

Penentuan Lokasi dan Kapasitas *Energy Storage* Optimal dengan Mempertimbangkan Pelepasan Beban

Muhammad V. Hamza, Rony S. Wibowo, dan Ni K. Aryani

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

e-mail: 2216100154@mahasiswa.integra.its.ac.id

Abstrak— Sumber energi terbarukan merupakan salah satu sumber energi yang paling marak di sistem distribusi. Namun energi terbarukan memiliki karakteristik *intermittent* atau tidak dapat menghasilkan energi yang tetap setiap saat. Sehingga dibutuhkan *energy storage* untuk mengatasi kehilangan suplai energi. Selain sebagai solusi dari sifat *intermittent*, sistem *energy storage* (ES) dapat menjadi penopang daya pada sistem saat terjadi ketidakseimbangan daya. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk menentukan lokasi serta kapasitas ES optimal sebagai penyokong daya sistem yang dapat meminimalisir biaya pembangkitan dan pelepasan beban. Digunakan metode *differential evolution algorithm* (DE) sebagai optimasi utama serta *dynamic DC optimal power flow* (DDCOPF) sebagai sub-optimasi pada sistem IEEE 30 bus.

Kata Kunci—DDCOPF, *Differential Evolution*, *Energy Storage*, IEEE 30 Bus, *Intermittent*

I. PENDAHULUAN

Sistem ketenagalistrikan adalah sistem yang mengalirkan listrik dari pembangkitan menuju ke beban. Komposisi unit pembangkit tersebut semestinya diatur sedemikian rupa sehingga terjadi keseimbangan antara demand (kebutuhan beban) pada pusat - pusat beban dengan daya yang diproduksi oleh power plant (pusat pembangkit). Komposisi tersebut memiliki variasi yang beragam dan menghasilkan biaya yang berbeda-beda. Pada keadaan dimana keseimbangan daya tidak bisa terjaga, dilakukan pelepasan beban-beban tertentu untuk mengembalikan sistem ke keadaan seimbang (power balance).

Energy storage (ES) dapat menyimpan energi listrik yang dibangkitkan oleh sumber energi terbarukan sekaligus menyalurkan energi listrik ke beban tanpa menggunakan biaya bahan bakar. Hal ini menyebabkan ES menjadi solusi untuk meminimalisir biaya pembangkitan dan sebagai penyeimbang daya pada sistem.

Dengan adanya potensi penurunan biaya operasi serta pelepasan beban, dilakukan optimasi kapasitas serta peletakan ES dengan mempertimbangkan batasan-batasan yang ada pada sistem. ES dapat dioptimasi dengan metode-metode diantaranya *dynamic programming*, *linear programming*, *mixed-integer linear programming*. Pada penelitian ini, digunakan metode *metaheuristic* yaitu *differential evolution algorithm* (DE).

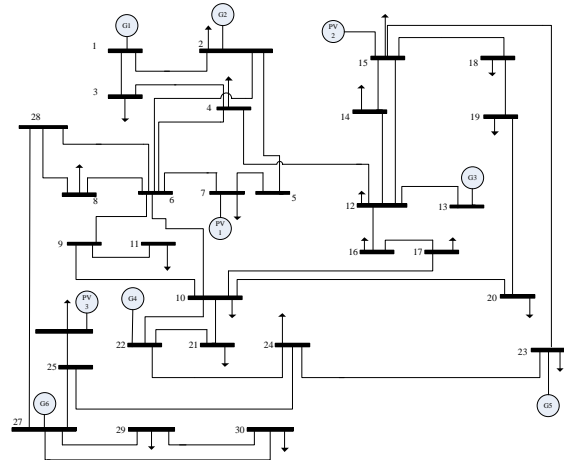
A. *Energy Storage*

Pada sistem tenaga listrik. Tidak semua pembangkit dapat memenuhi respon beban dalam hitungan jam. Hal ini dikarenakan karakteristik pembangkit termis yang memiliki

ramp rate atau laju kenaikan daya. Pembangkit termis dengan *ramp rate* tercepat merupakan pembangkit gas (PLTG) namun pembangkit tersebut menggunakan bahan bakar gas yang membutuhkan biaya serta kurang ramah lingkungan. *Energy storage* (ES) dapat memenuhi kebutuhan beban dengan cepat tanpa bahan bakar ataupun emisi. Selain respon yang cepat, ES juga membantu pembangkit terbarukan seperti PLTS untuk menyimpan energi ketika matahari terik siang hari. Dan mengeluarkan energi pada waktu malam hari. Sehingga ES dapat menyelesaikan masalah *intermittent* dari pembangkit terbarukan. Dan dapat menambah kemampuan *microgrid* untuk bekerja secara *islanded*.

