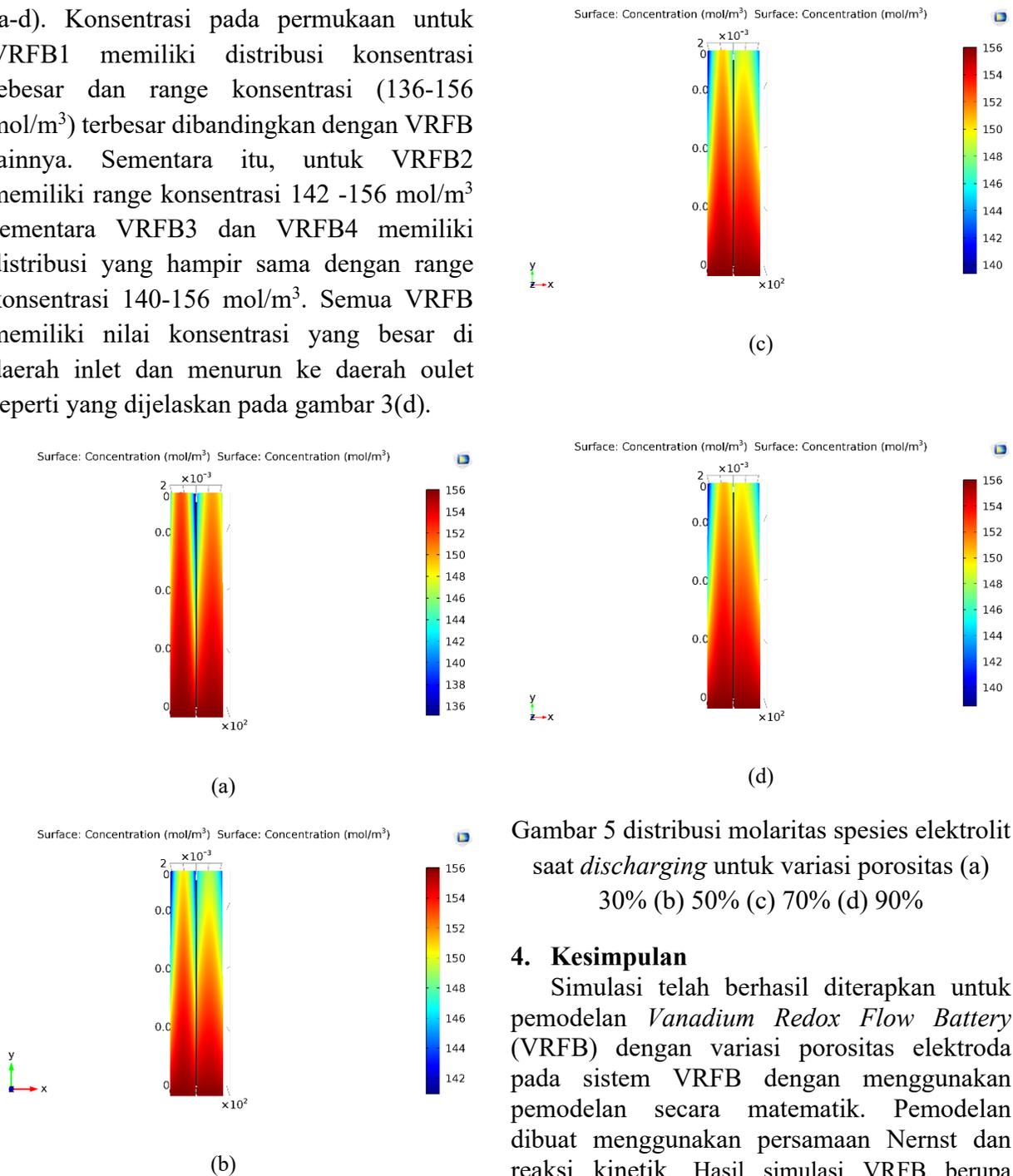
Karakteristik baterai lain yang dihasilkan pada variasi porositas adalah molaritas elektrolit saat *charging*. Berdasarkan hasil luaran simulasi didapatkan perubahan distribusi molaritas spesies elektrolit pada masing masing VRFB saat *charging* pada gambar 4(a-d). Secara visual terdapat perubahan warna yang signifikan. Molaritas elektroda pada VRFB1 menunjukkan warna biru yang mendominasi bagian elektrodanya, warna biru merupakan warna dengan nilai yang paling rendah dibandingkan dengan warna lain sehingga nilai molaritas pada VRFB1 memiliki distribusi molaritas terendah rendah dibandingkan dengan yang lainnya. Sedangkan pada VRFB2 warna biru masih tampak dominan namun pada bagian kolektor arus memiliki konsentrasi sangat tinggi mencapai  $935 \text{ mol/m}^3$  dan yang tertinggi dibandingkan lainnya. Pada variasi porositas 70 dan 90% memiliki visual yang hampir sama, dengan range dari  $884\text{-}900 \text{ mol/m}^3$  yang menunjukkan range terendah dibandingkan dengan variasi 30% dan 50%. Hal ini dimungkinkan porositas 70% dan 90% terlalu besar sehingga jumlah luasan elektroda yang bisa bereaksi semakin sedikit, misalnya untuk porositas 70%, maka hanya tersisa 30% luasan yang tersisa dan untuk porositas 90% hanya akan tersisa 10% saja yang bisa bereaksi.



