

Studi Kelayakan Jenis Baterai Kendaraan Listrik Roda Empat Dengan Metode *Weighted Objective* Untuk Program Kendaraan Listrik Di Indonesia

Rahayu Indah Sulistyowati¹, Djoko W. Karmiadji¹, La Ode M. Firman¹

¹Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila Jakarta

Email: indah.risp@yahoo.com, djokow@univpancasila.ac.id, laodefirman@univpancasila.ac.id

ABSTRAK

Baterai merupakan salah satu komponen terpenting pada kendaraan listrik. Dari beberapa jenis aki yang ada di pasaran saat ini, Indonesia harus bisa mengkolaborasikan antara ketersediaan bahan baku dan teknologi pembuatan dan perakitan baterai tersebut agar jenis baterai yang dikembangkan efektif dan mampu bersaing di pasaran. Penelitian ini dilakukan untuk mensimulasikan baterai *Lead Acid*, *Nickel Metal Hydride* (NiMH), dan *Lithium-ion* (Li-ion). Data yang dihasilkan merupakan hasil kajian literatur dengan menggunakan metode *weighted objective* dengan membandingkan kriteria yaitu kepadatan energi, emisi baterai, proses manufaktur, ketersediaan bahan baku utama, dan fasilitas daur ulang dari baterai. Data yang diperoleh untuk setiap kriteria digunakan sebagai dasar pembobotan dengan menggunakan metode *weighted objective*. Hasil perhitungan dari metode tersebut jenis baterai Li-ion memperoleh nilai 280, NiMH memperoleh nilai 270, dan *lead acid* memperoleh nilai 220. Nilai tersebut dapat dijadikan referensi sebagai tingkat kelayakan untuk implementasi baterai kendaraan listrik roda empat di Indonesia.

Kata kunci: Baterai Kendaraan Listrik, *Lead Acid*, *Nickel Metal Hydrid*, *Lithium ion*, Metode *Weighted Objective*

ABSTRACT

Batteries are one of the most important components in electric vehicles. Of the several types of batteries currently on the market, Indonesia must be able to collaborate between the availability of raw materials and the technology for manufacturing and assembling these batteries so that the types of batteries being developed are effective and able to compete in the market. This research was conducted to simulate lead acid, nickel metal hydride (NiMH), and lithium-ion (Li-ion) batteries. The resulting data is the result of a literature review using the weighted objective method by comparing criteria, namely energy density, battery emissions, manufacturing process, availability of main raw materials, and battery recycling facilities. The data obtained for each criterion is used as the basis for weighting using the weighted objective method. The results of the calculations from this method for Li-ion battery type get a score of 280, NiMH get a score of 270, and lead acid get a score of 220. These values can be used as a reference as a feasibility level for the implementation of four-wheeled electric vehicle batteries in Indonesia.

Keywords: *Electric Vehicle Battery, Lead Acid, Nickel Metal Hydrid, Lithium ion, Weighted Objective Method*

PENDAHULUAN

Indonesia berkomitmen untuk melakukan transisi energi dari penggunaan kendaraan berbasis bahan bakar fosil menuju kendaraan berbasis baterai [1]. Sektor transportasi menempati urutan kedua tertinggi dalam hak menyumbang emisi gas rumah kaca (GRK) setelah sektor industri [2]. Beberapa langkah telah dilakukan, salah satunya dengan menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 55 tanggal 08 Agustus 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Bebas Baterai

(KBLBB) untuk Transportasi Jalan [3]. Berbagai peraturan turunan telah dihadirkan dari Pemerintah guna mendukung penggunaan kendaraan listrik di Indonesia, salah satunya Instruksi Presiden Nomor 7 tanggal 14 September 2022 tentang Penggunaan Kendaraan Bermotor Berbasis Baterai sebagai Kendaraan Operasional dan Kendaraan Perorangan Dinas Instansi Pemerintah Pusat dan Pemerintah Daerah. Berdasarkan kepada Perpres Nomor 55/2019, setidaknya 60% dari komponen kendaraan listrik harus diproduksi secara lokal pada tahun 2025.

