

## REALIZATION OF FIVE-STAGE CONSTANT CURRENT CHARGING METHOD FOR LI-ION BATTERY CHARGER

### REALISASI METODE PENGISIAN ARUS KONSTAN LIMA TAHAP UNTUK PENGISI BATERAI LI-ION

Daniel Setiadikarunia<sup>1\*</sup>, Braga Geofano Wintora Oh<sup>1</sup>, Tio Dewanthono Sunoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas, Universitas Kristen Maranatha,  
Indonesia

\*Email: blessed\_dsk@yahoo.com

Received: October 31, 2025   Revised: November 25, 2025   Published: November 26, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i2.35721>

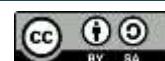
#### Abstract

The demand for high-performance battery systems in electronic devices and electric vehicles has driven the development of faster, more efficient, and safer battery charging methods. The conventional constant current-constant voltage method for charging batteries such as lithium-ion is still widely used because it is easy to implement, but it has limitations in charging speed and the potential for battery degradation due to high initial charging currents and excessive voltage towards the end of charging. This paper presents a novel lithium-ion battery charger design that differs from others based on a five-stage constant current method intended to accelerate charging time and improve charging efficiency. The transition between stages is determined based on the cut-off voltage. The current values for the first and fifth stages are determined, while the current values for the second, third, and fourth stages are obtained through calculation. Experimental results show that the implemented five-stage constant-current charging method battery charger can charge lithium-ion batteries with an average charging efficiency of 90.4%, comparable to battery charger using the constant current-constant voltage method with an average of 90.2%, but with a shorter charging time of almost half, namely an average of 2650.6 seconds for the five-stage constant current charging method and an average of 4480.9 seconds for the constant current-constant voltage method. For the lithium-ion batteries used in the testing, charging the battery with a first-stage charging current of 2.6A and a fifth-stage charging current of 0.125A is the most optimal.

**Keywords:** Battery charging efficiency; Battery charging time; Constant current; Lithium-ion battery; Multi-stage charging

#### Abstrak

Kebutuhan terhadap sistem baterai berperforma tinggi pada perangkat-perangkat elektronik sampai kendaraan listrik mendorong pengembangan metode pengisian baterai yang lebih cepat, efisien, dan aman. Metode konvensional *constant current-constant voltage* untuk mengisi baterai seperti lithium-ion masih banyak digunakan karena mudah diimplementasikan, tetapi memiliki keterbatasan dalam kecepatan pengisian dan adanya potensi degradasi baterai akibat arus awal pengisian yang tinggi dan tegangan yang berlebih menjelang akhir pengisian. Makalah ini menyajikan rancangan pengisi baterai lithium-ion yang baru dan berbeda dari yang lain berbasis arus konstan lima tahap yang ditujukan untuk mempercepat waktu pengisian dan meningkatkan efisiensi pengisian. Transisi antar tahap ditentukan berdasarkan tegangan *cut-off*. Nilai arus tahap pertama dan kelima ditentukan, sedangkan nilai arus tahap kedua, ketiga, dan keempat diperoleh dari perhitungan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pengisi baterai dengan metode pengisian arus konstan lima tahap yang direalisasikan mampu mengisi baterai lithium-ion dengan efisiensi pengisian rata-rata 90,4% setara dengan pengisi baterai yang menggunakan metode *constant current-constant voltage* rata-rata sebesar 90,2%, tetapi dengan waktu pengisian yang lebih singkat hampir setengah kalinya, yaitu rata-rata 2650,6 detik untuk metode pengisian arus konstan lima tahap dan rata-rata 4480,9 detik untuk metode *constant current-constant voltage*. Untuk baterai lithium-ion yang digunakan dalam pengujian, pengisian baterai menggunakan arus pengisian tahap satu 2,6A dan tahap lima 0,125A adalah yang paling optimal.



**REALISASI METODE PENGISIAN ARUS KONSTAN LIMA TAHAP UNTUK PENGISI BATERAI LI-ION**

**Kata Kunci:** Arus konstan; Baterai lithium-ion; Efisiensi pengisian baterai; Pengisian multi-tahap; Waktu pengisian baterai

## **PENDAHULUAN**

Dewasa ini kebutuhan akan pengisi baterai yang dapat mengisi baterai dengan cepat, aman dan efisien semakin meningkat, mulai dari perangkat elektronik sampai kendaraan listrik. Metode konvensional *Constant Current–Constant Voltage* (CC–CV) untuk mengisi baterai seperti Li-ion masih dominan [1], karena mudah diimplementasikan dan biaya pembuatannya terjangkau, namun memiliki keterbatasan dalam kecepatan pengisian dan potensi degradasi baterai akibat arus awal yang tinggi dan *over-voltage* menjelang akhir pengisian [2,3]. Arus pengisian yang tinggi dapat mengakibatkan turunnya efisiensi pengisian karena terjadi *joule heating* pada akhir tahap *constant current* [4]. Untuk mengurangi *joule heating*, arus pengisian pada tahap CC biasanya digunakan sebesar 0,5 kali *C-rate* dengan *C-rate* adalah laju pengisian atau pembuangan energi baterai sampai penuh atau kosong dalam waktu 1 jam [5].

