

ANALISIS PEMANFAATAN BATERAI VANADIUM REDOX FLOW PADA SISTEM KETENAGALISTRIKAN HIBRID DI PULAU UR

Ruly Bayu Sitanggang¹⁾, Indra Aditya²⁾, Meiri Triani³⁾, Rasgianti⁴⁾, Eko Supriyanto⁵⁾,
Nur Cahyo⁶⁾

^{1,2,3,4,5,6)} PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan

Email: rully.bs@pln.co.id ¹⁾

Nomor Telp: +62 852 2005 5339

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Baterai *Vanadium Redox Flow (VRFB)* adalah teknologi penyimpanan energi yang telah digunakan pada beberapa *demo-plant* sistem tenaga listrik skala kecil. Pada penelitian ini dilakukan analisis pemanfaatan VRFB untuk sistem ketenagalistrikan di Pulau Ur. Metode yang digunakan dalam kajian adalah review literatur, pemodelan tekno-ekonomi menggunakan *software* Homer Pro. Baterai VRFB merupakan teknologi penyimpanan tipe Redox Flow yang paling *mature* dan digunakan pada beberapa proyek demonstrasi di beberapa negara dan telah memasuki tahap komersialisasi untuk aplikasi penyimpan energi skala besar. Karakteristik yang cukup berbeda dari VRFB adalah dapat dipisahkannya daya dan energi dalam desain energi penyimpanan, memiliki siklus hidup yang tinggi dan dapat mencapai DoD yang tinggi. Meskipun memiliki energi densitas yang rendah dibandingkan dengan teknologi Li-ion, faktor *safety* VRFB lebih baik karena tidak memiliki risiko kebakaran jika terjadi *short-circuit*. Temperatur merupakan aspek yang perlu diperhatikan pada baterai ini karena pengoperasian diluar range temperatur akan menyebabkan presipitasi pada elektrolit yang dapat menyebabkan kerusakan membran dan penurunan kapasitas. Selain itu *overcharging* dapat menyebabkan reaksi samping pembentukan gas Hidrogen. Oksidasi elektroda merupakan faktor lain yang perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan delaminasi karbon pada elektroda. Hasil simulasi tekno-ekonomi pada sistem kecil menunjukkan nilai biaya energi (COE) dari konfigurasi sistem hibrid dengan menggunakan VRFB adalah \$0.288/kWh. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa COE sistem akan bergantung secara signifikan pada harga *capital* elektrolit dimana diprediksi jika harga elektrolit lebih rendah 40% akan sebanding dengan COE sistem menggunakan baterai *lead acid*.

Kata kunci: baterai vanadium, sistem hibrid, penyimpanan energi

ABSTRACT

The *Vanadium Redox Flow (VRFB)* battery is an energy storage technology that has been used in several small-scale electric power system *demo plants*. In this study, an analysis for the application of VRFB in Ur Island electrical system was carried out. The method used in the study is a literature review, and techno-economic modeling using Homer Pro software. VRFB battery is the most mature storage technology of redox flow type, and used in several demonstration projects in several countries and has entered the commercialization stage for large-scale energy storage applications. VRFB can separate power and energy in the energy storage design, have a high cycle life, and could achieve high DoD. Although it has a low energy density compared to Li-ion technology, the safety factor of VRFB is better because it does not have a fire risk in the event of a short-circuit. Temperature is an aspect that needs to be considered in this battery because operating outside the temperature range will cause precipitation of the electrolyte which can cause membrane damage and decreased capacity. In addition, overcharging can cause side reactions to form hydrogen gas. Oxidation of the electrode is another factor that needs to be considered because it can cause delamination of carbon on the electrode. The results of the techno-economic simulation on Ur Island show that the cost of energy (COE) of the hybrid system configuration using VRFB is \$0.288/kWh. The sensitivity analysis results show that the COE of the system will depend significantly on the price of the electrolyte capital which is predicted if the electrolyte price is lower than 40% it will be comparable to the COE of the system using lead-acid batteries.

Keywords: vanadium battery, hybrid system, energy storage.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya perhatian masyarakat dunia akan pengaruh penggunaan energi fosil terhadap kondisi pemanasan global dan meningkatnya tren pemanfaatan energi terbarukan dalam berbagai negara di dunia, terutama pada sumber energi terbarukan yang *intermittent* atau variabel, permintaan terhadap penggunaan penyimpanan energi telah meningkat tinggi di dunia (IRENA, 2017). Teknologi penyimpanan energi diprediksi akan memegang peranan penting dalam fase energi transisi dari penggunaan energi fosil menuju energi terbarukan dan juga akan mendukung dekarbonisasi pada sektor energi. Pada sistem ketenagalistrikan dengan persentase bauran energi terbarukan yang tinggi, akan memerlukan fleksibilitas operasi yang tinggi dan perlu didukung dengan sistem yang dapat menyimpan energi yang dihasilkan dalam orde jam, hari bahkan bulan untuk dapat mendukung proses dekarbonisasi pada sektor energi. Teknologi penyimpanan energi telah lama dikenal memiliki potensi yang tinggi untuk diaplikasikan pada skala utilitas. Penyimpanan energi dapat menjalankan peran penting dengan berbagai fungsi yang berbeda seperti untuk sumber energi cadangan, penyeragaman atau pembentuk beban dan penstabil jaringan (Chen dkk., 2009).