Beberapa jenis teknologi ES antara lain adalah *flywheel*, SMES, CAES, *lead-acid*, dan Li-ion. Dari berbagai jenis ES yang ada saat ini, Li-ion memberikan solusi terbaik untuk daya dan energi output tinggi dengan *life cycle* diatas 5000 dan biaya yang lebih murah [2].

Dalam penelitian ini, ES akan dimasukkan pada sistem IEEE 30 bus modifikasi yang memiliki konfigurasi sistem seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Sistem IEEE 30 bus yang dimodifikasi sebagai mikrogrid

Dengan peletakan pembangkit seperti pada tabel 1.

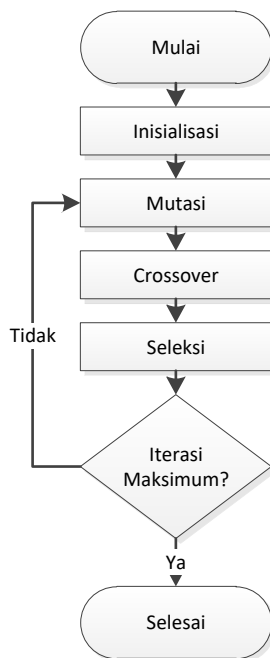
Tabel 1.
Peletakan pembangkit pada sistem IEEE 30 bus.

Bus	Pembangkit
1	Grid PLN
2	Mikroturbin 1 (MT-1)
27	Mikroturbin 2 (MT-2)
7	PV – 1

15	PV – 2
26	PV – 3
13	Diesel 1 (Die – 1)
22	Diesel 2 (Die – 2)
23	Diesel 3 (Die – 3)

II. DIFFERENTIAL EVOLUTION

Differential evolution (DE) pertama kali dipublikasikan sebagai metode optimasi *metaheuristic* yang bersifat stokastik dan bergantung pada populasi [3]. Algoritma DE termasuk didalamnya adalah mutasi dan persilangan (*crossover*) yang membantu suatu individu berubah dan memperbaiki diri. Kemudian individu-individu tersebut akan dievaluasi berdasarkan suatu batasan-batasan kinerja yang menyebabkan seleksi terhadap populasi untuk generasi selanjutnya. Algoritma DE terdapat pada gambar 2.



Gambar 2. Alur program *differential evolution* menggunakan inisialisasi dan mutasi iteratif.

Pada penelitian ini, *differential evolution* digunakan sebagai optimasi utama dengan fungsi objektif / *fitness function* biaya per-tahun. Biaya per-tahun terdiri dari biaya operasi serta biaya investasi ES per-tahun. *Fitness function* DE terdapat pada persamaan (1).

$$F(x) = Inv_{batt} + 365 * f(P)_1 \quad (1)$$

dengan,

$F(x)$ *Fitness function* (\$/tahun)
 Inv_{batt} Investasi Energy Storage (\$/tahun)
 $f(P)_1$ Biaya operasi per-hari (\$/hari)

Dikarenakan evaluasi biaya dilakukan selama per-tahun. Biaya investasi *energy storage* dibentuk menggunakan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* [4] seperti pada persamaan (2).

$$Inv_{batt} = \frac{Price_{batt}}{1000} Cap_{batt} V_{batt} \left[\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] \quad (2)$$

dengan,

Inv_{batt} biaya investasi tahunan baterai (\$/tahun)
 $Price_{batt}$ harga baterai (209 \$/kWh) [5]
 Cap_{batt} kapasitas baterai (Ah)
 V_{batt} tegangan baterai
 i suku bunga (%)
 n lama operasi baterai (tahun)

Dalam penelitian ini, parameter DE yang digunakan memiliki konfigurasi seperti pada Tabel .