Sebagai alternatif, metode pengisian arus konstan multitahap (MPAKM) telah berkembang dengan cepat sebagai solusi untuk mempercepat pengisian, mengurangi panas, serta memperpanjang umur siklus baterai [6-9]. Metode ini membagi proses pengisian ke dalam beberapa tahapan arus konstan yang progresif menurun [9]. Untuk mengimplementasikan MPAKM terdapat tiga hal yang penting, yaitu banyaknya tahapan, kriteria transisi dari satu tahap ke tahap berikutnya, dan besarnya arus konstan pengisian tiap tahap [10].

Dung dan Yen [11] menunjukkan bahwa ketika jumlah tahap diubah dari satu tahap sampai lima tahap, waktu pengisian turun secara signifikan, tetapi untuk jumlah tahap lebih dari lima penurunan waktu pengisian tidak signifikan. Pengisian arus konstan lima tahap sebagai konfigurasi MPAKM sering dipilih dalam banyak penelitian karena keseimbangan optimal antara efisiensi pengisian dan kompleksitas sistem [12].

Untuk kriteria transisi dari satu tahap ke tahap berikutnya, dapat diterapkan minimal empat kriteria transisi yang berbeda, yaitu transisi berbasis waktu [3], transisi berbasis tegangan *cut-off* [7], transisi berbasis *state of charge* [6], dan transisi berbasis tegangan threshold [8]. Kriteria transisi yang banyak digunakan oleh para peneliti adalah transisi berbasis *state of charge* dan transisi berbasis tegangan *cut-off*.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan pengisi baterai lima tahap berbasis arus konstan untuk baterai Li-ion serta mengidentifikasi nilai arus optimum untuk memperoleh waktu pengisian minimum dan efisiensi pengisian maksimum. Kebaruan dan kontribusi dari penelitian ini adalah pada rancangan sistem pengisi baterai dengan metode pengisian arus konstan multitahap untuk baterai Li-ion. Pengisi baterai multitahap yang dirancang dan direalisasi terdiri dari lima tahap dengan kriteria pentahapan adalah transisi berbasis tegangan *cut-off*. Perancangan meliputi desain sistem, kontrol pergantian tahap pengisian, dan evaluasi efisiensi dan waktu pengisian baterai.

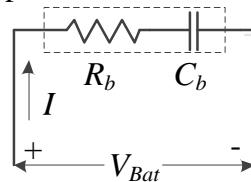
Artikel ini mengulas implementasi pengisi baterai dengan metode pengisian arus konstan lima tahap dan investigasi besarnya arus konstan pengisian tiap tahap yang akan menghasilkan waktu pengisian dan efisiensi pengisian yang optimal pada pengisi arus konstan lima tahap untuk baterai Li-ion secara eksperimen. Dua *pack* baterai Li-ion masing-masing terdiri dari enam buah baterai 18650 2600 mAh yang dihubungkan secara

seri digunakan untuk menguji pengisi baterai arus konstan lima tahap yang direalisasikan. Hasilnya dibandingkan dengan pengisi baterai menggunakan metode CC-CV. Dari hasil pengujian, pengisi baterai yang direalisasikan dapat mengisi baterai dengan efisiensi pengisian sampai 90% setara dengan pengisi baterai menggunakan metode CC-CV, tetapi dengan waktu pengisian yang lebih singkat.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Metode Pengisian Arus Konstan Multitahap

Konsep dari pengisian baterai dengan metode pengisian arus konstan multistep (MPAKM) adalah pengisian baterai dengan menurunkan atau menaikkan nilai arus pengisian secara bertahap [4]. Dalam artikel ini, pengisian baterai dilakukan dengan penurunan nilai arus secara bertahap, sebanyak lima tahap. Untuk mencari pola pengisian optimal dari MPAKM, baterai lithium-ion dapat dimodelkan dengan rangkaian R-C sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 [13].