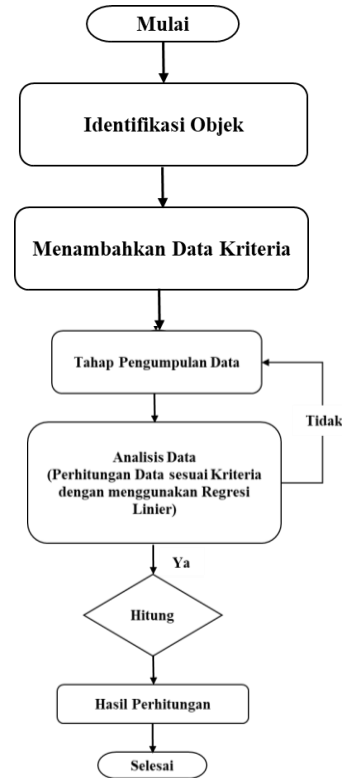
Dari beberapa jenis baterai yang ada di pasaran saat ini, Indonesia harus mampu mengkolaborasikan antara ketersediaan bahan baku dengan teknologi untuk pembuatan maupun perakitan baterai tersebut sehingga jenis baterai yang dikembangkan menjadi tepat guna dan mampu bersaing dipasaran [4]. Berdasarkan tinjauan dari *Argonne National Laboratory* mengenai *battery life-cycle analysis* menyatakan bahwa suatu produk dinilai layak untuk dibeli ketika produk tersebut yaitu baterai kendaraan listrik dapat dilakukan evaluasi terhadap dampak yang dihasilkan terhadap lingkungan sepanjang siklus hidupnya [5][6]. Dampak lingkungan yang diakibatkan mulai dari pengambilan material, diikuti proses produksi dan penggunaan, serta berakhir pada pengolahan limbah. Saat ini, sekitar 55,56% penggunaan baterai jenis Li-ion ada dipasaran, sedangkan untuk NiMH hanya 38,89% dan sisanya adanya jenis baterai kendaraan listrik jenis lainnya [7].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan perbandingan beberapa jenis baterai kendaraan listrik yang ada di Indonesia. Data yang ditampilkan merupakan hasil kajian pustaka terhadap kepadatan energi (*energy density*), emisi baterai, proses manufaktur, ketersediaan bahan baku utama, dan fasilitas daur ulang dari baterai kendaraan listrik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran terhadap potensi pengembangan baterai listrik untuk program KBLBB di Indonesia baik dalam penyediaan infrastruktur maupun penyediaan fasilitas umum lainnya, fokus penelitian ini adalah Studi Kelayakan Jenis Baterai Kendaraan Listrik Roda Empat dengan Metode *Weighted Objective* Untuk Program Kendaraan Listrik di Indonesia.

Agar penelitian lebih terarah, maka pembahasan difokuskan pada tingkat kelayakan jenis baterai kendaraan listrik yang cocok untuk implementasi di Indonesia dengan berdasarkan jenis baterai yang tercantum pada butir 4. Tingkat kelayakan dihitung dengan menggunakan metode *weighted objective* dengan menampilkan 6 (enam) kriteria yaitu kepadatan energi (*energy density*), emisi baterai, proses manufaktur, ketersediaan bahan baku utama, fasilitas daur ulang, dan biaya operasional dari baterai kendaraan listrik untuk 3 (tiga) jenis baterai yaitu Timbel Asam (Lead Acid), Nikel Metal Hydride (NiMH), dan Lithium-Ion (Li-Ion), sehingga tujuan yang akan dicapai dapat menganalisis kelayakan dari beberapa jenis baterai kendaraan listrik roda empat untuk program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian ini berdasarkan pada *flow chart* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Masing-masing langkah penelitian dijelaskan secara rinci sebagai berikut:

1. Identifikasi Objek

Pada tahap ini dilakukan studi literatur dan studi lapangan. Studi literatur dilakukan untuk mengkaji dan mengetahui secara teoritis mengenai jenis baterai yang diteliti serta metode *weighted objective* yang akan digunakan sebagai metode untuk menganalisis kelayakan pada jenis baterai yang diteliti. Sedangkan studi lapangan yang dilakukan adalah mempelajari bagaimana implementasi jenis baterai kendaraan listrik di pasaran.

2. Menambahkan Data Kriteria

Pada tahap selanjutnya dilakukan kriteria-kriteria yang akan diteliti dari hasil identifikasi objek. Kriteria yang akan ditambahkan adalah ketersediaan material bahan baku, proses manufaktur, proses daur ulang, perbandingan energi siklus hidup, dan emisi dari baterai kendaraan listrik dari alternatif baterai yang akan diteliti.

