

# Simulasi Pengaruh Ketebalan Elektroda Terhadap Potensial Elektrolit dan Molaritas Spesies Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)

Satria Pamungkas Panji Kumara<sup>1</sup>, Irvan Fajar Hidayah<sup>1</sup>, Silvi Hadila<sup>1</sup>, Ervinka Felindia<sup>1</sup>, Nikita Syaharani<sup>1</sup>, Mauludi Ariesto Pamungkas<sup>1</sup>, Alamsyah Mohammad Juwono<sup>1</sup>, Kurriawan Budi Pranata<sup>2</sup>, Muhammad Priyono Tri Sulistyanto<sup>3</sup>, Sulthoni Akbar<sup>4</sup>, Fauzan Azhiman Irham<sup>5</sup>, Muhammad Ghufron<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas PGRI Kanjuruhan Malang, Malang, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Informatika, Universitas PGRI Kanjuruhan Malang, Malang, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Indonesia, Jakarta, Indonesia

<sup>5</sup>PT. Inovasi Teknologi Desa, Balai Inkubator Teknologi Kawasan Puspitek, Tangerang Selatan, Indonesia

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

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v19i1.11403>

Submitted: 23 Agustus 2021; Accepted: 22 Januari 2022

**ABSTRAK-** Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) adalah jenis baterai sekunder yang relatif baru yang memiliki kemampuan sebagai Energy Storage System (ESS) untuk pembangkit listrik energi terbarukan seperti solar cell. Sel tunggal VRFB 2D dimodelkan menggunakan software COMSOL Multiphysics dan disimulasikan secara numerik menggunakan Nernst-Planck, distribusi arus sekunder, distribusi arus tersier dan prinsip Buttler-Volmer. Simulasi dilakukan pada 293,15 K, dengan variasi ketebalan elektroda 1 mm (L1), 2 mm (L2), 3 mm (L3), 4 mm (L4) dan 5 mm (L5). Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa potensial elektrolit pada elektroda negatif lebih tinggi dari pada elektroda positif dan distribusinya cenderung menurun untuk semua variasi. Konsentrasi permukaan dekat kolektor dominan selama pengisian dibandingkan posisi inlet dan fenomena sebaliknya terjadi selama proses pengosongan. VRFB L1 menunjukkan kinerja yang lemah dan VRFB L2 menunjukkan kinerja terbaik dalam hal potensial elektrolit dan molaritas spesies di permukaan elektroda.

**KATA KUNCI:** Baterai aliran vanadium redoks; Distribusi arus tersier; Ketebalan elektroda; Potensi elektrolit.

**ABSTRACT-** Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) is a relative new type of secondary battery that has ability as Energy Storage System (ESS) for renewable energy power plants such as solar cell. 2D VRFB single cell was modeled using COMSOL Multiphysics software and simulated numerically by using Nernst-Planck, secondary current distribution, tertiary current distribution and Buttler-Volmer principle. Simulation was conducted at 293,15 K, with electrode thickness variations of 1 mm (L1), 2 mm (L2), 3 mm (L3), 4 mm (L4) and 5 mm (L5). According to the simulation results, it is known that electrolyte potential in negative electrode is higher than positive electrode and the distribution is tend to decrease for all variations. Surface concentration near collector is dominant during charging compare inlet position and the reverse phenomenon occur during discharging process. VRFB L1 show weak performance and VRFB L2 show the best performance in term of electrolyte potential and species molarity in the electrode surface.

**KEYWORDS :** Vanadium redox flow battery; Electrode thickness; Tertiary current distribution; Electrolyte potential.

## PENDAHULUAN

Saat ini, energi bertransformasi menjadi kebutuhan pokok manusia untuk menunjang kehidupan yang lebih efektif dan efisien. Akibatnya, total konsumsi energi mengalami peningkatan setiap tahun tanpa pernah mengalami penurunan dalam 3 tahun terakhir yaitu sebesar 843 juta SBM (setara barel minyak) pada tahun 2017 dan 973 juta SBM pada tahun 2020. Total konsumsi energi diprediksi akan mencapai 1544 juta SBM pada tahun 2030 (BPPT, 2019). Pemerintah Indonesia merespon kebutuhan energi pada tahun 2016 dengan mencanangkan program 35.000 MWatt melalui Perpres No. 4 Tahun 2016 dengan membangun pembangkit listrik tenaga terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Kabupaten Sidenreng Rappang, pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) di Jakarta Utara dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di kota Bontang. Pembangkit listrik menggunakan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) di Indonesia juga memiliki rencana pembangunan yang besar yaitu sekitar 23.115 MWatt (Tampubolon & Adiatama, 2019).

Salah satu permasalahan pada pembangkit listrik EBT seperti energi yang berasal dari angin, tenaga surya, dan energi berasal dari gelombang air laut adalah energi yang tidak dapat dipanen setiap saat selama 24 jam karena sangat bergantung pada keadaan alam. Beberapa masalah yang dimiliki oleh pembangkit listrik EBT antara lain hanya akan bisa dipanen pada waktu tertentu, sangat bergantung pada cuaca, dan harus bisa memenuhi puncak permintaan tegangan yang tinggi (Suárez *et al.*, 2014). Karena hal tersebut maka sistem penyimpanan energi atau yang lebih dikenal dengan Energy Storage System (ESS) memiliki peranan penting dalam menyimpan energi yang dihasilkan pada pembangkit listrik EBT sebagai penyimpan muatan listrik sementara sebelum digunakan kembali untuk berbagai kepentingan (AlShafi & Bicer, 2021).