Gambar 1. Rangkaian ekivalen (model) dari baterai Li-ion

$R_b$  dan  $C_b$  pada Gambar 1 menunjukkan total hambatan dan total kapasitansi dari baterai lithium-ion. Ketika arus  $I$  mengalir ke baterai, tegangan  $V_{Bat}$  dapat diperoleh seperti berikut:

$$V_{Bat} = V_{C_b} + V_{R_b} \quad (1)$$

Sedangkan untuk  $V_{C_{eq}}$  dan  $V_{R_{eq}}$  diperoleh sebagai berikut:

$$V_{C_b} = (I \times \Delta t)/C_b + V_{awal} \quad (2)$$

$$V_{R_b} = I \times R_b \quad (3)$$

$V_{awal}$  menunjukkan nilai tegangan awal pada  $C_b$ . Dengan mensubstitusikan Persamaan (2) dan Persamaan (3) pada Persamaan (1) didapat Persamaan (4).

$$V_{Bat} = (I \times \Delta t)/C_b + V_{awal} + I \times R_b \quad (4)$$

Dari Persamaan (4) dapat diperoleh Persamaan (5) yang menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mencapai  $V_{Bat\_maks}$  dari kondisi awal.  $V_{Bat\_maks}$  atau  $V_{cut-off}$  merupakan tegangan maksimal pada baterai pada saat pengisian.

$$\Delta t = (V_{Bat\_maks} - V_{awal} - IR_b)C_b/I \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan waktu pengisian dari satu nilai arus untuk satu tahap, sedangkan pada MPAKM digunakan 5 tahap pengisian dengan besar arus pengisian masing-masing, maka waktu total pengisian untuk 5 tahap dapat dinyatakan dengan Persamaan (6).

$$T = \sum_{n=1}^5 \Delta t_n \quad (6)$$

dengan

$$\Delta t_n = (V_{Bat\_maks} - V_{awal,n} - I_n R_b)C_b/I_n \quad (7)$$

$$V_{awal,n} = V_{Bat\_maks} - I_{n-1} R_b, \quad n = 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

Pada Persamaan (6) hingga Persamaan (8),  $n$  menunjukkan tahap pada MPAKM, sedangkan  $V_{awal,n}$  menunjukkan nilai tegangan awal pada  $C_b$  pada tiap tahap yang baru. Kemudian, untuk  $V_{awal,1}$  didapat dari tegangan awal yang diukur pada baterai.

REALISASI METODE PENGISIAN ARUS KONSTAN LIMA TAHAP UNTUK PENGISI BATERAI  
 LI-ION

Untuk menghitung total waktu pengisian baterai dengan MPAKM dapat dilihat pada Persamaan (9) dan Persamaan (10). Persamaan (9) dan Persamaan (10) ini merupakan penjabaran dari Persamaan (6) sampai dengan Persamaan (8).

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 \quad (9)$$

$$T = \begin{cases} (V_{Bat\_maks} - V_{awal,1} - I_1 R_b) C_b / I_1 + (I_1 - I_2) R_b C_b / I_2 \\ + (I_2 - I_3) R_b C_b / I_3 + (I_3 - I_4) R_b C_b / I_4 \\ + (I_4 - I_5) R_b C_b / I_5 \end{cases} \quad (10)$$

Untuk mencari nilai arus  $I_3$ , lakukan diferensiasi Persamaan (10) terhadap  $I_3$ , sehingga diperoleh ekspresi berikut:

$$dT/dI_3 = 0 + 0 - I_2 R_b C_b / I_3^2 + R_b C_b / I_4 + 0 \quad (11)$$

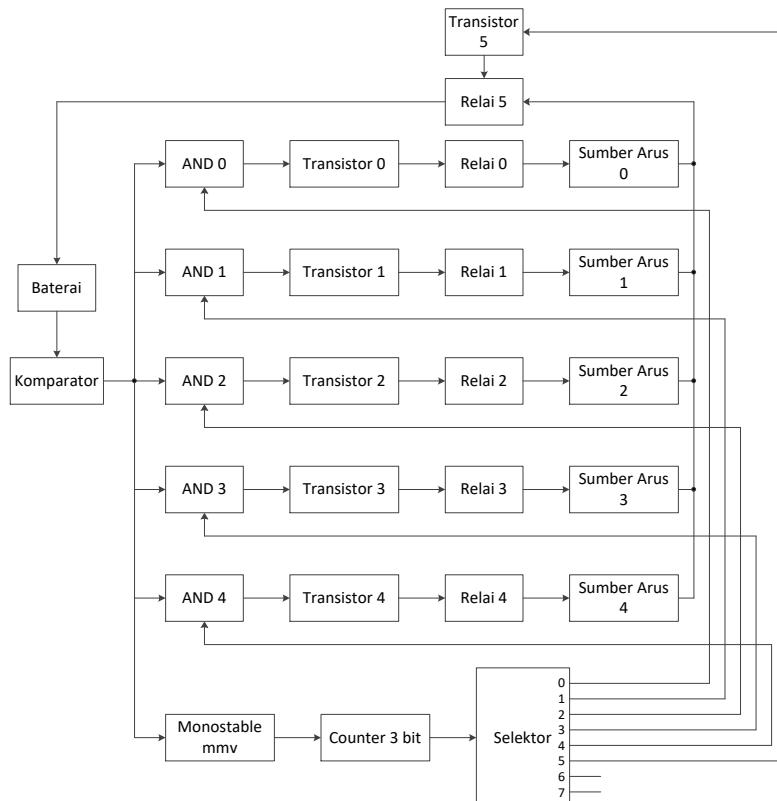
maka

$$I_3 = \sqrt{I_2 I_4} \quad (12)$$

Untuk mendapatkan arus  $I_2$  dan  $I_4$  dapat digunakan cara yang sama seperti mencari  $I_3$ . Jadi  $I_2 = \sqrt{I_1 I_3}$  dan  $I_4 = \sqrt{I_3 I_5}$ . Kemudian, persamaan  $I_2$  dan  $I_4$  disubstitusikan ke Persamaan (12), sehingga diperoleh persamaan  $I_3$  yang baru.

$$I_3 = \sqrt{I_1 I_5} \quad (13)$$

Pada Persamaan (13), nilai  $I_1$  dan  $I_5$  harus ditentukan terlebih dahulu untuk mendapatkan  $I_3$ .



Gambar 2. Diagram blok pengisi baterai metode arus konstan lima tahap

### Perangkat Pengisi Baterai

Diagram blok perangkat pengisi baterai yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 2. Secara garis besar prinsip kerja dari pengisi baterai arus konstan multitahap yang dirancang adalah sebagai berikut:

- Kondisi awal saat rangkaian pengisi dinyalakan, keluaran Counter 3 bit adalah ‘000’, hanya terminal 0 Selektor akan HIGH, terminal lain (1-7) akan LOW, Transistor 5 OFF, Relai 5 OFF, keluaran Sumber arus 0-4 terhubung pada Baterai melalui kontak *normally-close* Relai 5. Keluaran Komparator akan HIGH karena tegangan Baterai kurang dari  $V_{Bat\_maks}$ , sehingga tidak ada sinyal pemicu pada *Monostable multivibrator* dan keluaran Counter tetap ‘000’.
- Selektor 0 dan keluaran Komparator HIGH, maka keluaran AND 0 akan HIGH, Transistor 0 ON, Relai 0 akan ON dan Sumber arus 0 akan ON. Sumber arus 0 yang ON akan menghasilkan arus sebesar  $I_1$  untuk mengisi Baterai melalui Relai 5 hingga tegangan Baterai mencapai  $V_{Bat\_maks}$ .
- Jika tegangan Baterai telah mencapai  $V_{Bat\_maks}$  maka keluaran Komparator akan berubah dari HIGH menjadi LOW yang akan memicu *Monostable multivibrator* menghasilkan satu pulsa, Counter berubah dari ‘000’ menjadi ‘001’, sehingga sekarang terminal 1 Selektor yang HIGH, terminal 0 menjadi LOW, keluaran AND 0 LOW, Transistor 0 OFF, Relai 0 OFF, Sumber arus 0 OFF, sehingga tegangan Baterai akan turun minimal sebesar  $I_1 R_b$  dari  $V_{Bat\_maks}$ . Akibatnya keluaran Komparator kembali menjadi HIGH dan AND 1 akan HIGH karena terminal 0 Selektor HIGH, Transistor 1 ON, Relai 1 ON, Sumber arus 1 ON menghasilkan arus sebesar  $I_2$  untuk mengisi Baterai melalui Relai 5 hingga tegangan Baterai mencapai  $V_{Bat\_maks}$ .
- Proses di atas akan terus berulang sampai Counter berubah menjadi ‘101’, terminal 5 Selektor akan HIGH, maka Transistor 5 dan Relai 5 akan ON, sehingga koneksi Sumber arus dengan Baterai melalui Relai 5 terputus, proses pengisian Baterai akan berhenti/selesai.

## HASIL DAN DISKUSI

Uji coba pengisi baterai dilakukan pada dua buah *battery pack*, yaitu baterai A dan baterai B yang masing-masing terdiri dari 6 buah baterai lithium-ion 18650 2600 mAh yang dihubungkan secara seri. Prosedur pengujian yang dilakukan adalah kedua baterai diisi oleh pengisi baterai yang direalisasikan untuk besarnya arus  $I_1$  dan  $I_5$  tertentu. Besarnya arus pengisian, waktu pengisian, dan tegangan awal baterai untuk setiap tahap pengisian diukur dan dicatat. Kemudian baterai yang sudah diisi, dibuang muatannya melalui beban berupa 3 lampu DC 12V 7W yang dihubungkan secara seri. Besarnya arus yang mengalir lewat lampu dan lamanya diukur dan dicatat untuk mengetahui berapa besar muatan yang sudah terbuang. Pengujian pengisian baterai lima tahap dilakukan untuk 5 macam nilai  $I_1$  dan  $I_5$  seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian pengisian baterai A dan B menggunakan 5 macam nilai arus  $I_1$  dan  $I_5$