3. Pengumpulan Data

Pada tahap ketiga dilakukan pengumpulan data atas tiga jenis baterai yang akan diteliti berdasarkan kriteria yang telah dipilih. Jenis baterai yang akan diteliti yaitu *Lead Acid*, NiMH, dan Lithium-ion (Li-ion) serta kriteria yang akan ditambahkan yaitu ketersediaan material bahan baku, proses manufaktur, proses daur ulang, energi siklus hidup, dan emisi.

4. Analisis Data

Setelah data terkumpul, maka tahap selanjutnya yaitu analisis data. Analisis data menggunakan metode *weighted objective*. Dengan metode ini, diharapkan dapat menyelesaikan masalah optimasi yang melibatkan banyak objek dengan lebih baik. Secara teoritis, metode ini dilakukan untuk menentukan jenis baterai mana yang terbaik untuk digunakan di Indonesia.

Tahapan dalam analisa data yaitu sebagai berikut:

a. Perhitungan Bobot Kriteria

Setelah menentukan kriteria yang akan diteliti untuk setiap jenis baterai yang diteliti, maka kriteria tersebut diberi bobot relatif dengan membandingkan dua kriteria menggunakan tabel *pair-wise comparison* dengan skala 0 dan 1. Tata cara menentukan nilai perbandingan yaitu dengan membandingkan secara horizontal.

b. Perhitungan Nilai Alternatif

Dalam tahap ini, yang pertama kali dilakukan adalah menentukan skala penilaian (bobot) terhadap masing-masing kriteria terhadap besaran nilai dari setiap kriteria yang ditampilkan per jenis baterai yang akan diteliti. Penentuan bobot dengan memberikan nilai berdasarkan nilai terkecil dan terbesar dari data yang didapat per jenis baterai, kemudian menentukan rentang dan pembobotan dengan interval nilai yang ada. Setelah itu, dilakukan dibuat rekapitulasi input data dari kriteria dan jenis baterai yang diteliti, dan kemudian dikonversi berdasarkan nilai bobot yang telah dibuat ditahap sebelumnya. Perhitungan analisis data juga menggunakan metode regresi linier sehingga dapat diketahui peramalan jumlah terhadap kebutuhan baterai kendaraan listrik.

5. Hasil Perhitungan

Pada tahap ini, setelah dilakukan analisis data berdasarkan metode *weighted objective* maka akan didapatkan hasil perhitungan. Hasil dari perhitungan berdasarkan metode *weighted objective* tersebut dapat dijadikan pertimbangan dalam pengambilan keputusan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data

Dalam penelitian ini terdapat 2 (dua) tahap analisis data, yaitu perhitungan bobot antar kriteria dan perhitungan masing-masing kriteria berdasarkan jenis baterai dengan metode *weighted objective*. Nilai bobot digunakan untuk mengetahui tingkat kepentingan antar masing-masing kriteria dalam kelayakan per jenis baterai, dan hasil perhitungan dengan metode *weighted objective* digunakan untuk mempelihatkan hasil kelayakan terbaik diantara jenis baterai yang diteliti.

Perhitungan Bobot Kriteria

Prosedur dalam tahapan ini yaitu menyusun daftar kriteria, membuat ranking dari daftar kriteria, dan memberi bobot relatif untuk setiap tujuan dengan menggunakan skala 0 (nol) atau 1 (satu).

Tabel 1 Tabel Kriteria dan *Objectives*

Kriteria	Objectives
Kepadatan Energi	A
Emisi Proses Produksi	B
Energi Proses Manufaktur	C
Ketersediaan Bahan Baku Kritisal	D
Fasilitas Daurl Ulang	E
Biaya	F

Dari Tabel 1, kriteria yang akan dibandingkan dan diberi bobot relatif diberi inisial untuk meminimalisasi kata yang digunakan. Rincian inisial tercantum dalam Tabel 2, kemudian dari tabel tersebut maka selanjutnya dilakukan bobot relatif berdasarkan data wawancara dari narasumber.

Tabel 2. Tabel *Pair-Wise Comparison*

No	Objectives	A	B	C	D	E	F	Row Total	Bobot	Bobot Total (Wt)
1	2	3	4	5	6	7	8	9=3+4+5+6+7+8	10	11=Bobot x Akum Bobot
1	A	-	0	1	1	1	1	4	4/15	60
2	B	0	-	1	1	1	1	4	4/15	60
3	C	0	0	-	0	1	1	2	2/15	30
4	D	0	0	0	-	1	1	2	2/15	30
5	E	0	0	0	1	-	0	1	1/15	15
6	F	0	0	0	1	1	-	2	2/15	30
Total								15	15/15	225

Dari Tabel 2, *pair-wise comparison* digunakan sebagai teknik dalam memberi bobot relatif antara dua buah kriteria yang diperbandingkan. Hubungan antar kriteria yang dibandingkan kemudian diberi nilai bobot dengan

menggunakan skala 0 dan 1. Nilai bobot tersebut menunjukkan nilai kriteria satu lebih penting daripada nilai kriteria yang diperbandingkan.