Ada berbagai macam sistem penyimpanan energi yang telah diaplikasikan selama ini yakni baterai Lithium-ion, baterai

asam timbal, baterai aliran vanadium, dan baterai sodium sulphur (Abdalla *et al.*, 2021; Betzin *et al.*, 2018; Yuqing Yang *et al.*, 2018). *Redox flow battery* merupakan salah satu kandidat yang banyak dilirik oleh peneliti saat ini sebagai ESS karena keunggulannya dalam hal perawatan yang mudah, efisiensi tinggi, desain yang fleksibel, respon yang cepat, biaya investasi dan operasional yang murah, mampu memiliki kapasitas yang besar dan memiliki umur siklus yang panjang (Leung *et al.*, 2018; M. C. Wu *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019). Beberapa jenis *redox flow battery* adalah *Vanadium Redox Flow Battery*, *Polysulfide Battery*, *Uranium Redox Flow Battery* (Kiai & Kizil, 2019; H. Liu *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2016; Siczek, 2019; T. Yamamura *et al.*, 2004; Tomoo Yamamura *et al.*, 2002) dan *Lead Acid Redox Flow Battery* (Ghufron *et al.*, 2019; Pranata *et al.*, 2021).

*Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) merupakan baterai yang tersusun dari elektroda positif, elektroda negatif, membran, dan elektrolit. Elektroda positif dan negatif pada baterai ini berbahan grafit berpori yang berbentuk lembaran (Ghimire *et al.*, 2018; Rao & Jayanti, 2021). Kedua elektroda berpori dipisahkan oleh *Ion Exchange Membrane* (IEM) untuk pertukaran ion H<sup>+</sup> (Hwang *et al.*, 2018; X. Wu *et al.*, 2014). Kemudian elektrolit vanadium dialirkan ke dalam sel baterai melalui elektroda berpori dan akan ditampung di dalam tangki penyimpanan elektrolit (You *et al.*, 2009).

Reaksi redoks bolak-balik terjadi pada elektroda positif dan negatif saat proses *charging/discharging*. Proses reaksi yang terjadi pada elektroda adalah proses transfer elektron, proses perpindahan massa, proses nonfaradaic, dan proses migrasi. Elektroda berbentuk lembaran berpori agar elektrolit dapat berdifusi ke dalam elektroda dan melakukan reaksi redoks secara maksimal (Wang *et al.*, 2020). Elektrolit yang telah melewati sel baterai kemudian disimpan di dalam tangki elektrolit untuk kemudian dialirkan kembali ke sel baterai. Energi kimia tersimpan di dalam elektrolit dalam bentuk energi elektrokimia (Ali *et al.*, 2020).

Baterai aliran redoks vanadium (VRB) adalah salah satu penyimpan energi elektrokimia yang menjanjikan dan dianggap cocok untuk berbagai aplikasi energi terbarukan. Baterai aliran redoks Vanadium Generasi 1 (G1 VRB) telah berhasil diterapkan di lapangan. Namun saat itu baterai ini memiliki kepadatan energi yang rendah. Oleh karena itu pada tahun 1985-2005 dilakukan penelitian terkait dengan hal tersebut di Universitas New South Wales, Sydney (Parasuraman et al., 2013).

Perilaku dari elektrolit yang mengalir di dalam elektroda sangat berpengaruh dalam penentuan performa dari baterai. Desain dari wadah aliran elektrolit yang optimal tidak hanya bergantung pada desain arsitektur yang baik, tetapi juga meliputi interaksi yang lebih kompleks antara arsitektur, sifat elektroda, sifat elektrolit, dan kondisi operasi baterai untuk melakukan transport massa pada elektroda (Houser et al., 2016). Maka dari itu sangat penting untuk melakukan penelitian pada desain dari elektroda dan pengaruhnya terhadap performa baterai. Tegangan elektrolit dan distribusi arus pada elektroda merupakan hal penting dalam penentuan performa dari VRFB.

Pemodelan dan simulasi numerik adalah metode yang signifikan untuk mendapatkan sifat reaksi elektrokimia dari VRFB. Selain itu pemodelan dan simulasi juga dilakukan untuk mengawasi penelitian eksperimental yang memakan waktu, dan biaya yang banyak (W. W. Yang et al., 2015).

Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan dan difokuskan pada karakteristik baterai yang meliputi tegangan kerja yang dihasilkan (Lim et al., 2019), membran yang digunakan (Q. H. Liu et al., 2012; X. Wu et al., 2014), optimalisasi elektroda (Mehboob et al., 2018; Wei et al., 2016), dan adiktif pada elektrolit (Cao et al., 2018; Yadong Yang et al., 2019). Namun sangat sedikit ditemukan hasil penelitian yang menjelaskan secara baik tentang distribusi potensial kimia dan distribusi konsentrasi permukaan spesies ion vanadium pada kedua elektroda.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi model dua dimensi VRFB sel tunggal menggunakan COMSOL Multiphysics. Pada model tersebut dilakukan variasi ketebalan elektroda yang kemudian akan dilakukan analisis tentang pengaruh perubahan ketebalan elektroda tersebut. Hasil keluaran dari simulasi yang dianalisis meliputi potensial elektrolit, distribusi reaksi permukaan, dan distribusi spesies vanadium.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan membuat pemodelan geometri dan matematika lalu dilakukan analisis terhadap pengaruh variasi ketebalan elektroda. Pemodelan yang dilakukan meliputi pembuatan geometri dari bagian-bagian yang terdapat pada Gambar 1. Sistem fisis VRFB yang dibuat terdiri dari elektroda positif dan negatif berbahan *carbon felt*. Kedua elektroda dipisahkan oleh membran pertukaran ion  $H^+$ . Di dalam elektroda akan dialirkan elektrolit vanadium  $V^{2+}/V^{3+}$  pada elektroda negatif, dan  $VO^{2+}/VO_2^+$  pada elektroda positif. Elektrolit dialirkan dengan menggunakan pompa. Aliran dari elektrolit tersebut diasumsikan menggunakan aliran laminar yang mengalir dari inlet menuju outlet sel baterai.