$I_1$ (A)	$I_5$ (A)	$I_3 = \sqrt{I_1 I_5}$ (A)	$I_2 = \sqrt{I_1 I_3}$ (A)	$I_4 = \sqrt{I_3 I_5}$ (A)
2,6	0,25	0,81	1,45	0,45
2,6	0,125	0,57	1,22	0,27
2,6	0,5	1,14	1,72	0,75
4,0	0,25	1,0	2,0	0,5
1,5	0,25	0,61	0,92	0,39

Tabel 2 menunjukkan data hasil percobaan ke-1 pengisian baterai A menggunakan metode pengisian arus konstan lima tahap untuk nilai arus  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$ .

**REALISASI METODE PENGISIAN ARUS KONSTAN LIMA TAHAP UNTUK PENGISI BATERAI LI-ION**

Percobaan dilakukan sebanyak lima kali dan rangkuman hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil pengisian baterai A dengan metode pengisian arus konstan lima tahap untuk arus  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$

Percobaan ke-	Tahap ke-	Arus Pengisian $I_n$ (A)	Waktu Pengisian (detik)	Waktu Pengisian Total (detik)	Tegangan Awal Per Tahap (V)	Tegangan Akhir Tanpa Beban (V)
1	1	2,53	1431	2437	22,19	
	2	1,42	217		25,05	
	3	0,79	208		25,10	25,13
	4	0,42	273		25,11	
	5	0,21	308		25,12	

Baterai A yang sudah diisi dengan nilai arus pengisian  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$ , kemudian dibuang muatannya melalui beban berupa tiga buah lampu DC 12V 7W yang dipasang seri. Muatan listrik baterai dianggap habis jika arus yang dikeluarkan oleh baterai turun drastis secara mendadak. Karena nilai arus yang dikeluarkan oleh baterai cenderung konstan, maka nilai arus dicatat setiap 300 detik hingga muatan baterai dianggap habis.

Efisiensi pengisian baterai adalah kemampuan pengisi untuk mengisi energi atau muatan pada baterai. Semakin tinggi efisiensi pengisian berarti semakin banyak jumlah muatan yang dapat diisi ke dalam baterai. Efisiensi pengisian baterai dihitung sebagai perbandingan  $Q_{keluar}$  terhadap  $Q_{masuk}$  yang diekspresikan dengan Persamaan (14) [10,11].

$$\text{Efisiensi pengisian } (\eta) = \frac{Q_{keluar}}{Q_{masuk}} \times 100\% \quad (14)$$

dengan  $Q_{masuk} = \sum_{n=1}^5 I_n \times T_n$ ,  $Q_{keluar} = \sum_{n=1}^m I_n \times T_n$ ,  $m$  adalah banyaknya nilai arus yang ada pada masing-masing percobaan saat pembuangan muatan baterai,  $Q_{masuk}$  adalah jumlah muatan listrik yang diisi ke dalam baterai (ampere detik),  $Q_{keluar}$  adalah jumlah muatan baterai yang dibuang/terpakai (ampere detik),  $I_n$  adalah arus pengisian atau pembuangan ke- $n$  (ampere), dan  $T_n$  adalah waktu pembuangan atau pengisian ke- $n$  (detik).

Waktu pengisian dan hasil perhitungan efisiensi pengisian baterai A untuk nilai arus pengisian  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$  dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan efisiensi dan waktu pengisian baterai A untuk nilai arus pengisian  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$

Percobaan ke-	$Q_{masuk}$	$Q_{keluar}$	Effisiensi (%)	Waktu (detik)
1	4272,23	3688,65	86,34	2437
2	4400,29	3629,16	82,47	2548
3	4218,30	3776,02	89,51	2456
4	4398,35	3561,51	80,97	2578
5	4345,03	3522,28	81,06	2516
<b>Rata-rata</b>			<b>84,06</b>	<b>2507</b>

Pengujian pengisian baterai metode arus konstan lima tahap dilakukan sesuai dengan variasi arus pengisian  $I_1$  dan  $I_5$  pada Tabel 1. Dengan prosedur yang sama seperti untuk arus pengisian  $I_1 = 2,6\text{A}$  dan  $I_5 = 0,25\text{A}$ , diperoleh hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan efisiensi dan waktu pengisian baterai A untuk nilai arus pengisian yang lain