Tabel 1.
Parameter DE yang digunakan

Parameter	Jumlah
Jumlah Variabel	6
Populasi	50
Iterasi	1000
β_{max}	0,80
β_{min}	0,20
Crossover Probability	0,20

III. DYNAMIC DC OPTIMAL POWER FLOW (DDCOPF) MULTI OBJEKTIF

Dalam tugas akhir ini terdapat dua optimasi yang dilakukan dengan metode berbeda. Optimasi utama diselesaikan menggunakan metode *differential evolution*. Dan optimasi kedua (yang merupakan sub-optimasi dari optimasi pertama) diselesaikan menggunakan DDCOPF multiobjektif yang diselesaikan dengan metode *weighted sum* pada persamaan (3).

$$\min\{F(P)\} = \min \left\{ \sum_{n=1}^2 w_n s_n f(P)_n \right\} \quad (3)$$

Fungsi objektif pertama ($f(P)_1$) dari sub-optimasi DDCOPF merupakan persamaan biaya operasi selama 24 jam. Biaya operasi terdiri dari biaya pembangkitan dan biaya pelepasan beban. Persamaan fungsi objektif pertama disajikan pada (4).

$$f(P)_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{gen} a_i P_{(i,t)}^2 + b_i P_{(i,t)} + c_i + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N P_{Li}^t \quad (4)$$

dengan,

$f(P)_1$ fungsi biaya operasi (\$/hari)
 $P_{(i,t)}$ pembangkitan generator-i waktu t (kW)
 a_i, b_i, c_i koefisien biaya generator-i
 P_{Li}^t pelepasan beban pada bus-i waktu t

Batasan sistem yang dipertimbangkan pada $f(P)_1$ adalah sebagai berikut:

- *Equality Constraint*
- *Active power balance*

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{INi}^t = 0$$

$$P_{IN}^t = \sum_{ij} \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j]$$

- *Inequality Constraint*

Kapasitas saluran transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij}$$

Kapasitas Pembangkit

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

Ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i$$

Persamaan (3.2) merupakan salah satu komponen yang dipakai sebagai *fitness function* pada optimasi utama (2.1). Sedangkan fungsi objektif kedua dari sub-optimasi merupakan persamaan yang dimaksud untuk mempertahankan umur baterai. Salah satu cara untuk mempertahankan umur baterai adalah dengan meminimalisir penggunaan energi baterai. Sehingga fungsi objektif kedua dari sub-optimasi DDCOPF adalah fungsi total transaksi energi baterai seperti yang tertera pada persamaan (5).

$$f(P)_2 = \sum_{j=1}^4 \sqrt{\sum_{t=1}^{24} (P_{batt-j}^t)^2} \quad (5)$$

Batasan sistem yang dipertimbangkan pada $f(P)_2$ adalah sebagai berikut:

- Kapasitas baterai

$$-P_{ch \min} \leq P_{ES} \leq P_{dch \max}$$

- *State of charge*

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}$$

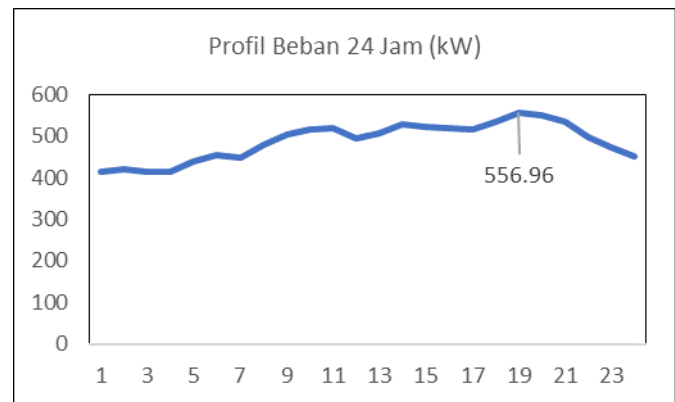
- Kapasitas Energi

$$E_{ES \min} \leq E_0 - \sum_{t=1}^T E_{ES}(t) \leq E_{ES \max}$$

IV. ANALISIS

Dalam penelitian terdapat tiga kasus yang digunakan untuk dianalisis hasilnya yaitu:

- 1) Kasus tanpa ES (**kasus 1**). Dengan kasus tanpa ES, maka hanya akan dilakukan sub-optimasi DDCOPF. Profil beban yang digunakan terdapat pada gambar 3.
- 2) Kasus ES optimal (**kasus 2**) dilakukan untuk mencari nilai kapasitas dan alokasi baterai optimal sesuai dengan sistem mikrogrid kasus 1. Pada kasus 2, dilakukan pencarian 4 kapasitas baterai dengan 2 baterai pada letak bus yang sudah ditentukan (ES-1 & ES-2) dan dengan 2 ES lain yang dicari lokasi optimalnya (ES-3 & ES-4).
- 3) Kasus *isolated* (**kasus 3**) dilakukan dengan menggunakan sistem mikrogrid dan konfigurasi baterai seperti kasus 2 (tabel 2) namun dengan menganggap grid PLN tidak memberikan suplai daya. Sehingga sistem mikrogrid hanya bekerja dengan pembangkit disel, mikroturbin, PV, dan ES.