Reaksi redoks yang terjadi di dalam sel baterai menimbulkan transport massa pada kedua sistem elektroda positif dan negatif dijelaskan dengan menggunakan *tertiary current distribution*. Sedangkan fenomena transport massa yang terjadi pada membran menggunakan *secondary current distribution* untuk memperoleh distribusi arus listrik pada sistem baterai. Selain itu kesetimbangan potensial pada reaksi didalam sistem baterai dinamis berbasis vanadium dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 1 Nernst-Planck (Ghufron et al., 2021; Syaharani & Ghufron, 2021):

$$J_j(x) = -D_j \frac{\partial C_j(x)}{\partial x} - \frac{z_j F}{RT} D_j C_j \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} + C_j v(x) \quad (1)$$

$\phi$  = Flux listrik

$F$  = Konstanta Faraday

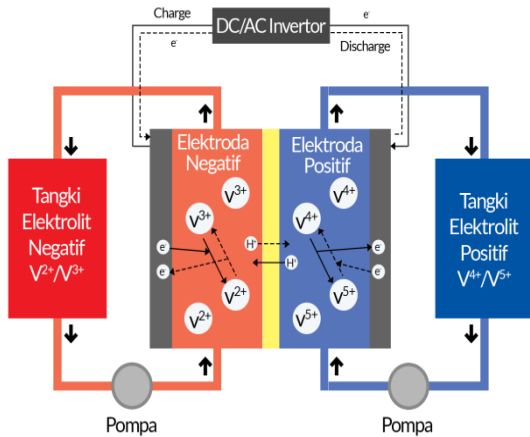
$R$  = Kontanta Boltzman

$T$  = Temperatur (K)

$C_j$  = Konsentrasi Suatu Spesies Larutan

$z_k$  = Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi elektroda

$v(x)$  = Kecepatan alir elektrolit pada elektroda



**Gambar 1.** Sistem VRFB yang digunakan pada simulasi terdiri dari dua pompa yang mengalirkan dua jenis elektrolit pada elektroda positif dan negatif.

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 Buttler-Vormer (dalam bentuk densitas arus listrik).

Pemodelan pada membran meliputi peristiwa perpindahan ion berupa migrasi. Peristiwa tersebut digambarkan oleh teori *secondary current distribution*. Hal ini melibatkan *gradient flux* yang ada pada membran. Perpindahan ion yang terjadi pada membran bersifat seragam dan konstan sehingga berlaku sifat elektroneutralitas. Berikut adalah persamaan 2 yang digunakan untuk pemodelan membran:

$$i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l \quad (2)$$

$i_l$  = arus pada membran

$\sigma_l$  = konduktivitas pada membran

$\phi_l$  = flux ion pada membran

*Current collector* berfungsi sebagai medium keluar-masuknya elektron dari dalam dan keluar sel baterai. Pada model ini, *current collector* tidak mengalami pemanasan ohmik, maupun terpengaruh oleh suhu lingkungan, sehingga suhu tetap konstan. Oleh karena itu, pada *current collector* hanya berlaku hukum Ohm yang mengatur tentang arus listrik. Berikut adalah persamaan 3 yang digunakan:

$$-\sigma_{coll} \nabla^2 \psi = 0 \quad (3)$$

$\sigma_{coll}$  = konduktivitas elektronik *current collector*

Saat sistem baterai dijalankan, pompa diasumsikan mengalirkan elektrolit ke dalam elektroda dengan aliran laminar. Beberapa parameter penting lain yang dimasukkan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Sementara parameter telah dimasukkan, ditentukan variasi ketebalan elektroda. Variasi ketebalan elektroda yang dimasukkan adalah 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm dan 5 mm yang selanjutnya secara berturut-turut dinamakan baterai L1, L2, L3, L4 dan L5.

**Tabel 1.** Parameter masukan pada simulasi VRFB

| Parameter         | Nilai dan Satuan         |
|-------------------|--------------------------|
| panjang elektroda | 0,0350[m]                |
| tinggi elektroda  | 0,0285[m]                |
| lebar elektroda   | 0,0040[m]                |
| lebar membran     | $203 \times 10^{-6}$ [m] |
| Suhu Operasi      | 293,15 [K]               |