Percobaan ke-	$I_1 = 2,6\text{A}$ dan $I_5 = 0,125\text{A}$		$I_1 = 2,6\text{A}$ dan $I_5 = 0,5\text{A}$		$I_1 = 4,0\text{A}$ dan $I_5 = 0,25\text{A}$		$I_1 = 1,5\text{A}$ dan $I_5 = 0,25\text{A}$	
	Efisiensi (%)	Waktu (detik)	Efisiensi (%)	Waktu (detik)	Efisiensi (%)	Waktu (detik)	Efisiensi (%)	Waktu (detik)
1	90,33	2679	66,17	2501	52,31	2381	91,26	3247
2	90,65	2716	75,24	2587	56,61	2310	85,81	3305
3	91,87	2718	74,47	2506	53,05	2392	88,00	3562
4	92,78	2697	58,24	2504	60,71	2245	89,02	3481
5	87,16	2623	60,52	2553	54,96	2383	94,40	3426
<b>Rata-rata</b>	<b>90,56</b>	<b>2686,6</b>	<b>66,93</b>	<b>2530,2</b>	<b>55,53</b>	<b>2342,2</b>	<b>89,70</b>	<b>3404,2</b>

Untuk mengetahui bagaimana kinerja pengisian baterai metode arus konstan lima tahap yang direalisasikan, maka dilakukan perbandingan dengan pengisian baterai metode lain yang umum digunakan yaitu metode *Constant Current-Constant Voltage* (CC-CV). Jadi pada baterai yang sama dilakukan pengujian pengisian baterai menggunakan pengisian baterai dengan metode CC-CV. Pada pengisian baterai metode CC-CV yang digunakan, terdapat lampu indikator untuk menunjukkan status pengisian yaitu berada pada tahap *constant current*, *constant voltage*, atau baterai sudah terisi penuh. Pada tahap *constant voltage* nilai arus pengisian berubah mengecil terhadap waktu, maka nilai arus pada tahap *constant voltage* diambil setiap 60 detik. Tabel 5 menunjukkan hasil pengisian baterai A menggunakan metode CC-CV.

Tabel 5. Hasil pengisian baterai A dengan metode CC-CV

Percobaan ke-	Tegangan	Arus	Arus	Tegangan	Waktu	Waktu	Waktu
	Awal Baterai	Pengisian Tahap	Pengisian Akhir	Akhir Baterai	Pengisian Tahap	Pengisian Tahap	Total Pengisian
	Tanpa Beban (V)	Constant Current	Constant Voltage	Tanpa Beban	Constant Current	Constant Voltage	(detik)
	(A)	(A)	(A)	(V)	(detik)	(detik)	
1	22,17	1,35	0,41	25,20	2592	1914	4506
2	22,18	1,32	0,28	25,19	2386	1638	4024
3	22,18	1,31	0,39	25,21	2851	1868	4719
4	22,19	1,29	0,41	25,21	2401	1965	4366
5	22,18	1,34	0,38	25,18	2914	2057	4971

Tabel 6. Waktu pengisian dan hasil perhitungan efisiensi pengisian baterai A menggunakan metode CC-CV

Percobaan ke-	$Q_{masuk}$	$Q_{keluar}$	Efisiensi (%)	Waktu (detik)
1	5188,74	4617,57	88,99	4506
2	4439,76	4160,85	93,72	4024
3	5331,53	4695,60	88,07	4719
4	4834,74	4454,40	92,13	4366
5	5720,22	5143,92	89,93	4971

<b>Rata-rata</b>	<b>90,57</b>	<b>4517,2</b>
------------------	--------------	---------------

Prosedur pembuangan muatan baterai yang sudah diisi dengan pengisi baterai metode CC-CV sama dengan prosedur pembuangan muatan baterai yang diisi dengan pengisi baterai metode arus konstan lima tahap.

Perhitungan efisiensi pengisian muatan baterai untuk metode CC-CV digunakan persamaan yang sama, yaitu Persamaan (14), yang berbeda hanya cara menghitung jumlah muatan yang diisi ke dalam baterai yaitu  $Q_{masuk} = (I \times T)_{constant\_current} + (\sum_{n=1}^N I_n \times T_n)_{constant\_voltage}$ . Waktu pengisian dan hasil perhitungan efisiensi pengisian baterai A menggunakan metode CC-CV dapat dilihat pada Tabel 6.

Pengujian yang sama dilakukan terhadap baterai B. Rangkuman dari hasil pengujian untuk baterai A dan baterai B ditunjukkan pada Tabel 7

Tabel 7. Rata-rata waktu pengisian dan efisiensi pengisian baterai

Baterai	Rata-rata	Metode Pengisian					CC-CV	
		Arus Konstan Lima Tahap						
		$I_1 = 2,6A$ dan $I_5 = 0,25A$	$I_1 = 2,6A$ dan $I_5 = 0,125A$	$I_1 = 2,6A$ dan $I_5 = 0,5A$	$I_1 = 4A$ dan $I_5 = 0,25A$	$I_1 = 1,5A$ dan $I_5 = 0,25A$		
A	Waktu Pengisian (detik)	2507	2686,6	2530,2	2342,2	3404,2	4517,2	
	Efisiensi Pengisian (%)	84,07	90,56	66,93	55,53	89,70	90,57	
B	Waktu Pengisian (detik)	2519,6	2614,6	2502,6	2308,6	3279,4	4444,6	
	Efisiensi Pengisian (%)	85,88	90,23	75,07	58,05	91,06	89,8	