Tata cara menentukan nilai perbandingan yaitu dengan membandingkan secara horizontal dapat terlihat bahwa kriteria A jika dibandingkan dengan kriteria B, kriteria C, kriteria D, kriteria E, dan kriteria F memiliki bobot skala 1 (satu). Hal ini menunjukkan kriteria A memiliki kepentingan lebih daripada kriteria B, kriteria C, kriteria D, kriteria E, dan kriteria F. Begitu juga dengan penilaian kriteria B, kriteria C, kriteria D, kriteria E, dan kriteria F dengan membandingkan secara horizontal sesuai tabel diatas.

Berdasarkan dari hasil wawancara didapati beberapa hal yaitu kriteria A jika dibandingkan dengan kriteria B, maka lebih penting kriteria B. Hal ini didasarkan kepada komitmen Indonesia untuk melakukan transisi energi menuju energi bersih, sedangkan kriteria B menunjukkan bahwa pertimbangan proses produksi dalam pembuatan baterai listrik yang menyumbang CO₂ lebih banyak dibandingkan dengan jumlah bahan baku yang digunakan. Berbeda jika kriteria A dibandingkan dengan kriteria C, kriteria D, kriteria E, dan kriteria F, hal ini dikarenakan kriteria A lebih penting karena keberhasilan dalam implementasi transisi energi yaitu penggunaan energi baru terbarukan yaitu salah satunya merupakan baterai kendaraan listrik yang memiliki kestabilan dan kemampuan tinggi dalam penyimpanan.

Kriteria B jika dibandingkan dengan kriteria A maka dianggap lebih penting kriteria A, oleh karena itu nilai pada tabel diatas adalah 0 (nol). Hal ini kurang lebih sama dengan penjelasan sebelumnya. Namun jika kriteria B dibandingkan dengan kriteria C, kriteria D, kriteria E, dan kriteria F maka lebih penting kriteria B. Hal ini dikarenakan kriteria B yang mewakili Emisi Proses Produksi harus diprioritaskan dibandingkan Energi Proses Manufaktur, Ketersediaan Bahan Baku dan Fasilitas Daur Ulang serta Biaya.

Kriteria C jika dibandingkan dengan kriteria A, kriteria B, dan kriteria D maka lebih penting kriteria C. Hal ini dikarenakan besarnya nilai kriteria A dan kriteria B maka akan berpengaruh terhadap kriteria C. Namun pada jika dibandingkan dengan kriteria E dan kriteria F, maka kriteria E dan kriteria F perlu dipertimbangkan. Hal ini dikarenakan semakin banyak proses produksi yang dilakukan, maka membutuhkan fasilitas daur ulang untuk proses pemurnian ataupun proses produksi sehingga bahan baku yang tersedia dapat dimanfaatkan dengan maksimal dan lingkungan bersih dapat terjaga.

Kriteria D jika dibandingkan dengan kriteria A, kriteria B, kriteria C, dan kriteria E serta

kriteria F, maka kriteria D lebih unggul dari kriteria E dan kriteria F namun tidak lebih unggul dari kriteria lainnya. Hal ini disebabkan pertimbangan bahwa bahan baku yang tersedia untuk pembuatan baterai dapat juga diperoleh dari negara lain apabila memang diperlukan dan pemanfaatannya juga harus mempertimbangkan apabila kriteria A, kriteria B, dan kriteria C terpenuhi dalam proses transisi energi.

Kriteria E jika dibandingkan dengan kriteria A, kriteria B, kriteria C, kriteria D, dan kriteria F maka kriteria E lebih unggul dari kriteria D namun tidak lebih unggul dari kriteria lainnya. Hal ini dikarenakan pemanfaatan yang perlu diutamakan sehingga apabila bahan baku di Indonesia sangat berlimpah namun fasilitas pemanfaatan dan daur ulang masih sangat minim maka hasil yang didapatkan tidak optimal khususnya untuk keberlangsungan energi hijau.