Penggunaan teknologi penyimpanan energi untuk *load leveling* dan *peak shaving* dapat meningkatkan utilisasi aset pada sistem pembangkitan, transmisi dan distribusi serta menunda investasi penambahan kapasitas pada pembangkitan di sistem ketenagalistrikan. Teknologi penyimpanan energi juga dapat digunakan pada kondisi jaringan yang dinamis seperti pengaturan frekuensi dan cadangan daya. Pengembangan untuk aplikasi di bidang ketenagalistrikan telah meningkat seiring dengan meningkatnya biaya untuk solusi alternatif. Perizinan dan pembangunan aset pembangkit dan transmisi saat ini membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibandingkan beberapa dekade yang lalu akibat meningkatnya kesadaran terhadap lingkungan. Penelitian berkelanjutan diperlukan untuk mengevaluasi keuntungan bagi masyarakat dan juga peluang bisnis bagi penyedia ketenagalistrikan untuk pemanfaatan desentralisasi sistem penyimpanan energi serta kombinasinya dengan kegiatan efisiensi energi, manajemen beban, pembangkitan tersebar dan energi terbarukan. Pengembangan pada teknologi baterai dapat memberikan peluang penerapan teknologi penyimpanan energi *heavy duty deep cycle* untuk penyeragaman beban dan penurunan beban puncak sehingga menguntungkan penyedia dan konsumen tenaga listrik. Penggunaan teknologi penyimpanan energi yang efektif dapat memberikan penurunan biaya penyediaan tenaga listrik, meningkatkan faktor daya dan meningkatkan keandalan dari aset distribusi (Akhil dkk., 2013).

Pemilihan teknologi penyimpanan energi yang ideal bergantung kepada beberapa faktor, seperti jumlah energi atau daya penyimpanan yang dibutuhkan, waktu yang dibutuhkan untuk penyimpanan atau pemakaian energi (jangka pendek atau jangka panjang), dimensi, isu lingkungan, efisiensi energi, biaya dan lain – lain. Klasifikasi teknologi penyimpanan energi berdasarkan waktu penyimpanan dan pelepasan energi, kapasitas dan sektor penggunaannya (Argyrou dkk., 2018). Beberapa teknologi energi penyimpanan dapat digunakan pada sistem transmisi dan distribusi dengan waktu instalasi lebih cepat dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangunan sistem infrastruktur seperti pembangkit, saluran transmisi dan distribusi. Salah satu teknologi penyimpanan energi yang memiliki peluang tersebut adalah teknologi baterai *redox flow* yang mengkonversi energi listrik menjadi energi potensial kimia dengan memberikan muatan pada dua jenis larutan elektrolit. Kapasitasnya dapat diatur dari penggunaan jumlah elektrolit yang digunakan sehingga relatif lebih mudah jika diaplikasikan untuk skala besar. Baterai *redox flow* menawarkan beberapa keuntungan seperti laju *self-discharge* yang rendah, tidak terdegradasi saat digunakan untuk aplikasi *deep discharge*, umur yang lebih lama dan biaya pemeliharaan yang kecil. Namun beberapa kelemahan yang dimiliki teknologi tersebut adalah biaya investasi yang tinggi dan masih memiliki beberapa kendala pengembangan teknis (Fan dkk., 2020).

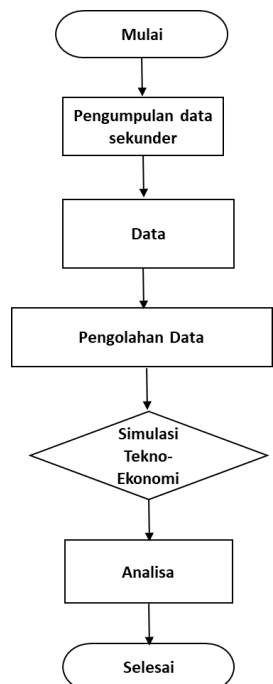
Beberapa tipe baterai *redox flow* yang dikembangkan beberapa tahun terakhir adalah *vanadium redox flow batteries* (VRFB), *polysulfide bromide batteries* (PSB), *iron chromium battery* (FeCr) dan *zinc-bromine batteries* (ZBR) (Chalamala dkk., 2014). *Vanadium Redox Flow Battery* merupakan tipe *flow battery* yang paling matang dan diklaim memiliki kemampuan yang sangat baik untuk menyediakan energi dengan skala besar untuk aplikasi sistem kelistrikan yang terisolasi, terdistribusi dan untuk optimasi kualitas daya (Skiyas-Kazacos & McCann, 2015).

Teknologi VRFB merupakan salah satu pilihan untuk aplikasi pada sistem yang besar dan telah mulai memasuki tahap komersial. Studi ini bertujuan untuk melakukan analisis dan evaluasi pada teknologi VRFB dari segi teknis dan keekonomian pada sistem ketenagalistrikan. Pada kajian ini dilakukan simulasi tekno-ekonomi pada sistem kecil dengan kondisi *off-grid* menggunakan *software* Homer Pro di Pulau Ur, Maluku Barat Daya, Indonesia.