Gambar 4. distribusi molaritas spesies elektrolit saat *charging* untuk variasi porositas (a) 30% (b) 50% (c) 70% (d) 90%

Sementara itu, konsentrasi permukaan VRFB saat *discharging* dengan berbagai variasi konsentrasi disajikan pada gambar 5

(a-d). Konsentrasi pada permukaan untuk VRFB1 memiliki distribusi konsentrasi terbesar dan range konsentrasi ( $136-156 \text{ mol/m}^3$ ) terbesar dibandingkan dengan VRFB lainnya. Sementara itu, untuk VRFB2 memiliki range konsentrasi  $142-156 \text{ mol/m}^3$  sementara VRFB3 dan VRFB4 memiliki distribusi yang hampir sama dengan range konsentrasi  $140-156 \text{ mol/m}^3$ . Semua VRFB memiliki nilai konsentrasi yang besar di daerah inlet dan menurun ke daerah outlet seperti yang dijelaskan pada gambar 3(d).



Gambar 5 distribusi molaritas spesies elektrolit saat *discharging* untuk variasi porositas (a) 30% (b) 50% (c) 70% (d) 90%

#### 4. Kesimpulan

Simulasi telah berhasil diterapkan untuk pemodelan *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) dengan variasi porositas elektroda pada sistem VRFB dengan menggunakan pemodelan secara matematik. Pemodelan dibuat menggunakan persamaan Nernst dan reaksi kinetik. Hasil simulasi VRFB berupa potensial elektrolit, reaksi kimia, dan molaritas spesies vanadium. Berdasarkan hasil simulasi menunjukkan bahwa VRFB1 memiliki densitas arus terbesar dibandingkan VRFB lainnya sementara dari analisa potensial kimia peningkatan porositas elektroda menaikkan potensial elektrolit pada sistem VRFB dengan VRFB1 merupakan yang terendah. Peningkatan porositas elektroda menurunkan reaksi kimia dimana VRFB1 memiliki nilai molaritas

tertinggi walaupun distribusi dominannya kecil dibandingkan lainnya, sementara itu VRFB2 sedikit lebih baik dari pada VRFB3 dan VRFB4.