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Keluaran Simulasi

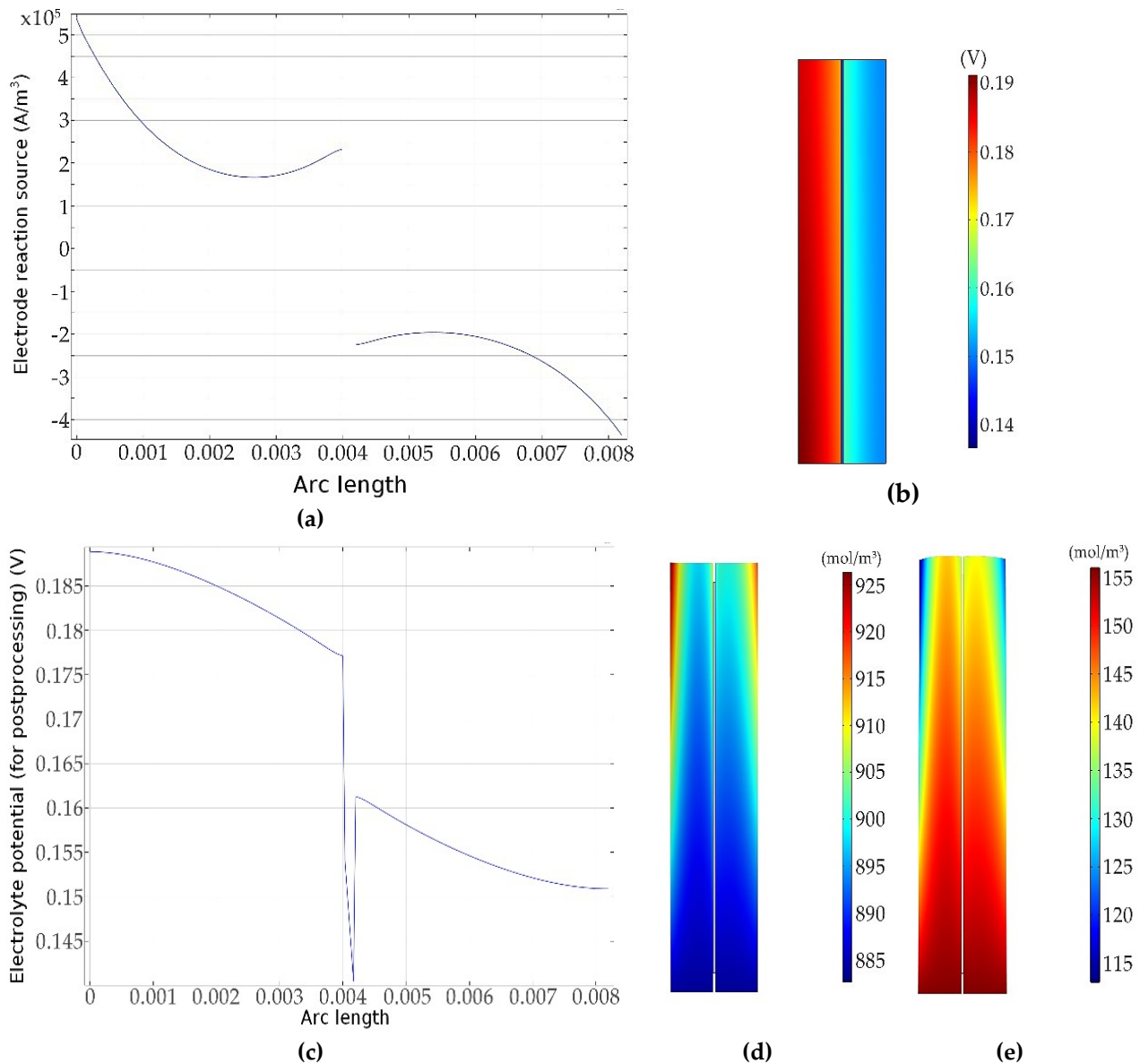
Simulasi telah dilakukan dengan menggunakan aplikasi Comsol Multiphysics 5.1. Hasil dari simulasi VRFB antara lain konsentrasi spesies vanadium di dalam sel baterai ketika *charge* dan *discharge*, arus reaksi pada elektroda, dan potensial elektrolit. Hasil tersebut memperlihatkan karakteristik dari VRFB yang telah disimulasikan dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan besarnya reaksi kimia pada elektroda. Gambar 2(a) menjelaskan tentang besarnya reaksi kimia pada elektroda yang memiliki perbedaan nilai distribusi arus dari elektroda

positif dan elektroda negatif. Besaran nilai negatif yang ada pada elektroda positif menandakan perbedaan arah arus yang ada pada elektroda tersebut. Pada grafik yang dihasilkan, nilai arus terbesar pada elektroda dengan ketebalan 4 mm ada di bagian dekat kolektor arus yaitu sebesar  $5,33 \times 10^5 \text{ A.m}^{-3}$ . Nilai arus semakin menurun pada bagian tengah elektroda dengan nilai terendah  $1,67 \times 10^5 \text{ A.m}^{-3}$  lalu naik kembali pada daerah menuju ke membran hingga mencapai nilai  $2,32 \times 10^5 \text{ A.m}^{-3}$ . Perubahan nilai reaksi kimia dipengaruhi oleh evolusi kerapatan arus pada

elektroda. Hal ini dijelaskan pada persamaan Butler-Volmer, kerapatan arus saat terjadi pertukaran muatan akan meningkat dan membuat nilai reaksi kimia pada elektroda memiliki nilai yang maksimal.

Gambar 2(b-c) menunjukkan nilai dari potensial sel yang dihasilkan dari simulasi. Dari keterangan warna yang diberikan, didapatkan bahwa potensial elektrolit pada elektroda negatif bernilai lebih besar daripada elektroda positif. Pada elektroda dengan ketebalan 4mm, nilai rata-rata potensial elektrolit pada elektroda negatif adalah sebe-



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

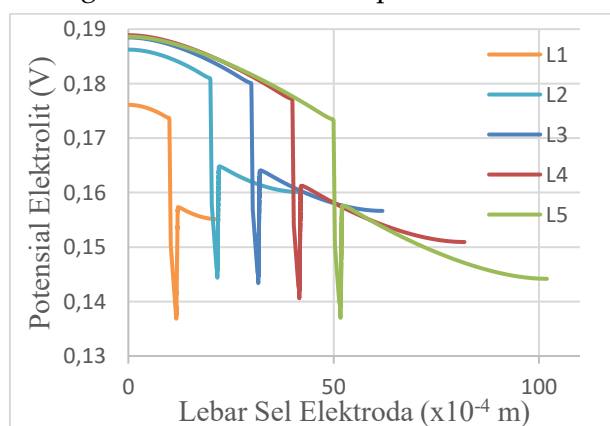
sar 0,184V sedangkan pada elektroda positif adalah sebesar 0,154V. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan jumlah ion yang bereaksi. Sesuai dengan hukum Ficks 1 yang merupakan bagian dari persamaan Nernst-Planck. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh jarak terhadap transfer massa yang terjadi. Difusi suatu zat mengalami penurunan tingkat difusi seiring dengan besarnya jarak. Maka dari itu pada penelitian ini semakin mengarah ke kanan dan melewati membran maka nilai transfer massa akan semakin kecil (Tang *et al.*, 2011). Terjadi penurunan potensial elektrolit secara drastis pada bagian membran baterai karena perembesan elektrolit pada membran diabaikan. Dengan kata lain, tidak ada elektrolit yang berada pada membran. Membran hanya sebagai tempat pertukaran ion positif.