2. METODE

Tahapan studi yang dilakukan terdiri dari beberapa tahapan utama yaitu pengumpulan data dan pengolahan data. Pengumpulan data meliputi data

sekunder yang diperoleh dari kajian literatur berupa publikasi laporan, tesis, jurnal dan buku. Data-data yang terkumpul meliputi prinsip kerja *Redox Flow Battery* (RFB) dan teknologi RFB tersebut dan pendalaman lebih lanjut dilakukan untuk teknologi tipe VFRB. Data-data yang terkumpul diolah untuk mendapatkan hasil akhir berupa perkembangan teknologi RFB terutama tipe VFRB. Adapun metode penelitian yang dilakukan pada studi ini dapat dilihat pada Gambar 1.



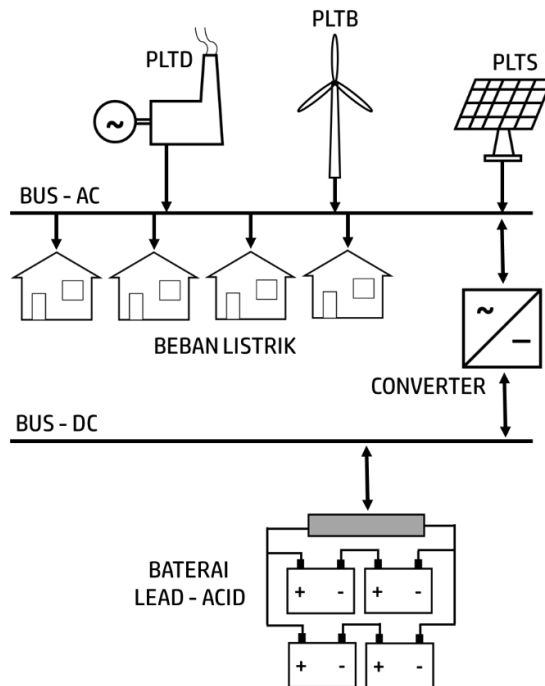
Gambar 1. Metode penelitian

Pulau Ur merupakan salah satu pulau terluar di Kepulauan Kei, Maluku yang berbatasan dengan Pulau Utir di selatan dan Pulau Manir di timur seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Butuh waktu sekitar dua jam dengan kapal kecil dari Pulau Kei Kecil ke Pulau Ur. Pulau ini belum memiliki akses listrik dan PLN berencana untuk menyediakan listrik dari generator diesel dengan kapasitas 25 kW.



Gambar 2. Lokasi studi simulasi

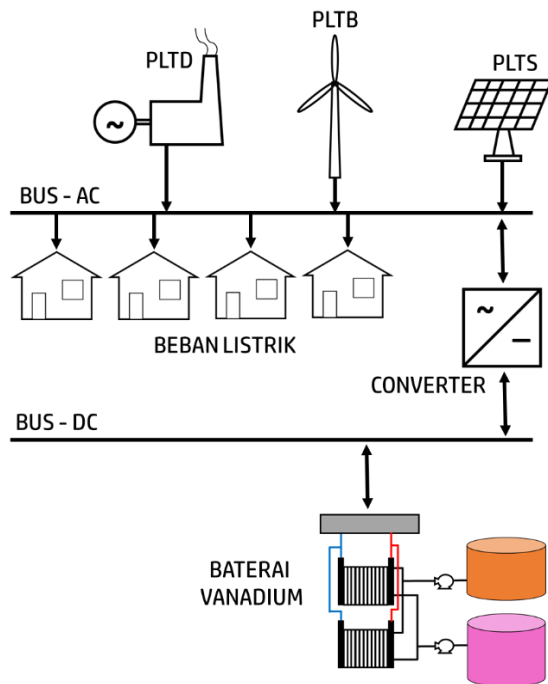
Untuk mengetahui perbandingan biaya penyediaan tenaga listrik jika menggunakan teknologi energi penyimpanan VRFB maka dilakukan simulasi tekno-ekonomi untuk penyediaan tenaga listrik di suatu daerah *off-grid*. Contoh kasus yang digunakan adalah model yang digunakan pada studi optimasi PLT Hibrid di Pulau Ur, Maluku Barat Daya, Indonesia (Aditya dkk., 2021) menggunakan *software* HOMER Pro. Skema simulasi sistem kelistrikan hibrid yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema model sistem hibrid pada pulau Ur yang menggunakan lead acid (Aditya dkk., 2021).