Pada Tabel 7, terlihat bahwa rata-rata waktu pengisian baterai A maupun baterai B dengan metode pengisian arus konstan lima tahap menggunakan nilai arus pengisian  $I_1 = 4A$  dan  $I_5 = 0,25A$  lebih singkat daripada menggunakan nilai arus pengisian lainnya maupun metode pengisian CC-CV, tetapi efisiensi pengisianya paling rendah (kurang dari 60%) daripada nilai arus pengisian lainnya dan metode CC-CV. Hal ini terjadi karena arus pengisian yang terlalu tinggi menyebabkan terjadinya *joule heating*. Proses *joule heating* membuat suhu baterai meningkat pada saat pengisian karena adanya daya yang terdisipasi berupa panas sebesar  $I^2R$  ( $I$  merupakan arus pengisian dan  $R$  merupakan tahanan dalam baterai) [14,15]. Daya sebesar  $I^2R$  ini hilang berupa panas (tidak disimpan ke dalam baterai), sehingga energi atau daya yang masuk ke dalam baterai lebih rendah. Semakin tinggi arus pengisianya, maka semakin besar daya yang terbuang berupa panas, suhu baterai meningkat, resistansi baterai bertambah tinggi, maka daya ( $I^2R$ ) yang terbuang bertambah tinggi juga (terjadi akumulasi daya yang terbuang), daya yang masuk ke dalam baterai makin rendah, sehingga efisiensi pengisian makin rendah. Jadi dari hasil pengujian pada Tabel 7, dapat dilihat bahwa pengisian baterai dengan metode pengisian arus konstan lima tahap menghasilkan efisiensi pengisian paling tinggi (90,56% untuk

baterai A dan 90,23% untuk baterai B, rata-rata 90,4%) jika menggunakan nilai arus  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,125A$ . Bila dibandingkan dengan metode pengisian CC-CV (90,57% untuk baterai A dan 89,8% untuk baterai B, rata-rata 90,2%), efisiensi pengisianya dapat dikatakan setara, tetapi waktu pengisian untuk metode CC-CV (4517,2 detik untuk baterai A dan 4444,6 detik untuk baterai B, rata-rata 4480,9 detik) hampir dua kali waktu pengisian metode pengisian arus konstan lima tahap baik untuk baterai A maupun baterai B (2686,6 detik untuk baterai A dan 2614,6 detik untuk baterai B, rata-rata 2650,6 detik). Hal ini disebabkan karena arus pengisian pada metode CC-CV lebih rendah daripada metode pengisian arus konstan lima tahap, terutama pada tahap *constant current*.

Dari Tabel 7 dapat dilihat bahwa terdapat dua pasang nilai arus pengisian pada metode pengisian arus konstan lima tahap yang menghasilkan efisiensi pengisian dan waktu pengisian yang hampir sama baik untuk baterai A maupun baterai B, yaitu untuk nilai arus pengisian  $I_1 = 2,6A$ ,  $I_5 = 0,25A$  dan  $I_1 = 2,6A$ ,  $I_5 = 0,125A$ . Untuk baterai A dan baterai B, dengan  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,125A$  diperoleh rata-rata waktu pengisian  $0,5 \times (2686,6 + 2614,6) = 2650,6$  detik dan rata efisiensi pengisian  $0,5 \times (90,56 + 90,23) = 90,4\%$ , sedangkan dengan  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,25A$  diperoleh rata-rata waktu pengisian  $0,5 \times (2507 + 2519,6) = 2513,3$  detik dan rata-rata efisiensi pengisian  $0,5 \times (84,07 + 85,88) = 84,98\%$ . Penggunaan arus pengisian  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,25A$  menghasilkan arus pengisian tiap tahap lebih besar (lihat Tabel 1) daripada penggunaan arus pengisian  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,125A$ , sehingga rata-rata waktu pengisian lebih singkat, tetapi rata-rata efisiensi pengisian lebih rendah. Rata-rata waktu pengisian untuk arus pengisian  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,125A$  lebih lama 137,3 detik dibandingkan arus pengisian  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,25A$ , tetapi menghasilkan peningkatan efisiensi pengisian 5,42%. Jadi dengan hanya perlu tambahan rata-rata waktu pengisian 137,3 detik (sekitar 2 menit lebih) untuk mendapatkan tambahan rata-rata efisiensi pengisian 5,42%, maka pengisian baterai menggunakan arus pengisian  $I_1 = 2,6A$  dan  $I_5 = 0,125A$  lebih menjadi pilihan, karena lebih optimal.