Perhitungan Nilai Alternatif

Pada perhitungan bobot kriteria telah diketahui nilai bobot dari masing-masing kriteria yang diteliti untuk kemudian dikonversikan ke dalam skor per masing-masing jenis baterai. Dalam menentukan nilai alternatif, yang perlu dilakukan yaitu membuat bobot per jenis kriteria. Setelah itu, data dari nilai alternatif dilakukan rating kecocokan dari pembobotan yang dilakukan [20]. Berikut adalah skala penilaian dari masing-masing kriteria diuraikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Skala Penilaian Kepadatan Energi

No	Kepadatan Energi	Satuan	Bobot
1	30 - 45	Wh/Kg	1
2	46 - 60	Wh/Kg	2
3	61 - 110	Wh/Kg	3
4	110 - 200	Wh/Kg	4

Dari Tabel 3, penentuan bobot untuk kriteria kepadatan energi yaitu sebagai berikut:

1. Kepadatan energi yang lebih besar, memiliki bobot paling besar. Hal ini dikarenakan kepadatan energi semakin besar maka jenis baterai tersebut semakin baik dalam *performance*-nya. Bobot 1 – 4 menunjukkan bahwa makin besar kepadatan energi, memiliki bobot makin tinggi.
2. Skala perhitungan bobot menyesuaikan besaran kepadatan energi, dari ketiga jenis baterai yang dibandingkan maka nilai paling rendah adalah 30 [Wh/kg] dan nilai paling besar adalah 200 [Wh/kg]. Oleh karena itu dibuat kategori per besaran kepadatan energi dari total

akumulasi besaran kepadatan energi dari jenis baterai yang diteliti.

Tabel 4. Skala Penilaian Emisi Proses Produksi

No	Emisi Proses Produksi	Satuan	Bobot
1	1 - 5	kg CO ₂ /kg	4
2	6 - 10	kg CO ₂ /kg	3
3	11 - 15	kg CO ₂ /kg	2
4	16 - 20	kg CO ₂ /kg	1

Dari Tabel 4, penentuan bobot untuk kriteria emisi proses produksi yaitu sebagai berikut:

1. Emisi yang dihasilkan dari proses produksi dengan nilai rendah, maka akan mendapatkan bobot tertinggi. Hal ini dikarenakan rendahnya emisi yang dihasilkan, maka semakin baik jenis baterai yang digunakan untuk lingkungan.
2. Skala perhitungan bobot menyesuaikan besaran emisi proses produksi yang dihasilkan, dari ketiga jenis baterai yang dibandingkan maka nilai paling rendah adalah 3,2 [kg CO₂/kg] dan nilai paling besar adalah 13,6 [kg CO₂/kg]. Oleh karena itu dibuat kategori emisi proses produksi sesuai interval besaran nilai dari total akumulasi nilai emisi proses produksi dari jenis baterai yang diteliti.

Tabel 5. Skala Penilaian Energi Proses Manufaktur

No	Energi Proses Manufaktur	Satuan	Bobot
1	1 - 10	%	1
2	11 - 20	%	2
3	21 - 30	%	3
4	31 - 40	%	4

Dari Tabel 5, penentuan bobot untuk kriteria energi proses manufaktur yaitu sebagai berikut:

1. Presentase energi yang dibutuhkan dari proses manufaktur dengan nilai lebih besar, maka akan mendapatkan bobot lebih tinggi. Hal ini dikarenakan besarnya energi yang dibutuhkan dalam proses manufaktur, maka semakin baik jenis baterai dalam proses pembuatan atau pembentukannya.
2. Skala perhitungan bobot menyesuaikan besaran prosentase energi proses manufaktur yang dibutuhkan, dari ketiga jenis baterai yang dibandingkan maka nilai paling rendah adalah 6,81% dan nilai paling besar adalah 30%. Oleh karena itu dibuat kategori prosesentase

energi proses manufaktur sesuai interval besaran nilai dari total akumulasi dari jenis baterai yang diteliti.

Tabel 6. Skala Penilaian Ketersediaan Bahan Baku

No	Ketersediaan Bahan Baku Kritis	Satuan	Bobot
1	1 SDA	Lot	1
2	2 SDA	Lot	2
3	3 SDA	Lot	3

Dari Tabel 6, penentuan bobot untuk kriteria ketersediaan bahan baku yaitu dengan skala perhitungan bobot menyesuaikan jumlah sumber daya alam yang terkandung dalam ketiga jenis baterai yang diteliti. Dari data yang dibandingkan maka nilai paling rendah adalah 1 buah SDA dan nilai paling besar adalah 3 buah SDA. Oleh karena itu dibuat kategori jumlah sumber daya alam sesuai interval besaran nilai dari total bahan baku dari jenis baterai yang diteliti.