Pada bus AC terhubung komponen PLTD, PLTB, PLTS dan Converter. Output PLTS dikonversi menjadi listrik AC oleh inverter. Baterai bank terhubung pada bus DC dan dikoneksikan dengan converter yang juga berperan sebagai pengendali proses *charge - discharge battery bank*. Pada siang hari saat kondisi beban rendah, energi yang dihasilkan oleh sub sistem PLTS melebihi kebutuhan beban maka kelebihan energi disimpan pada baterai untuk digunakan pada beban puncak atau malam hari. Kemudian pada malam hari saat kebutuhan energi tidak bisa terpenuhi oleh baterai dan energi dari PLTB maka PLTD akan bekerja untuk memenuhi kekurangan energi tersebut. HOMER dapat memodelkan dua strategi *dispatch* yaitu *load following* (LF) dan *cycle charging* (CC). Pada studi ini, kedua model tersebut digunakan untuk mendapatkan hasil optimal. Pada strategi LF, PLTD hanya akan memproduksi daya untuk memenuhi kebutuhan beban saja. LF cenderung menjadi strategi optimal karena seringkali produksi energi terbarukan yang melebihi kebutuhan beban. Sedangkan pada CC, jika PLTD dibutuhkan maka generator akan beroperasi dengan kapasitas penuh dan daya berlebih

akan disalurkan untuk *charging bank* baterai. Strategi ini cenderung optimal digunakan pada sistem dengan kapasitas kecil atau tanpa energi terbarukan. Pada simulasi ini, beban pulau Ur diasumsikan konstan tanpa ada pertumbuhan beban dengan beban rata-rata harian 234 kWh per hari dan beban puncak 25,6 kW. Adapun asumsi umur pakai dari sistem pada simulasi sistem hibrid yang digunakan adalah 25 tahun dan *interest rate* 6% per tahun. Diagram dari simulasi sistem hibrid Pulau Ur yang dimodifikasi dengan mengubah penggunaan teknologi energi penyimpanan menggunakan VRFB ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema model sistem hibrid pada pulau Ur yang menggunakan VRFB

Tabel 1. Input spesifikasi komponen yang digunakan

Komponen	Keterangan	Kapasitas	satuan
PLTD	Generic 25kW Fixed Capacity Genset	25	kW
PLTS	CS6X-325P	325	Wp
Inverter	CS6X-325P	120	kW
PLTB	AWS HC Wind Turbine	1,5	kW
Converter	System Converter	18,36,54	kW
Storage sistem 1	Baterai Lead - Acid	1	kWh
Storage sistem 2	Vanadium Redox Flow Battery	10,20 / 40,80,100,200	kW / kWh
Strategi Dispatch	HOMER Load Following dan Cycle Charging		

Pada simulasi tekno-ekonomi yang dilakukan konfigurasi penggunaan energi penyimpanan diubah menggunakan teknologi VRFB dengan data biaya yang digunakan dari publikasi dari (Mongird dkk, 2020a) dan (Noack dkk, 2016) serta *Round Trip Efficiency* (RTE) 68 % dan *Depth of Discharge* (DoD) 80%. Pada kategori *storage* dengan tipe VRFB komponen biaya antara *stack* dan elektrolit merupakan biaya yang terpisah sehingga optimasi *software* akan dilakukan pada daya dan kapasitas energi yang dibutuhkan oleh sistem tersebut. Ringkasan dari spesifikasi komponen yang di-input dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 1 sedangkan biaya tiap komponen ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Input biaya komponen yang digunakan

Komponen	Biaya komponen		
	Capital	Replacement	O & M
PLTD	\$4.500	\$4.500	\$0,6/h
PLTB	\$3.600/unit	\$3.600/unit	\$100/y
PLTS	\$550/kW	\$550/kW	\$11/y
Converter	\$1.000/kW	\$1.000/kW	\$10/y
Lead - Acid	\$150/unit	\$150/unit	\$15/y
VRFB	\$1658/kW	\$1658/kW	\$6,79/y
Stack			
VRFB	\$234/kWh	\$234/kWh	\$0.0005
Electrolyte			/kWh

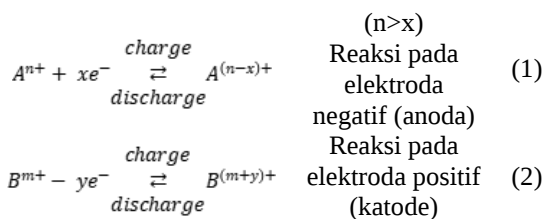
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Redox Flow Battery

Redox Flow battery (RFB) merupakan sistem baterai sekunder yang termasuk dalam penyimpanan energi elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik dengan proses reduksi dan oksidasi material aktif yang terlarut pada elektrolit. RFB, seperti baterai elektrokimia lainnya, terdiri dari dua bagian setengah sel, dan setiap setengah sel memiliki pasangan redoks-nya sendiri, yang dapat berubah di antara dua keadaan oksidasi dengan menjalani reaksi redoks reversibel. *Open circuit voltage* (OCV) sel ditentukan oleh perbedaan potensial elektrokimia dari dua pasangan redoks. Oleh karena itu, pasangan redoks ini memiliki pengaruh besar pada kinerja RFB, karena tidak hanya menentukan sifat termodinamika utama baterai yaitu, OCV, tetapi juga kinetika reaksi elektrokimia dan jumlah elektron per reaksi redoks, stabilitas kimia elektrolit, serta paparan kimia yang pada komponen baterai lainnya. Komponen sistem RFB terdiri dari kumpulan unit *cell* dengan elektroda bipolar yang tersusun yang disebut *stack*. Beda potensial dari baterai merupakan penjumlahan dari beda potensial dari jumlah unit *cell* yang digunakan. Kemudian dalam membentuk sistem RFB *stack* disusun membentuk *array* dan dihubungkan dengan pompa yang akan mensirkulasikan larutan elektrolit dari tangki menuju *array stack* tersebut. Elektroda pada baterai kemudian dihubungkan dengan *power conditioner* untuk pengaturan daya dan energi menuju jaringan tenaga listrik.