## 5. Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menganalisa porositas kecil dibawah 30% untuk mengetahui nilai reaksi kimia pada elektroda yang memungkinkan akan memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan porositas elektroda besar.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] Suharyati, S. H. Pambudi, J. L. Wibowo, and N. I. Pratiwi, *Buku Outlook Energi Indonesia 2019*. Jakarta, 2019.
- [2] BPPT, *Energy Outlook 2020 - Special Edition Dampak Pandemi COVID-19 terhadap Sektor Energi di Indonesia*. 2020.
- [3] D. J. Suárez, Z. González, C. Blanco, M. Granda, R. Menéndez, and R. Santamaría, "Graphite felt modified with bismuth nanoparticles as negative electrode in a vanadium redox flow battery," *ChemSusChem*, vol. 7, no. 3, pp. 914–918, 2014, doi: 10.1002/cssc.201301045.
- [4] A. Sankar, I. Michos, I. Dutta, J. Dong, and A. P. Angelopoulos, "Enhanced vanadium redox flow battery performance using graphene nanoplatelets to decorate carbon electrodes," *J. Power Sources*, vol. 387, no. March, pp. 91–100, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.045.
- [5] X. L. Zhou, T. S. Zhao, L. An, Y. K. Zeng, and X. H. Yan, "A vanadium redox flow battery model incorporating the effect of ion concentrations on ion mobility," *Appl. Energy*, vol. 158, pp. 157–166, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.028.
- [6] Y. Jiang *et al.*, "Superior electrocatalytic performance of porous, graphitic, and oxygen-functionalized carbon nanofiber as bifunctional electrode for vanadium redox flow battery," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 525, no. March, p. 146453, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.146453.
- [7] Y. Jiang *et al.*, "Nanostructured N-doped carbon materials derived from expandable biomass with superior electrocatalytic performance towards V<sup>2+</sup>/V<sup>3+</sup> redox reaction for vanadium redox flow battery," *J. Energy Chem.*, vol. 59, pp. 706–714, 2021, doi: 10.1016/j.jechem.2020.12.013.
- [8] F. Jiang, Z. He, D. Guo, and X. Zhou, "Carbon aerogel modified graphite felt as advanced electrodes for vanadium redox flow batteries," *J. Power Sources*, vol. 440, no. June, p. 227114, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227114.
- [9] D. Reynard, C. R. Dennison, A. Battistel, and H. H. Girault, "Efficiency improvement of an all-vanadium redox flow battery by harvesting low-grade heat," *J. Power Sources*, vol. 390, no. March, pp. 30–37, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.074.
- [10] H. Zhang, X. LI, and J. Zhang, *Redox Flow Batteries: Fundamental and Application*, 1st ed., vol. 2, no. 6. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [11] M. C. Daugherty, S. Gu, D. S. Aaron, B. Chandra Mallick, Y. A. Gandomi, and C. Te Hsieh, "Decorating sulfur and nitrogen co-doped graphene quantum dots on graphite felt as high-performance electrodes for vanadium redox flow batteries," *J. Power Sources*, vol. 477, no. July, p. 228709, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228709.
- [12] K. J. Kim, M. S. Park, Y. J. Kim, J. H. Kim, S. X. Dou, and M. Skyllas-Kazacos, "A technology review of electrodes and reaction mechanisms in vanadium redox flow batteries," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 33, pp. 16913–16933, 2015, doi: 10.1039/c5ta02613j.
- [13] Z. Cheng *et al.*, "Data-driven electrode parameter identification for vanadium redox flow batteries through experimental and numerical methods," *Appl. Energy*, vol. 279, no. July, p. 115530, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115530.
- [14] A. A. Shah, M. J. Watt-Smith, and F. C. Walsh, "A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species," *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 27, pp. 8087–8100, 2008, doi: 10.1016/j.electacta.2008.05.067.
- [15] E. Ali, H. Kwon, J. Choi, J. Lee, J. Kim, and H. Park, "A numerical study of electrode thickness and porosity effects in all vanadium redox flow batteries," *J. Energy*

- Storage*, vol. 28, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101208.
- [16] D. Maggiolo, F. Zanini, F. Picano, A. Trovò, S. Carmignato, and M. Guarnieri, "Particle based method and X-ray computed tomography for pore-scale flow characterization in VRFB electrodes," *Energy Storage Materials*, vol. 16, pp. 91–96, 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2018.04.021.
- [17] E. Ali, H. Park, H. Kwon, J. Choi, J. Lee, and J. Kim, "A numerical study of electrode thickness and porosity effects in all vanadium redox flow batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, 101208, pp 1-11, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101208.
- [18] J. Kim, and H. Park, "Recent advances in porous electrodes for vanadium redox flow batteries in grid-scale energy storage systems: A mass transfer perspective," *Journal of Power Sources*, vol. 545, 231904 pp. 1-26, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231904.
- [19] K. W. Knehr, E. Agar, C. R. Dennison, A. R. Kalidindi, and E. C. Kumbur, "A Transient Vanadium Flow Battery Model Incorporating Vanadium Crossover and Water Transport through the Membrane," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159 no.9 pp. A1446-A1459, 2012.
- [20] D. You, H. Zhang, and J. Chen, "A simple model for the vanadium redox battery," vol. 54, pp. 6827–6836, 2009, doi: 10.1016/j.electacta.2009.06.086.