Tabel 7. Skala Penilaian Fasilitas Daur Ulang

No	Kriteria	Bobot	Alternatif Baterai								
			Lead Acid			NIMH			Li-Ion		
			Besaran	Nilai	Skor	Besaran	Nilai	Skor	Besaran	Nilai	Skor
1	2	3	4	5	6=3x5	7	8	9=3x5	10	11	12=3x11
1	Kepadatan Energi	60	50 [Wh/kg]	1	60	120 [Wh/kg]	3	180	200 [Wh/kg]	4	240
2	Emisi Proses Produksi	60	3,2 [CO ₂ kg/kg]	4	240	13,6 [CO ₂ kg/kg]	2	120	12,5 [CO ₂ kg/kg]	2	120
3	Energi Proses Manufaktur	30	31%	1	30	6,8%	4	120	25,5%	2	60
4	Ketersediaan Bahan Baku Kritis	30	Pb: 4,18 Miliar Ton	1	30	Ni: 192 Juta Ton Al: 2,7 Miliar Ton	2	60	Ni: 192 Juta Ton Co: 4 Juta Ton Mn: 0,37 Juta Ton	3	90
5	Fasilitas Daur Ulang	15	200 Unit	4	60	74 Unit	2	30	83 Unit	3	45
6	Biaya	30	USD 0,0233	2	60	USD 0,0142	3	90	USD 0,0085	4	120
Total		225			480			600			675

No	Fasilitas Daur Ulang	Satuan	Bobot
1	< 50	Unit	1
2	50 - 100	Unit	2
3	101 - 150	Unit	3
4	> 150	Unit	4

Dari Tabel 7, penentuan bobot untuk kriteria fasilitas daur ulang yaitu dengan skala perhitungan bobot menyesuaikan skala jumlah yang ada, dari ketiga jenis baterai yang dibandingkan besaran interval besaran nilai dari total fasilitas yang tersedia dari jenis baterai yang diteliti menghasilkan beberapa kategori sesuai yang tertera pada Tabel 8.

Tabel 8. Skala Penilaian Biaya

Biaya	Satuan	Bobot
> 0,026	USD per Cycle	1
0,021 - 0,025	USD per Cycle	2
0,015 - 0,020	USD per Cycle	3
< 0,01	USD per Cycle	4

Selanjutnya dari keenam tabel diatas, kriteria – kriteria yang sudah dikumpulkan datanya kemudian dimasukkan ke dalam tabel untuk selanjutnya mengubah inputan data menjadi nilai rating atau bobot kecocokan. Tabel 9 merupakan input dari tiap kriteria yang menunjukkan nilai tiap kriteria yang dijadikan dasar pengambilan keputusan.

Tabel 9. Rekapitulasi Input Data

No	Jenis Baterai	Kriteria					Biaya
		Kepadatan Energi	Emisi Proses Produksi	Energi Proses Manufaktur	Ketersediaan Bahan Baku Kritis	Fasilitas Daur Ulang	
1	Lead Acid	50 [Wh/kg]	3,2 [CO ₂ , kg/kg]	31,04%	Pb: 4,18 Miliar Ton	200 Unit	USD 0,0233
2	NiMH	120 [Wh/kg]	13,6 [CO ₂ , kg/kg]	6,81%	Ni: 192 Juta Ton Al: 2,7 Miliar Ton	74 Unit	USD 0,0142
3	Li-ion	200 [Wh/kg]	12,5 [CO ₂ , kg/kg]	25,54%	Ni: 192 Juta Ton Co: 4 Juta Ton Mn: 0,37 Juta Ton	83 Unit	USD 0,0085

Selanjutnya dari rekapitulasi yang ditampilkan oleh Tabel 9, kemudian dikonversikan menjadi nilai rating kecocokan sesuai nilai bobot kriteria yang sudah dibuat. Ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi Konversi Nilai Bobot

Kriteria	Kepadatan Energi	Emisi Proses Produksi	Energi Proses Manufaktur	Ketersediaan Bahan Baku Kritis	Fasilitas Daur Ulang	Biaya
Lead Acid	1	4	1	1	4	2
NiMH	3	2	4	2	2	3
Li-ion	4	2	2	3	3	4