Pasangan redoks yang ideal adalah pasangan yang memiliki kinetika redoks yang reversibel, mampu menyimpan banyak elektron per molekul, relatif tidak berbahaya secara kimiawi, dan memiliki volatilitas yang rendah. Dengan demikian, sepasang pasangan redoks yang ideal harus memiliki tegangan operasi yang besar per sel untuk meminimalkan jumlah sel yang diperlukan, efisiensi *round-trip* yang tinggi, stabilitas kimia yang sangat baik untuk umur panjang, kelarutan tinggi dan muatan elektron yang tinggi setiap perubahan keadaan oksidasi untuk densitas energi tinggi.

Konstruksi *cell* pada RFB memiliki plat positif dan negatif pengumpul arus pada sisi tepi dan plat bipolar pada bagian *cell* tengah. Reaksi redoks selalu melibatkan transfer elektron, yang mengalir melalui rangkaian eksternal RFB. Untuk menyeimbangkan elektron, dan melengkapi rangkaian, muatan juga dilewatkan melalui membran di dalam sel RFB dalam bentuk ion. Ion pembawa muatan ini biasanya proton pada tipe elektrolit asam (H^+) dan ion OH^- atau ion natrium pada tipe elektrolit basa. Elektrolit positif dialirkan pada satu sisi plat bipolar sedangkan elektrolit negatif dialirkan pada sisi lainnya. Separator ion atau membran berfungsi untuk transfer ion pada elektrolit dan mencegah pencampuran ion positif dan negatif pada larutan elektrolit. Pompa berfungsi untuk mensirkulasikan larutan elektrolit antara tangki eksternal dan tumpukan *cell* (*stack*). Saat proses *discharge* ketika beban dihubungkan pada elektroda RFB reaksi redoks akan terjadi secara spontan sehingga melepaskan energi listrik dengan arah arus kebalikan dari proses *charging* dengan reaksi yang terjadi pada saat proses *charge* dan *discharge* adalah (Tangirala, 2011):

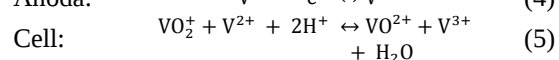
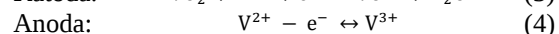
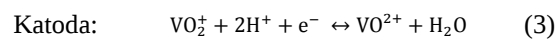


Konsep RFB telah dikenal sejak abad ke-19, namun perkembangan RFB modern ditampilkan pertama kali oleh NASA pada tahun 1970 yang menggunakan kopel larutan redoks Fe^{3+}/Fe^{2+} pada sisi positif dan Cr^{3+}/Cr^{2+} dan berhasil pada skala kilowatt, namun pada pengembangan lebih lanjut terjadi keterbatasan akibat buruknya reversibilitas elektrokimia Cr, pencampuran pada material aktif, penurunan kapasitas baterai akibat terbentuknya hidrogen dan kebutuhan akan elektro-katalis untuk meningkatkan performa baterai.

3.2. Vanadium Redox Flow Battery

Salah satu solusi untuk menangani permasalahan kontaminasi elektrolit adalah dengan

menggunakan material yang sama namun dengan tingkat oksidasi yang berbeda pada kedua sisi dan diimplementasikan oleh Universitas New South Wales (UNSW), Australia pada tahun 1980 dengan menggunakan material vanadium dengan empat kondisi oksidasi yaitu V(V) dan V(IV) pada sisi positif serta V(III) dan V(II) pada sisi negatif dan muncullah teknologi *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) (Weber dkk., 2011). Potensi elektrokimia dari pasangan redoks merupakan faktor utama dalam penentuan material aktif RFB. Pada teknologi RFB yang menggunakan larutan *aqueous*, masing-masing potensial pasangan redoks yang dipilih umumnya berada pada sisi yang saling berlawanan pada rentang stabilitas elektrokimia dari pelarut yang diinginkan. Ini memastikan bahwa tegangan operasi yang diperoleh dapat sebesar mungkin. VRFB merupakan teknologi RFB yang paling berkembang karena memanfaatkan empat tingkat oksidasi yang berbeda dari ion vanadium untuk membentuk dua pasangan redoks yang dipisahkan sebagai anolit dan katolit dengan hanya satu elemen aktif di kedua sisi. Dengan demikian, transport silang dari komponen aktif yaitu vanadium dalam VRB dapat dikendalikan. Sistem VRB adalah sistem yang menggunakan pasangan redoks dari logam yang sama, sehingga mengandung pasangan redoks V^{2+}/V^{3+} pada sel negatif dan pasangan redoks V^{4+}/V^{5+} pada sel positif. Dengan memanfaatkan empat tingkat oksidasi vanadium yang berbeda ini, kontaminasi silang antara sel dapat dicegah. Migrasi proton melalui membran membawa muatan antara dua sel dan menyeimbangkan perubahan oksidasi vanadium dan elektron yang mengalir melalui sirkuit eksternal sistem RFB. Dalam VRFB, konversi energi diwujudkan melalui perubahan keadaan valensi vanadium melalui reaksi elektroda berikut (Chen dkk., 2017):