Distribusi konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 2(d-e), dengan besarnya nilai konsentrasi ditunjukkan dengan skala warna. Distribusi spesies Vanadium di dalam sel baterai tidak homogen, melainkan membentuk pola tertentu. Seperti pada penelitian oleh Ali *et al.* pada tahun 2020, konsentrasi vanadium berbeda-beda pada setiap sisi baterai, begitu juga pada penelitian ini. Dilihat dari keterangan warna pada grafik, saat keadaan *charging*, distribusi konsentrasi spesies vanadium terbaca relatif lebih banyak pada daerah kolektor arus (*outlet*) karena pada bagian ini muatan listrik berkumpul. Peningkatan konsentrasi spesies vanadium

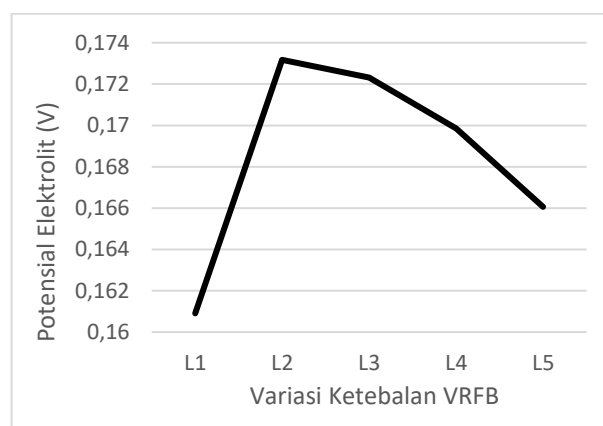
terjadi sepanjang sel baterai yang mengarah ke outlet. Tingginya nilai konsentrasi pada area kolektor arus tersebut terjadi karena pada saat *charge*, spesies vanadium banyak melakukan transfer ion pada daerah kolektor arus. Saat *charging*, elektron pertama kali dikirim lewat kolektor sehingga densitas elektron di kolektor akan menjadi yang tertinggi menyebabkan jumlah reaksi kimia pada daerah dekat kolektor adalah yang terbanyak. Kejadian sebaliknya terjadi saat *discharging* dilakukan

### Hasil Karakteristik Baterai untuk Variasi Ketebalan Elektroda

Simulasi VRFB dengan variasi ketebalan elektroda telah dilakukan terhadap perubahan potensial elektrolit disajikan pada gambar 3. Gambar 3(a) menunjukkan penurunan potensial elektrolit pada titik yang lebih jauh dari current collector elektroda negatif. Potensial elektrolit dengan rata-rata nilai tertinggi dimiliki oleh baterai L2 dan semakin menurun seiring bertambahnya variasi ketebalan elektroda. Hal ini terjadi karena elektrolit membutuhkan waktu yang lebih lama untuk melakukan pertukaran muatan pada ketebalan elektroda yang lebih besar. Namun baterai L1 memiliki nilai potensial elektrolit terkecil. Hal ini terjadi karena L1 memiliki ketebalan paling kecil yang mempengaruhi jumlah molekul yang bereaksi secara elektrokimia sehingga kemampuan elektrolit dan elektroda untuk melakukan per-



(a)

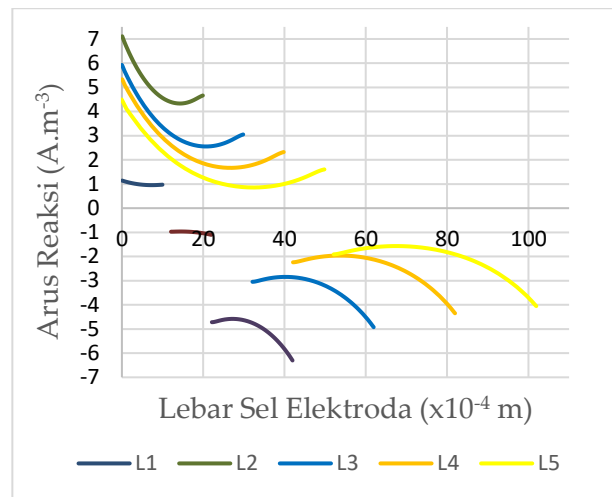


(b)

Gambar 3. (a) Distribusi dan (b) Rata-Rata Nilai Potensial Elektrolit saat Keadaan Charge dengan Variasi Ketebalan Elektroda

tukaran muatan menjadi berkurang yang menjadikan baterai L1 memiliki performa yang kurang baik. Gambar 3(b) menunjukkan potensial elektrolit rata-rata pada sel baterai. L1 sebagaimana yang dijelaskan sebelumnya memiliki nilai rata-rata terkecil yang kemudian meningkat secara signifikan pada ketebalan L2 yang diikuti dengan terjadinya penurunan nilai rata-rata potensial sel. Penurunan nilai potensial elektrolit terjadi karena jumlah elektrolit dibuat konstan pada simulasi sedangkan ketebalan dibuat meningkat. peningkatan ketebalan ini mampu meningkatkan potensial elektrolit pada ujung elektroda namun karena semakin tebal distribusinya semakin kecil.