Tahap selanjutnya yaitu perbaikan bobot setiap kriteria, yaitu dengan penjabaran seperti ditunjukkan pada Tabel 10. Berikut rekapitulasi perhitungan yang disajikan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 11. Hasil Perhitungan Besaran nilai skor

a. Jenis Baterai *Lead Acid*

- Skor (Ts) Kepadatan Energi
 - Skor (Ts) Energi Proses Produksi
 - Skor (Ts) Energi Proses Manufaktur
 - Skor (Ts) Ketersediaan Bahan Baku
 - Skor (Ts) Fasilitas Daur Ulang
 - Skor (Ts) Biaya
- Total Skor
= 60 + 240 + 30 + 30 + 60 + 60 = **480**

b. Jenis Baterai NiMH

- Skor (Ts) Kepadatan Energi
- Skor (Ts) Energi Proses Produksi
- Skor (Ts) Energi Proses Manufaktur
- Skor (Ts) Ketersediaan Bahan Baku

- Skor (Ts) Fasilitas Daur Ulang
 - Skor (Ts) Biaya
- Total Skor
= 180+120 + 120 + 60 + 30 + 90 = **600**

c. Jenis Baterai Li-ion

- Skor (Ts) Kepadatan Energi
 - Skor (Ts) Energi Proses Produksi
 - Skor (Ts) Energi Proses Manufaktur
 - Skor (Ts) Ketersediaan Bahan Baku
 - Skor (Ts) Fasilitas Daur Ulang
 - Skor (Ts) Biaya
- Total Skor
= 240 + 120 + 60 + 90 + 45 + 60 = **675**

Tabel 11. merupakan hasil rekapitulasi perhitungan nilai skor (Ts). Nilai skor total untuk jenis baterai *lead acid* adalah 480, skor jenis baterai NiMH adalah 600, dan skor jenis baterai Li-ion adalah 675.

Pembahasan

Dari pembahasan dan analisa data penelitian studi kelayakan jenis baterai yang kendaraan listrik roda empat dengan metode *weighted objective* untuk program kendaraan listrik berbasis baterai di Indonesia, dapat dijelaskan bahwa data baterai kendaraan listrik yang diteliti yaitu Timbel Asam (*Lead Acid*), *Nikel Metal Hydride* (NiMH), dan Lithium-Ion (Li-Ion) dengan mendetilkan kriteria bahan baku, proses manufaktur, proses daur ulang, perbandingan energi siklus hidup, dan analisis emisi proses produksi dengan menggunakan metode *weighted objective*. Analisis energi siklus hidup berpengaruh pada kondisi suhu dan kepadatan energi. Baterai *Lead Acid* bekerja efektif ketika pengisian (*charging*) pada saat suhu -20 °C sampai dengan 50 °C dan ketika penggunaan baterai (*discharging*) optimal pada suhu bernilai -20 °C sampai dengan 50 °C dengan besaran kepadatan energi yaitu 30 [Wh/kg] sampai dengan 50 [Wh/kg]. Baterai NiMH bekerja efektif saat *charging* pada saat suhu bernilai 0 °C sampai dengan 45 °C. dan ketika *discharging* pada suhu bernilai -20 °C sampai dengan 65 °C dengan kepadatan energi sebesar 60 [Wh/kg] sampai dengan 120 [Wh/kg]. Baterai Li-ion bekerja *charging* pada suhu bernilai 0 °C sampai dengan 45 °C. dan *discharging* suhu -20 °C sampai dengan 60 °C dengan kepadatan energi 110 [Wh/kg] sampai dengan 200 [Wh/kg].

Analisis kepadatan energi, baterai *Lead Acid* memiliki kepadatan energi sebesar 30 [Wh/kg] sampai dengan 50 [Wh/kg], baterai NiMH memiliki kepadatan energi 60 [Wh/kg] sampai dengan 120 [Wh/kg], dan baterai Li-ion memiliki

kepadatan energi 110 [Wh/kg] sampai dengan 200 [Wh/kg]. Analisis energi proses manufaktur, baterai *Lead Acid* membutuhkan sekitar 30% dari total energi pembuatan jenis baterai tersebut per satuan massa. baterai NiMH membutuhkan sekitar 8,6% dari total energi pembuatan dan baterai Li-ion membutuhkan sekitar 25% dari total energi.