Gambar 4. Grafik profil beban selama 24 jam.

Tabel 2.

Konfigurasi ES pada kasus 2 dan kasus 3

Bus	Energy Storage	Cap. Min (Ah)	Cap. Max (Ah)	SoC
7	Energy Storage 1 (ES - 1)	0	99999	0.8
15	Energy Storage 2 (ES - 1)	0	99999	0.8
?	Energy Storage 3 (ES - 1)	0	99999	0.8
?	Energy Storage 4 (ES - 4)	0	99999	0.8

Konfigurasi ES tersebut dihubungkan pada sistem mikrogrid yang merupakan modifikasi IEEE 30 bus yang terdiri dari pembangkit mikroturbin (tabel 3), pembangkit disel (tabel 4), dan grid PLN dengan kapasitas total sebesar 460 kW (tabel 5)

Tabel 3.

Kapasitas dan biaya pembangkitan mikroturbin

Bus	Kapasitas	Koefisien Biaya Pembangkitan		
		a	b	c
2	65	0.0425	0.12	2.13
27	30	0.049	0.08	1.2

Tabel 4.

Kapasitas dan biaya pembangkitan disel

Bus	P _{min}	P _{max}	Koefisien Biaya Pembangkitan		
			a	B	c
13	74.5	86	0.11	8	1.52
22	52	97	0.0945	3	1.71
23	56	82	0.0915	1.2	1.45

Tabel 5.
Kapabilitas total pembangkit dan grid PLN

Bus	Pembangkit	Kapasitas (kW)
1	Grid PLN	100,00
2	Mikroturbin 1 (MT-1)	65,00
27	Mikroturbin 2 (MT-2)	30,00
13	Diesel 1 (Die – 1)	86,00
22	Diesel 2 (Die – 2)	97,00
23	Diesel 3 (Die – 3)	82,00
Total Kapasitas (kW)		460,00

Selain itu terdapat 3 unit PV yang dipasang pada bus 7, 15, dan 26. Model daya keluaran menyesuaikan dengan modul sel surya yang terpasang pada Gedung AJ Teknik Elektro ITS dengan model *polycrystalline* sebanyak 8 unit 80 watt dan model *monocrystalline* sebanyak 4 unit 65 watt. Daya keluaran PV dapat dilihat pada tabel 6.

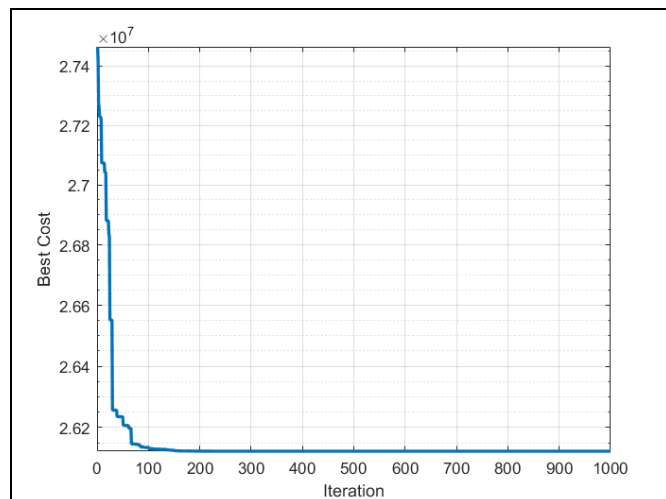
Tabel 6.
Daya keluaran per-unit panel surya

Jam	P _{out} (watt)	Jam	P _{out} (watt)	Jam	P _{out} (watt)
01	0	09	432	17	72
02	0	10	540	18	12
03	0	11	720	19	0
04	0	12	732	20	0
05	0	13	708	21	0
06	12	14	636	22	0
07	60	15	516	23	0
08	84	16	324	24	0

Rangkaian PV disusun 120 unit pada rangkaian bus 7, 100 unit pada rangkaian bus 15, 80 unit pada rangkaian bus 26.

A. Kapasitas dan Letak ES Optimal

Dari hasil pergerakan semilogi (gambar 5) didapatkan bahwa DE saturasi pada satu nilai mulai dari iterasi ke-200 pada kasus 2. Hal ini berarti DE berhasil mencari optimasi terbaik untuk kasus 2. Untuk kasus 3 hasil yang sama terjadi namun memiliki *best cost* yang berbeda yang selanjutnya akan dibahas pada bagian C.