Reaksi elektrokimia keseluruhan memberikan tegangan sel 1,26 V pada 25 °C. VRFB generasi 1 menggunakan pasangan redox V(III)/V(II) dan V(V)/V(IV) yang terlarut dalam asam sulfat sebagai elektrolit negatif dan positif. Pada awalnya elektrolit merupakan campuran ion V(III) dan V(IV) dalam asam sulfat dengan rasio 50:50 yang disebut V (3,5+) dan ditambahkan pada kedua sel elektroda. Pada saat proses *charging* awal proses dua langkah mengubah V (3,5+) menjadi V(II) dan V(V) pada elektroda negatif dan positif (Skylas-Kazacos, 2009).

3.3. Kondisi yang mempengaruhi performa VRFB

Walaupun kemajuan signifikan telah dibuat dengan adanya *demo plant* sistem VRFB multi-MWh, teknologi yang ada saat ini tidak dapat memenuhi

semua matriks kinerja dan kebutuhan biaya untuk penetrasi pasar yang luas. Teknologi VRFB berbasis asam sulfat tradisional secara signifikan terbatas oleh kelarutan ion vanadium dan stabilitas dalam larutan elektrolit pada rentang temperatur tertentu. Kelemahan sistem VRFB antara lain adalah densitas energi yang rendah $<25 \text{ Wh L}^{-1}$ ($<1,7 \text{ M}$ konsentrasi vanadium aktif), tetapi juga pada rentang temperatur operasional yang sempit antara $10 - 40^\circ\text{C}$. Secara ringkas, beberapa kondisi yang mempengaruhi kinerja dari VRFB ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Beberapa kondisi yang mempengaruhi performa VRFB

Kondisi	Dampak	Mitigasi
Temperatur operasi di bawah 10°C atau diatas 40°C	• Presipitasi • Penurunan kapasitas • Kerusakan membran • Kerusakan pompa	• Penggunaan sensor temperatur, sistem kontrol dan sistem pengkondisian temperatur baterai.
<i>Overcharging</i>	• Pembentukan gas Hidrogen • Delaminasi elektroda karbon	• Pemakaian BMS yang dapat memantau tegangan baterai • Pembuatan valve venting Hidrogen
Infiltrasi udara pada tangki	• Oksidasi pada elektroda • Penurunan kapasitas	• Nitrogen <i>Blanketing</i>
<i>Cross-over</i> larutan elektrolit	Penurunan kapasitas	<i>Rebalancing / remixing</i>

3.4. Komersialisasi VRFB

Matriks biaya teknologi yang digunakan pada sistem penyimpanan energi umumnya meliputi *capital cost*, *power conditioning system (PCS) cost*, *balance of plant (BOP)*, *fixed O&M* dan *variable O&M*. Sedangkan matriks performa meliputi RTE, *response time*, *cycle life*, *calendar life*, *Manufacturing Readiness Level (MRL)* dan *Technology Readiness Level (TRL)*. Pada studi (Mongird dkk., 2020b) MRL baterai RFB telah mencapai level 8 dari skala 10 dan TRL telah mencapai level 7 dari skala 9 dan menurut (Nguyen dkk, 2017) teknologi VRFB telah mencapai TRL 9 untuk penyimpanan energi skala kecil yang menandakan bahwa teknologi baterai RFB telah terbukti dapat beroperasi. Saat ini setidaknya terdapat

33 perusahaan sebagai produsen teknologi ini dan beberapa manufaktur telah memasang instalasi VRFB secara global (Anonim, 2021). Beberapa instalasi VRFB yang terbesar antara lain adalah Gardu Induk Minami Hayakita di Jepang, dengan rating 15 MW dan 60 MWh (Shibata dkk., 2018) yang dibangun oleh Sumitomo Electric Ind. untuk Hokkaido Electric Power Inc. pada tahun 2015. Stasiun penyimpanan energi di Fraunhofer ICT di Pfinztal, Jerman, dengan rating 2 MW dan 20 MWh yang di-commissioning pada tahun 2019 (Noack dkk., 2018). Uni Energy Technologies, US-WA, telah memasang sejumlah sistem dengan rating 2 MW dan 8 MWh. Proyek terbesar sejauh ini adalah fasilitas penyimpanan energi dengan rating 200 MW dan kapasitas energi 800 MWh yang dirancang dan diproduksi oleh Rongke Power di China dan diperkirakan akan menjadi pabrik penyimpanan energi elektrokimia terbesar di dunia (Yang, 2017). Di Indonesia pengujian implementasi teknologi VRFB telah terpasang dengan kapasitas 400kW/500kWh telah dilakukan Badan Pengkajian Penerapan Teknologi (BPPT) untuk sistem *microgrid* Sumba namun Status sistem penyimpanan VRFB pada smart grid Sumba sejak dipasang tahun 2012 belum dioperasikan secara normal karena adanya kendala teknis dan non-teknis (Akhmad dkk., 2017).