Analisis ketersediaan bahan baku, timbal sebesar 4,18 Miliar ton, alumunium sebesar 2,7 Miliar ton, Nikel sebesar 192 Juta ton, cobalt sebesar 4 Juta ton, dan mangan sebesar 0,37 Juta ton. Analisis ketersediaan fasilitas daur ulang, fasilitas terbanyak yaitu baterai *Lead Acid* memiliki sekitar 200 unit perusahaan, sedangkan baterai NiMH dan Li-ion memiliki fasilitas daur ulang sekitar 74 unit perusahaan dan 83 unit perusahaan. Analisis emisi CO₂ yang dihasilkan, baterai *Lead Acid* menghasilkan emisi CO₂ sebanyak 3,2 [kg] per 1 [kg], baterai NiMH menghasilkan emisi CO₂ sebanyak 13,6 [kg] per 1 [kg], baterai Li-ion menghasilkan emisi CO₂ sebanyak 12,5 [kg] per 1 [kg]. Dari data tersebut, baterai jenis *lead acid* memiliki emisi karbon paling rendah dibandingkan dengan baterai jenis NiMH dan Li-ion.

Analisis biaya *cost per cycle*, paling rendah yaitu Li-ion yaitu USD 0,0085 per cycle, sedangkan NiMH yaitu USD 0,0142 per cycle dan Lead Acid yaitu USD 0,0233 per cycle. Hasil perhitungan dengan metode *weighted objective* dengan penyesuaian bobot dan penentuan nilai kriteria, maka didapatkan hasil perhitungan skor per jenis baterai yaitu *lead acid* adalah 480, skor jenis baterai NiMH adalah 680, dan skor jenis baterai Li-ion adalah 675.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dengan metode *weighted objective* dapat diambil kesimpulan bahwa jenis baterai Li-ion merupakan jenis baterai paling layak untuk kendaraan listrik roda empat untuk program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) di Indonesia dibandingkan jenis baterai NiMH dan *Lead Acid*. Baterai *Li-ion* memperoleh skor nilai tertinggi yaitu 675, NiMH memperoleh skor nilai 600, dan *lead acid* memperoleh skor nilai 480. Jenis baterai Li-ion merupakan paling layak dikarenakan unggul dalam kriteria kepadatan energi dan *cost per cycle* dibandingkan jenis baterai NiMH dan *Lead Acid*. Jenis baterai NiMH walaupun berpotensi untuk menjadi pilihan alternatif kedua setelah Li-ion, namun masih terkendala difasilitas daur ulang dan ketersediaan bahan baku yang tersedia di Indonesia. Sedangkan jenis baterai *Lead Acid* saat ini masih banyak digunakan dikarenakan

memiliki keunggulan emisi proses produksi terbaik dan tersedianya fasilitas daur ulang yang mencukupi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Singh, M. Weeber, K. P. Birke, and A. Sauer, "Development and Utilization of a Framework for Data-Driven Life Cycle Management of Battery Cells," *Procedia Manuf.*, vol. 43, no. 2019, pp. 431–438, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.191.
- [2] M. Aziz, Y. Marcellino, I. A. Rizki, S. A. Ikhwanuddin, and J. W. Simatupang, "Studi Analisis Perkembangan Teknologi Dan Dukungan Pemerintah Indonesia Terkait Mobil Listrik," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 1, p. 45, 2020, doi: 10.24912/tesla.v22i1.7898.
- [3] Presiden Republik Indonesia, "Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 Tentang Percepatan program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) Untuk Transportasi Jalan," *Republik Indones.*, no. 55, pp. 1–22, 2019.
- [4] M. Armand and J. M. Tarascon, "Building better batteries," *Nature*, vol. 451, no. 7179, pp. 652–657, 2008, doi: 10.1038/451652a.
- [5] E. S. Division, "A review of battery life-cycle analysis: State of knowledge and critical needs," *Batter. Manuf. Electr. Hybrid Veh.*, pp. 91–133, 2011.
- [6] B. Yanuwidi, "Pelatihan Life Cycle Assessment," *Sekolah Pascasarjana Universitas Brawijaya*. 2019. [Online]. Available: <https://ppsub.ub.ac.id/id/blog/life-cycle-assessment-lca-training/>
- [7] X. Sun, Z. Li, X. Wang, and C. Li, "Technology development of electric vehicles: A review," *Energies*, vol. 13, no. 1, 2019, doi: 10.3390/en13010090.