Gambar 5. Semilogi kasus 2

Untuk kasus 2 dan kasus 3, didapatkan konfigurasi ES seperti pada tabel 7.

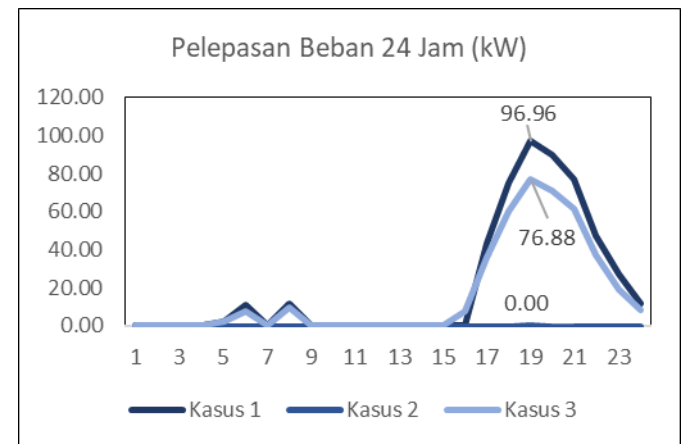
Tabel 7.
Kapasitas dan Letak ES optimal kasus 2 dan kasus 3

Energy Storage	Kasus 2		Kasus 3	
	Bus	Kapasitas	Bus	Kapasitas
ES-1	7	525,04	7	0,00
ES-2	15	14989,81	15	42279,94
ES-3	14	2748,82	14	2442,54
ES-4	12	3733,89	12	388,71

Pada ES-1 dan ES-2, dimana letak bus sudah ditentukan, didapatkan perbedaan kapasitas yang signifikan. Hal ini kemungkinan besar dikarenakan bus 15 adalah bus yang memiliki beban dan terkoneksi dengan bus lain yang memiliki beban (bus 14, 18, dan 23). Sedangkan bus 7 hanya tersambung dengan satu beban dan terkoneksi dengan bus lain yang mencabang sebagai nodal (bus 5 dan 6). Sama seperti hasil dari ES-2, ES-3 dan ES-4 yang menduduki bus 14 dan 12 memiliki letak bus dengan beban dan percabangan ke bus beban lainnya.

Berbeda dari kapasitas ES yang menggunakan unit kWh, kapasitas pembangkit konvensional.

B. Pelepasan Beban



Gambar 6. Pelepasan beban ketiga kasus

Dari hasil pelepasan beban pada kasus 1 dan kasus 3, sistem tidak dapat memenuhi permintaan beban pada sekitar waktu beban puncak (setelah jam PV bekerja). Hal ini menyebabkan sistem harus melepaskan beban cukup signifikan pada saat jam-jam tersebut. Selain itu, pada saat jam ke-6 dan jam ke-8 terdapat kenaikan beban yang tidak bisa diatasi oleh sistem.

Pada kasus 1 tidak ada suplai ES pada sistem. Dengan kapasitas pembangkit total sebesar 360 kW dan kapasitas grid PLN sebesar 100 kW, sistem tidak dapat menampung beban yang memiliki puncak sebesar 556,96 kW. Sehingga dibutuhkan pelepasan beban. Sedangkan pada kasus 3, dengan hilangnya suplai daya dari PLN dengan kapasitas 100 kW, sistem juga tidak dapat menampung beban puncak malam walaupun dengan tambahan ES mencapai 150,74 kW. Namun, daya yang lebih besar dari kapasitas grid PLN ini menyebabkan pelepasan beban lebih kecil dari kasus 1.

C. Analisis Biaya

Dari masing-masing konfigurasi baterai didapatkan rekap biaya sebagai berikut:

Kasus 1

Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$75.894	/hari
Biaya Shedding	\$46	/hari
Biaya Operasi	\$75.940	/hari
Total Biaya	\$27.718.172	/tahun

Kasus 2

Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$71.453	/hari
Biaya Shedding	\$0	/hari
Biaya Operasi	\$71.453	/hari

Biaya Investasi ES

ES-1	\$1.023	/tahun
ES-2	\$29.211	/tahun
ES-3	\$5.357	/tahun
ES-4	\$7.276	/tahun

Biaya per-tahun

Biaya Operasi	\$26.080.408	/tahun
Biaya Investasi ES	\$42.867	/tahun
Total Biaya	\$26.123.275	/tahun