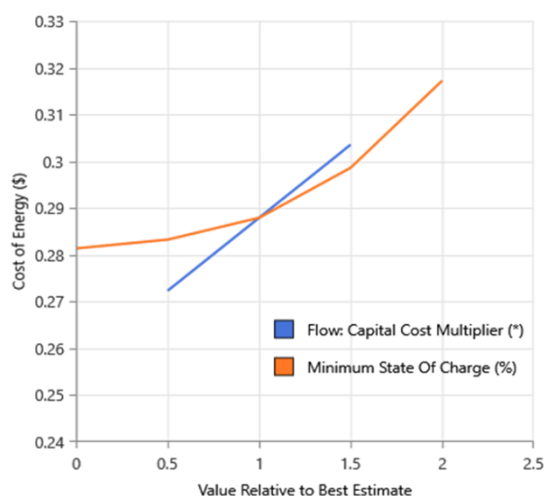
3.5. Simulasi VRFB pada sistem hibrid

Hasil dari optimasi simulasi yang dilakukan menggunakan *software* Homer Pro dengan *setting capacity shortage* 0% atau dengan kata lain seluruh kebutuhan listrik di daerah tersebut terpenuhi menghasilkan konfigurasi optimum dengan sistem PLTD 25 kW, PLTS 105 kWp, PLTB 10 unit, Converter 18 kW dan VRFB 20 kW / 200 kWh dengan nilai *cost of energy (COE)* sebesar \$0,288/kwh dan total *net present cost (NPC)* \$432.439.

Tabel 4. Perbandingan keekonomian

	Sistem PLTD	PLT Hybrid – Lead – Acid	PLT Hybrid – VFRB
<i>Net Present Cost</i>	\$891,180	\$413,272	\$432,439
CAPEX	\$24,500	\$152,664	\$213,415
OPEX	\$49,288	\$14,281	\$12,456
LCOE (per kWh)	\$0.593	\$0,276	\$0,288
CO ₂ Emitted (kg/yr)	80,646	3,755	7,259
Fuel Consumption (L/yr)	30,806	1,4234	2,773

Meskipun nilai COE dari hasil simulasi masih lebih tinggi jika sistem menggunakan baterai lead acid seperti pada studi (Aditya dkk., 2021) dengan nilai COE \$0,276/kWh namun jika dilakukan perbandingan konfigurasi sistem yang hanya menggunakan PLTD dengan sistem PLT Hybrid yang optimal tersebut, nilai COE dan emisi CO₂ yang dihasilkan sistem PLT Hybrid adalah jauh lebih kecil seperti dapat dilihat pada Tabel 4. Untuk mengetahui pengaruh ketidakpastian harga elektrolit VRFB dan minimum SoC terhadap nilai COE maka dilakukan analisis sensitivitas parameter nilai capital cost elektrolit terhadap COE dengan menggunakan nilai 0,5, 0,6, 0,8 1,2, 1,4 dan 1,5 dari nilai *capital cost* pada model awal. Sedangkan untuk minimum SoC menggunakan nilai 0, 10, 20, 30 dan 40%.



Gambar 5. Hasil analisa sensitivitas

Hasil simulasi sensitivitas SoC menunjukkan bahwa perubahan nilai SoC 40 % ke nilai terendah 0% akan menghasilkan nilai COE dengan rentang \$0,281/kWh - \$0,317/kWh. Hasil simulasi sensitivitas juga menunjukkan bahwa perubahan harga elektrolit akan memberikan COE dalam rentang \$0,266/kWh - \$0,303/kWh seperti dapat dilihat pada Gambar 5 yang menunjukkan grafik spider plot sensitivitas terhadap COE. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa gradien dari sensitivitas *capital cost* elektrolit lebih tinggi dari sensitivitas minimum SoC yang mengindikasikan bahwa perubahan COE akan lebih dominan diakibatkan perubahan dari *capital cost* elektrolit dari baterai tersebut. Dari hasil analisis tersebut juga dapat dilihat bahwa untuk mendapatkan nilai COE yang sama dengan konfigurasi pada studi (Aditya dkk., 2021) dapat dicapai jika nilai capital cost dari elektrolit lebih rendah ~ 40% dari nilai saat ini.

4. PENUTUP

Baterai *Vanadium Redox Flow Battery* merupakan teknologi penyimpanan tipe *Redox Flow* yang paling *mature* serta telah dibangunnya beberapa demonstrasi proyek di beberapa negara dan telah memasuki tahap komersialisasi terutama untuk