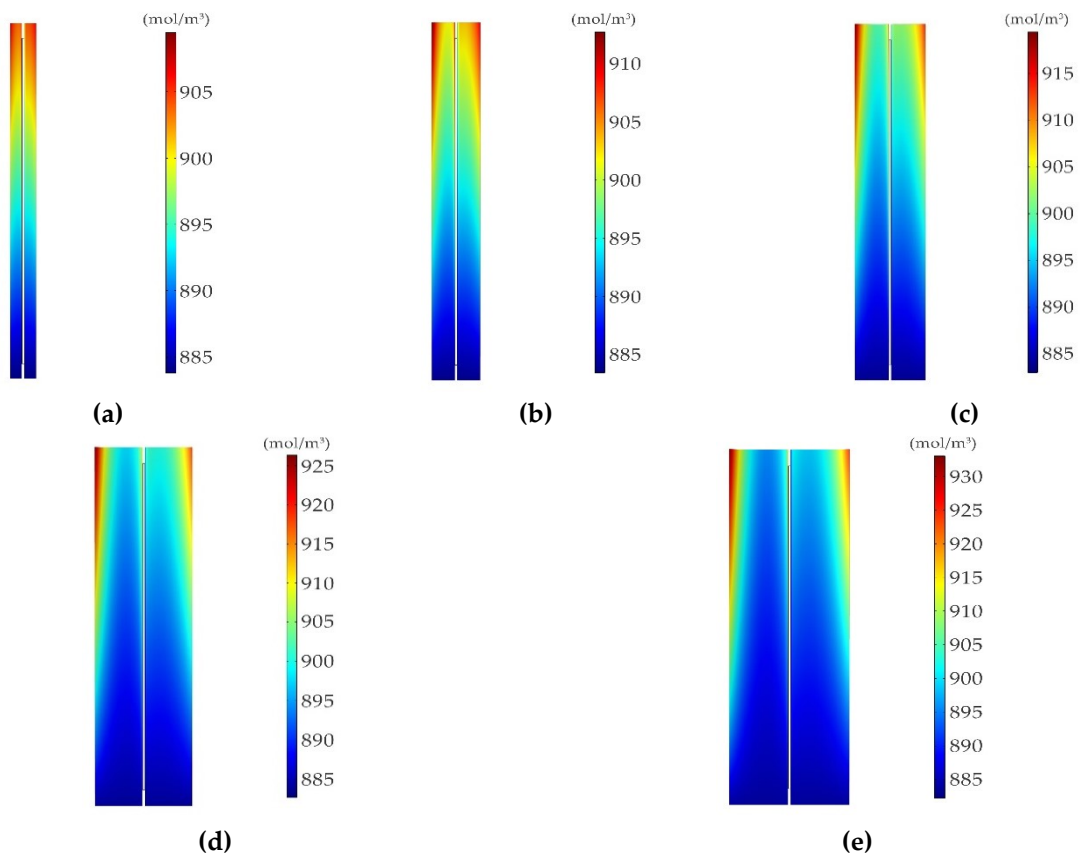
Adapun nilai distribusi densitas arus pada elektroda disajikan pada gambar 4. Dari hasil simulasi dapat dianalisis adanya perubahan pada distribusi arus reaksi kimia. Rata-rata arus reaksi yang terjadi semakin kecil seiring membesarnya ketebalan elektroda. Elektroda dengan ketebalan 2 mm memiliki nilai distribusi arus paling besar. Sedangkan elektroda dengan ketebalan 1 mm memiliki nilai distribusi arus yang paling kecil. Distribusi arus dari reaksi kimia pada elektroda 5 mm bernilai lebih kecil dibandingkan dengan yang ada pada baterai dengan ketebalan elektroda lebih dari 2 mm. Namun distribusi arus yang lebih kecil ini terjadi di sepanjang garis melintang elektroda 5 mm yang lebih besar, sehingga arus yang dihasilkan bernilai sama karena memiliki permukaan elektroda yang lebih besar. Distribusi arus pada VRFB L1 bernilai sangat kecil karena debit elektrolit pada simulasi bernilai sama untuk semua variasi ketebalan elektroda. Hal ini membuat elektrolit mengalir lebih cepat pada elektroda dengan ketebalan yang lebih kecil. Aliran elektrolit yang terlalu cepat membuat baterai dengan ketebalan 1 mm tidak efisien karena tidak banyak jumlah ion aktif yang bereaksi di dalam sel baterai. Hal ini membuat VRFB L1 memiliki performa yang kurang baik dibandingkan dengan variasi baterai lainnya.



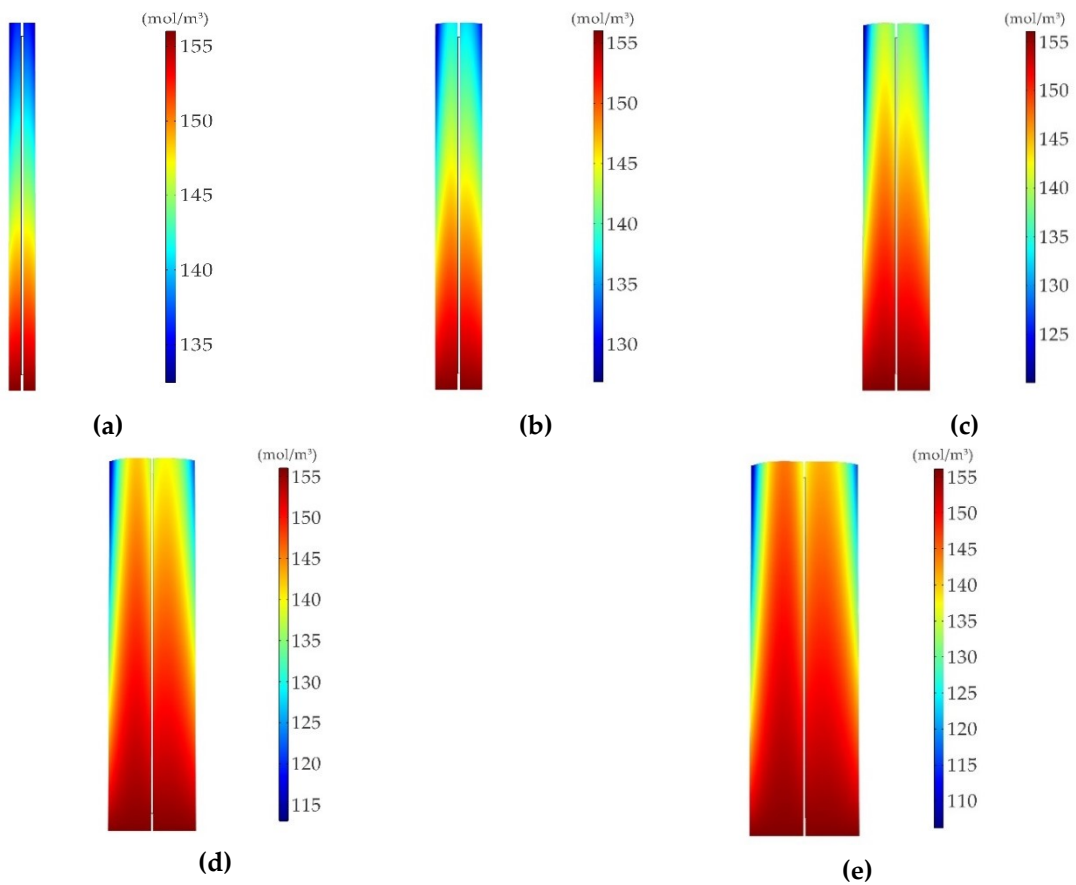
**Gambar 4. Nilai Distribusi Arus pada Elektroda dengan Variasi Ketebalan Elektroda.**