Kasus 3

Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$77.719	/hari
Biaya Shedding	\$37	/hari
Biaya Operasi	\$77.757	/hari

Biaya Investasi ES

ES-1	\$0	/tahun
ES-2	\$82.392	/tahun
ES-3	\$4.760	/tahun
ES-4	\$757	/tahun

Biaya per-tahun

Biaya Operasi	\$28.381.182	/tahun
Biaya Investasi ES	\$87.909	/tahun
Total Biaya	\$28.469.091	/tahun

Dari rekap biaya, didapatkan bahwa kasus 2 memiliki total biaya per-tahun dan biaya operasional paling minimum. Hal ini berkaitan dengan sebelumnya dimana kondisi daya sistem memang pada keadaan kekurangan pembangkit (*undersupply*) terutama pada malam hari sehingga dengan adanya ES

berkerja dengan grid PLN, sistem dapat menopang beban dan meringankan daya pembangkit diesel dan mikroturbin.

Sedangkan pada kasus 3, meskipun dengan adanya ES, mematikan daya grid PLN menyebabkan pembangkit beroperasi pada kapasitas maksimum hampir setiap saat. Sehingga biaya operasi jauh lebih besar dari kasus sebelumnya.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi kasus adalah:

- 1) Pada kasus 1 (hybrid tanpa baterai) didapatkan kapasitas pembangkit 460 kW, daya puncak PV 219,60 kW, dan pelepasan beban sebesar 492,35 kWh selama 24 jam.
- 2) Pada kasus 2 (hybrid dengan baterai) didapatkan ES dengan: ES-1 525,04 Ah pada bus 7, ES-2 14989,81 Ah pada bus 15, ES-3 2748,82 Ah pada bus 14, dan ES-4 3733,89 Ah pada bus 12 tanpa adanya pelepasan beban pada sistem.
- 3) Pada kasus 3 (hybrid dengan baterai) didapatkan ES dengan: ES-1 0,00 Ah, ES-2 42279,94 Ah pada bus 15, ES-3 2442,54 Ah pada bus 14, dan ES-4 388,71 Ah pada bus 12. Dengan pelepasan beban sebesar 396,75 kWh selama 24 jam.
- 4) Kasus 2 menuju konvergen setelah 200 iterasi. Sedangkan kasus 3 menuju konvergen setelah 400 iterasi.
- 5) Penentuan kapasitas serta alokasi energy storage optimal berpotensi mengurangi biaya per-tahun.
- 6) Besar kapasitas energy storage optimal menyesuaikan dengan permintaan beban pada sistem.
- 7) Besar kapasitas serta penempatan energy storage optimal menyesuaikan dengan konfigurasi sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih saya ucapkan kepada:

- 1) Orang tua, kakak, dan seluruh keluarga yang telah memberikan seluruh cinta dan doanya
- 2) Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Dr. Ni Ketut Aryani, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktunya untuk mengarahkan dan membimbing selama perkuliahan dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
- 3) Prof. Ontoseno Penangsang, Prof. Adi Soeprijanto, Bapak Dimas Fajar Uman, Bapak Suyanto, serta dosen-dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak masukan dan pengetahuan kepada penulis.
- 4) Seluruh teman-teman penulis yang setia dengan *support*, kritik, serta saran untuk membantu penulis menyelesaikan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. I. Picioroagă, M. Sănduleac and D. o. E. P. Systems, "Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Resilient Distribution Networks Focusing on Critical Loads," in THE XIth INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, Bucharest, 2019.
- [2] Q. Fu, A. Hamidi, A. Nasiri, V. Bhavaraju, S. B. Krstic and P. Theisen, "The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids.," IEEE Electrification Magazine, vol. 1, no. 2, pp. 21-29, 2013.

- [3] A. J. Wood, B. F. Wollenberg and G. B. Sheble, POWER GENERATION, OPERATION, AND CONTROL, New Jersey: Wiley, 2014.
- [4] D. G. Newman, T. G. Eschenbach and J. P. Lavelle, "ANNUAL CASH FLOW ANALYSIS," in ENGINEERING ECONOMIC ANALYSIS, New York, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2012, pp. 191-192.
- [5] R. Fu, T. Remo and R. Margolis, "Evaluating the Cost Benefits of U.S. Utility-Scale Photovoltaics," in IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2018.
- [6] Y. Sun, Q. Ding, P. Zeng and F. Sun, "Optimal sizing of a wind-energy storage system considering battery life," in International Conference on Power System Technology , Guangzhou, 2018.