## KESIMPULAN

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diperoleh bahwa pengisi baterai dengan metode pengisian arus konstan lima tahap yang direalisasikan dapat berfungsi dengan baik dan dapat mengisi baterai jenis lithium-ion. Dari hasil pengujian, diperoleh rata-rata waktu pengisian dan rata-rata efisiensi pengisian baterai tergantung pada nilai arus pengisian masing-masing tahap. Semakin tinggi arus pengisian masing-masing tahap, akan mempercepat waktu pengisian, tetapi efisiensi pengisian semakin rendah. Dari hasil pengujian, pengisi baterai yang direalisasikan dapat mengisi baterai dengan efisiensi pengisian sampai 90% setara dengan pengisi baterai menggunakan metode *constant current-constant voltage*, tetapi dengan waktu pengisian yang lebih singkat, hampir setengah kalinya. Untuk baterai yang digunakan dalam pengujian, pengisian baterai menggunakan arus pengisian tahap satu 2,6A dan tahap lima 0,125A adalah yang paling optimal. Keterbatasan dari penelitian ini adalah belum dapat diketahui apakah pengisi baterai yang direalisasi ini dapat berfungsi sama baiknya untuk jenis-jenis baterai yang lain, karena pengisi baterai ini dirancang untuk baterai Li-ion dan baru diuji untuk baterai Li-ion. Hal ini dapat menjadi bahan penelitian lanjutan untuk merancang pengisi baterai yang lebih umum yang dapat digunakan untuk beberapa jenis baterai.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Kristen Maranatha atas dukungan dana dalam penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] X. Huang, W. Liu, A. B. Acharya, J. Meng, R. Teodorescu, and D. I. Stroe, "Effect of Pulsed Current on Charging Performance of Lithium-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 10, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3121726.
- [2] P. Mohtat, S. Pannala, V. Sulzer, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, "An Algorithmic Safety VEST For Li-ion Batteries During Fast Charging," in *IFAC-PapersOnLine*, 2021. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.11.225.
- [3] F. An, R. Zhang, Z. Wei, and P. Li, "Multi-stage constant-current charging protocol for a high-energy-density pouch cell based on a 622NCM/graphite system," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 37, 2019, doi: 10.1039/c9ra03629f.
- [4] D. Anseán, V. M. García, M. González, J. C. Viera, J. C. Antón, and C. Blanco, "Efficient fast-charging strategies for Li-ion batteries," in *28th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015, EVS 2015*, 2015.
- [5] Y. H. Liu and Y. F. Luo, "Search for an optimal rapid-charging pattern for li-ion batteries using the Taguchi approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2036020.
- [6] D. Ji *et al.*, "Research on adaptability of charging strategy for electric vehicle power battery," *J. Power Sources*, vol. 437, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.226911.
- [7] G. J. Chen, Y. H. Liu, S. C. Wang, Y. F. Luo, and Z. Z. Yang, "Searching for the optimal current pattern based on grey wolf optimizer and equivalent circuit model of Li-ion batteries," *J. Energy Storage*, vol. 33, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101933.
- [8] R. Mathieu, O. Briat, P. Gyan, and J. M. Vinassa, "Fast charging for electric vehicles applications: Numerical optimization of a multi-stage charging protocol for lithium-ion battery and impact on cycle life," *J. Energy Storage*, vol. 40, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102756.
- [9] M. Usman Tahir, A. Sangwongwanich, D. I. Stroe, and F. Blaabjerg, "Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 84, 2023. doi: 10.1016/j.jechem.2023.05.023.
- [10] M. U. Tahir, A. Sangwongwanich, D. I. Stroe, and F. Blaabjerg, "The Effect of Multi-Stage Constant Current Charging on Lithium-ion Battery's Performance," in *CPE-POWERENG 2023 - 17th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, 2023. doi: 10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227383.
- [11] L. R. Dung and J. H. Yen, "ILP-based algorithm for lithium-ion battery charging profile," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637639.
- [12] S. C. Wang and Z. Y. Zhang, "Research on Optimum Charging Current Profile with Multi-Stage Constant Current Based on Bio-Inspired Optimization Algorithms for Lithium-Ion Batteries †," *Energies*, vol. 16, no. 22, 2023, doi: 10.3390/en16227641.

- [13] A. B. Khan and W. Choi, "Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 3, 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2801381.
- [14] J. Chen and Y. Zhou, "Minimum Joule heating dissipated in the charging process of a rechargeable battery," *Energy*, vol. 26, no. 6, 2001, doi: 10.1016/S0360-5442(01)00016-0.
- [15] R. Li, X. Wei, H. Sun, H. Sun, and X. Zhang, "Fast Charging Optimization for Lithium-Ion Batteries Based on Improved Electro-Thermal Coupling Model," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197038.