Hasil simulasi distribusi molaritas spesies elektrolit pada masing-masing VRFB saat *charging* dapat dilihat pada Gambar 5. Perbedaan geometri elektroda pada bagian ketebalan menyebabkan perbedaan jumlah spesies vanadium yang terbentuk pada daerah luar elektroda dekat *current collector*. Hal ini mengacu pada reaksi pada keadaan *charge* yang bermula di bagian tersebut. Semakin besar ketebalan elektroda, maka semakin banyak reaksi yang terjadi pada daerah tersebut. Hal ini ditandai dengan meningkatnya nilai skala warna merah untuk ketebalan elektroda yang lebih besar. Selain itu variasi ketebalan elektroda membuat baterai dengan elektroda yang lebih besar memiliki spesies vanadium yang lebih homogen di sepanjang sel baterai.

Hasil simulasi distribusi molaritas spesies elektrolit pada masing-masing VRFB saat *discharging* dapat dilihat pada Gambar 6. Perbedaan geometri elektroda pada bagian ketebalan menyebabkan perbedaan jumlah spesies vanadium yang terbentuk pada daerah outlet dekat pengumpul arus. Spesies vanadium yang bereaksi pada daerah tersebut semakin sedikit seiring bertambahnya ketebalan elektroda baterai. Hal ini mengacu pada reaksi pertama pada saat *discharge* terjadi pada daerah inlet. Selain itu peningkatan ketebalan elektroda menyebabkan konsentrasi spesies vanadium menjadi lebih homogen seiring bertambahnya ketebalan elektroda.



Gambar 5. Distribusi Molaritas Spesies Elektrolit saat *Charging* untuk VRFB (a)L1 (b) L2 (c) L3 (d) L4, dan (e) L5.



Gambar 6. Distribusi Molaritas Spesies Elektrolit saat *Discharging* untuk VRFB (a)L1 (b) L2 (c) L3 (d) L4 dan (e) L5



## KESIMPULAN

Pemodelan dan simulasi secara matematik dua dimensi dari *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) telah berhasil dijalankan dan divalidasi. Simulasi VRFB menghasilkan data berupa konsentrasi spesies vanadium, reaksi kimia, dan potensial elektrolit. Peningkatan ketebalan elektroda menyebabkan penurunan nilai potensial elektrolit. Penurunan nilai potensial elektrolit ini mengakibatkan kenaikan potensial keseluruhan dari baterai. Peningkatan ketebalan elektroda menyebabkan kenaikan distribusi konsentrasi ion vanadium di daerah kolektor arus pada saat *charge* dan penurunan distribusi konsentrasi vanadium pada saat *discharge*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, A. N., Nazir, M. S., Tao, H., Cao, S., Ji, R., Jiang, M., & Yao, L. (2021). Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. *Journal of Energy Storage*, 40(July 2020), 102811. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102811>
- Ali, E., Kwon, H., Choi, J., Lee, J., Kim, J., & Park, H. (2020). A numerical study of electrode thickness and porosity effects in all vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Storage*, 28(October 2019), 101208. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101208>
- AlShafi, M., & Bicer, Y. (2021). Life cycle assessment of compressed air, vanadium redox flow battery, and molten salt systems for renewable energy storage. *Energy Reports*, 7, 7090–7105. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.161>
- Betzin, C., Wolfschmidt, H., & Luther, M. (2018). Electrical operation behavior and energy efficiency of battery systems in a virtual storage power plant for primary control reserve. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 97(September 2017), 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.038>
- BPPT. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019: The Impact of Increased Utilization of New and Renewable Energy on the National Economy*.
- Cao, L., Skyllas-Kazacos, M., Menictas, C., & Noack, J. (2018). A review of electrolyte additives and impurities in vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 27(5), 1269–1291. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.04.007>
- Ghimire, P. C., Bhattarai, A., Schweiss, R., Scherer, G. G., Wai, N., & Yan, Q. (2018). A comprehensive study of electrode compression effects in all vanadium redox flow batteries including locally resolved measurements. *Applied Energy*, 230(March), 974–982. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.049>
- Ghufron, M., Pranata, K. B., Istiroyah, Masruroh, Perwita, C. A., Amirullah, A. A., Khairati, N., Setiawan, Y. E., & Ramadhan, F. R. (2019). Electrode size influence on static and dynamic single cell lead-acid battery. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(6), 2919–2925. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i6.11913>
- Hadila, S., Felindia, E., Syaharani, N., Pamungkas, S., Kumara, P., Fajar, I., Saroja, G., Pranata, K. B., & Ghufron, M. (2021). TERHADAP TEGANGAN DAN KONSENTRASI PERMUKAAN ELEKTRODA PADA LEAD ACID REDOX FLOW BATTERY 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 des. 14(April), 12–17.
- Houser, J., Clement, J., Pezeshki, A., & Mench, M. M. (2016). Influence of architecture and material properties on vanadium redox flow battery performance. *Journal of Power Sources*, 302, 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.095>