aplikasi penyimpan energi skala besar dan terhubung dengan sumber energi terbarukan. Karakteristik yang cukup berbeda dari VRFB dibandingkan dengan energi penyimpanan elektrokimia lainnya antara lain adalah dapat dipisahkannya daya dan energi dalam desain energi penyimpanan, memiliki siklus hidup yang tinggi dan dapat dicapai DoD yang lebih rendah. Meskipun memiliki energi densitas yang rendah dibandingkan dengan teknologi Li-ion, namun faktor *safety* VRFB lebih baik karena tidak memiliki risiko kebakaran jika terjadi *short-circuit*. Temperatur merupakan aspek yang perlu diperhatikan pada baterai ini karena pengoperasian diluar rentang temperatur akan menyebabkan presipitasi pada elektrolit yang dapat menyebabkan kerusakan membran dan penurunan kapasitas. Selain itu *overcharging* dapat menyebabkan reaksi samping pembentukan gas Hidrogen. Oksidasi elektroda merupakan faktor lain yang perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan delaminasi karbon pada elektroda. Hasil simulasi tekno-ekonomi pada sistem kecil menunjukkan nilai COE dari konfigurasi sistem PLT Hibrid dengan menggunakan VRFB masih cukup tinggi dengan nilai \$0.288/kWh namun masih lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem yang menggunakan PLTD untuk memenuhi kebutuhan seluruh sistem. Hasil analisa sensitivitas menunjukkan bahwa COE sistem akan bergantung secara signifikan pada harga capital elektrolit dimana diprediksi jika harga elektrolit lebih rendah 40% akan sebanding dengan COE sistem menggunakan baterai *lead acid*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT PLN (Persero) yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, I. A., Aisyah, S., & Simaremare, A. A. (2021). Optimal sizing and sensitivity analysis of Hybrid Renewable Energy Systems: A case of Ur Island in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(4), 042049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/4/042049>
- Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., Cotter, A. L., Bradshaw, D. T., & Gauntlett, W. D. (2013). *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. 340.
- Akhmad, K., Nurdiana, E., Aryono, N. A., & Hilal, H. (2017). *Performance of the PV Subsystems in Smart Micro Grid Sumba*. <https://doi.org/10.22146/IJITEE.25143>
- Anonim. (2021). *VANADIUM REDOX FLOW BATTERY COMPANIES | Vanitec*. <http://www.vanitec.org/vanadium-redox->

- flow-battery-vrfb-companies. [Diakses tanggal 16 November 2021].
- Argyrou, M. C., Christodoulides, P., & Kalogirou, S. A. (2018). Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 804–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.044>
- Chalamala, B. R., Soundappan, T., Fisher, G. R., Anstey, M. R., Viswanathan, V. V., & Perry, M. L. (2014). Redox Flow Batteries: An Engineering Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 102(6), 976–999. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2320317>
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- Chen, R., Kim, S., & Chang, Z. (2017). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. Dalam *Redox—Principles and Advanced Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68752>
- Fan, X., Liu, B., Liu, J., Ding, J., Han, X., Deng, Y., Lv, X., Xie, Y., Chen, B., Hu, W., & Zhong, C. (2020). Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Transactions of Tianjin University*, 26(2), 92–103. <https://doi.org/10.1007/s12209-019-00231-w>
- IRENA. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. /Publications/2017/Oct/Electricity-Storage-and-Renewables-Costs-and-Markets. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
- Mongird, K., Viswanathan, V., & Alam, J. (2020a). *2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment*. Energy.Gov. <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/downloads/2020-grid-energy-storage-technology-cost-and-performance>
- Mongird, K., Viswanathan, V., Balducci, P., Alam, J., Fotedar, V., Koritarov, V., & Hadjerioua, B. (2020b). An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics. *Energies*, 13(13), 3307. <https://doi.org/10.3390/en13133307>
- Nguyen, T.-T., Martin, V., Malmquist, A., & Silva, C. A. S. (2017). A review on technology maturity of small scale energy storage technologies. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, 36. <https://doi.org/10.1051/rees/2017039>
- Noack, J., Roznyatovskaya, N., Gurieff, N., Menictas, C., Tübke, J., & Skyllas-Kazacos, M. (2018). Current Development Trends and Challenges for Redox-Flow Batteries. *Proceedings of the ModVal*.
- Noack, J., Wietschel, L., Roznyatovskaya, N., Pinkwart, K., & Tübke, J. (2016). Techno-Economic Modeling and Analysis of Redox Flow Battery Systems. *Energies*, 9(8), 627. <https://doi.org/10.3390/en9080627>
- Shibata, T., Sano, T., Yano, K., Fujikawa, K., Hayashi, S., Yamanishi, K., Inoue, A., Tada, K., Matsumoto, T., & Sasano, E. (2018). Demonstration project of large-scale storage battery system at Minami-Hayakita substation—Evaluation of the 60MWh vanadium flow battery system performance -. *グランド再生可能エネルギー国際会議論文集*, 1, 283. https://doi.org/10.24752/gre.1.0_283
- Skyllas-Kazacos, M. (2009). SECONDARY BATTERIES – FLOW SYSTEMS | Vanadium Redox-Flow Batteries. Dalam J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (hlm. 444–453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00177-5>
- Skyllas-Kazacos, M., & McCann, J. (2015). Vanadium redox flow batteries (VRBs) for medium-and large-scale energy storage. Dalam *Advances in batteries for medium and large-scale energy storage* (hlm. 329–386). Elsevier.
- Tangirala, R. (2011). *Developments in redox flow batteries* [Phd, University of Southampton]. <https://eprints.soton.ac.uk/361961/>
- Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., & Liu, Q. (2011). Redox flow batteries: A review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(10), 1137. <https://doi.org/10.1007/s10800-011-0348-2>
- Yang, G. (2017). *It's Big and Long-Lived, and It Won't Catch Fire: The Vanadium Redox-Flow Battery*. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/its-big-and-longlived-and-it-wont-catch-fire-the-vanadium-redoxflow-battery> [Diakses tanggal 19 November 2021]