- Hwang, G. J., Kim, S. W., In, D. M., Lee, D. Y., & Ryu, C. H. (2018). Application of the commercial ion exchange membranes in the all-vanadium redox flow battery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 60, 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.11.023>
- Kiai, M. S., & Kizil, H. (2019). Enhanced performance of Li-S battery with polymer doped potassium functionalized graphene interlayers as effective polysulfide barrier. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 851, 113405. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.11.3405>
- Leung, P., Aili, D., Xu, Q., Rodchanarowan, A., & Shah, A. A. (2018). Rechargeable organic-air redox flow batteries. *Sustainable Energy and Fuels*, 2(10), 2252–2259. <https://doi.org/10.1039/c8se00205c>
- Lim, H., Yi, J. S., & Lee, D. (2019). Operando studies on through-plane cell voltage losses in vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 422(March), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.016>
- Liu, H., Lai, W. H., Yang, H. L., Zhu, Y. F., Lei, Y. J., Zhao, L., Peng, J., Wang, Y. X., Chou, S. L., & Liu, H. K. (2021). Efficient separators with fast Li-ion transfer and high polysulfide entrapment for superior lithium-sulfur batteries. *Chemical Engineering Journal*, 408(July 2020), 127348. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127348>
- Liu, Q. H., Grim, G. M., Papandrew, A. B., Turhan, A., Zawodzinski, T. A., & Mench, M. M. (2012). High Performance Vanadium Redox Flow Batteries with Optimized Electrode Configuration and Membrane Selection. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(8), A1246–A1252. <https://doi.org/10.1149/2.051208jes>
- Mehboob, S., Ali, G., Shin, H. J., Hwang, J., Abbas, S., Chung, K. Y., & Ha, H. Y. (2018). Enhancing the performance of all-vanadium redox flow batteries by decorating carbon felt electrodes with SnO<sub>2</sub> nanoparticles. *Applied Energy*, 229(July), 910–921. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.047>
- Parasuraman, A., Lim, T. M., Menictas, C., & Skyllas-Kazacos, M. (2013). Review of material research and development for vanadium redox flow battery applications. *Electrochimica Acta*, 101, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.067>
- Park, M., Ryu, J., Wang, W., & Cho, J. (2016). Material design and engineering of next-generation flow-battery technologies. *Nature Reviews Materials*, 2(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.80>
- Pranata, K. B., Ghufro, M., & Science, N. (2021). SOC ( STATE of CHARGE ) THREE-CELLS LEAD DYNAMIC. 13(2), 49–59.
- Rao, P., & Jayanti, S. (2021). Influence of electrode design parameters on the performance of vanadium redox flow battery cells at low temperatures. *Journal of Power Sources*, 482(October 2020), 228988. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228988>
- Siczek, K. J. (2019). Polysulfide Flow Batteries. *Next-Generation Batteries with Sulfur Cathodes*, 193–199. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816392-4.00015-3>
- Suárez, D. J., González, Z., Blanco, C., Granda, M., Menéndez, R., & Santamaría, R. (2014). Graphite felt modified with bismuth nanoparticles as negative electrode in a vanadium redox flow battery. *ChemSusChem*, 7(3), 914–918. <https://doi.org/10.1002/cssc.201301045>
- Syahrani, N., & Ghufro, M. (2021). Simulasi Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Laminar Elektrolit Terhadap Performa Soluble Lead-

- Acid Redox Flow Battery ( Slfb )*. 6(1), 35–40.
- Tampubolon, A. P., & Adiatama, J. C. (2019). *Laporan Status Energi Bersih Indonesia*. 1–28.
- Tang, A., Bao, J., & Skyllas-Kazacos, M. (2011). Dynamic modelling of the effects of ion diffusion and side reactions on the capacity loss for vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 196(24), 10737–10747. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.09.003>
- Wang, Q., Qu, Z. G., Jiang, Z. Y., Yin, Y., & Chen, L. (2020). The numerical study of vanadium redox flow battery performance with different electrode morphologies and electrolyte inflow patterns. *Journal of Energy Storage*, April. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101941>
- Wei, L., Zhao, T. S., Zeng, L., Zhou, X. L., & Zeng, Y. K. (2016). Copper nanoparticle-deposited graphite felt electrodes for all vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 180, 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.134>
- Wu, M. C., Zhao, T. S., Wei, L., Jiang, H. R., & Zhang, R. H. (2018). Improved electrolyte for zinc-bromine flow batteries. *Journal of Power Sources*, 384(March), 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.006>
- Wu, X., Hu, J., Liu, J., Zhou, Q., Zhou, W., & Li, H. (2014). Ion exchange membranes for vanadium redox flow batteries. *Pure and Applied Chemistry*, 86(5), 633–649. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-0101>
- Xu, Q., Qin, L. Y., Ji, Y. N., Leung, P. K., Su, H. N., Qiao, F., Yang, W. W., Shah, A. A., & Li, H. M. (2019). A deep eutectic solvent (DES) electrolyte-based vanadium-iron redox flow battery enabling higher specific capacity and improved thermal stability. *Electrochimica Acta*, 293, 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.10.063>
- Yamamura, T., Shirasaki, K., Shiokawa, Y., Nakamura, Y., & Kim, S. Y. (2004). Characterization of tetraketone ligands for active materials of all-uranium redox flow battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 374(1–2), 349–353. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.117>
- Yamamura, Tomoo, Shiokawa, Y., Yamana, H., & Moriyama, H. (2002). Electrochemical investigation of uranium  $\beta$ -diketonates for all-uranium redox flow battery. In *Electrochimica Acta* (Vol. 48, Issue 1, pp. 43–50). [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00546-7](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00546-7)
- Yang, W. W., He, Y. L., & Li, Y. S. (2015). Performance Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery during Discharging. *Electrochimica Acta*, 155, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.138>
- Yang, Yadong, Zhang, Y., Tang, L., Liu, T., Huang, J., Peng, S., & Yang, X. (2019). Investigations on physicochemical properties and electrochemical performance of sulfate-chloride mixed acid electrolyte for vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 434(April), 226719. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.22.6719>
- Yang, Yuqing, Menictas, C., Bremner, S., & Kay, M. (2018). A Comparison Study of Dispatching Various Battery Technologies in a Hybrid PV and Wind Power Plant. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2018-Augus*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585803>
- You, D., Zhang, H., & Chen, J. (2009). A simple model for the vanadium redox battery. *Electrochimica Acta*, 54(27), 6827–6836. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.086>