

## Analisa Rugi-Rugi Pelepasan Energi Sistem Penyimpanan Energi Potensial Gravitasi Jenis Menara Beban

*Rizki Pratama Putra<sup>1</sup>; Hasna Satya Dini<sup>2</sup>; Sugeng Purwanto<sup>3</sup>*

<sup>1, 2, 3</sup> Institut Teknologi PLN

<sup>1</sup> rizki@itpln.ac.id

### ABSTRACT

*This study discusses the mechanical losses of a gravitational potential energy storage system of load tower types. The aim of this research is to investigate the characteristics of mechanical losses with varied mechanical torque. Analysis of the friction theory of bearings and pulleys using the Harris model, then the prototype of the energy storage system is tested directly with the weight load varying in weight to see the characteristics of mechanical losses that occur in prototypes. This information will later be taken into consideration to design and optimize the energy storage system in terms of the selection of falling loads and how to design the energy charging and discharging mechanism. The results obtained are torque losses measurement are partly proportional to the falling mass applied to the system. The value of losses does not increase linearly with the addition of the mass of the falling load. This provides information in considering optimum falling mass weight for energy charging process and also how to consider the control mechanism of energy storage.*

**Keywords:** Energy Storage, Charging Process, Energy Losses, Gravity Storage

### ABSTRAK

*Penelitian ini membahas tentang rugi-rugi mekanis dari suatu sistem penyimpanan energi potensial gravitasi jenis menara beban. Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki karakteristik rugi-rugi mekanis dengan torka mekanik yang divariasikan. Analisa teori gesekan friksi dari bearing dan pully menggunakan model Harris, kemudian prototipe sistem penyimpanan energi diuji secara langsung dengan beban jatuh yang divariasikan beratnya untuk melihat secara langsung karakteristik losses mekanik yang terjadi pada purwarupa. Informasi tersebut nantinya akan dijadikan pertimbangan untuk mendesain dan mengoptimasi sistem penyimpanan energi dari sisi pemilihan beban jatuh dan mekanisme pengisian dan pelepasan energi mekanik. Hasil yang didapatkan adalah losses torka yang terjadi berbanding lurus dengan massa jatuh yang diaplikasikan pada sistem. Nilai losses tidak bertambah secara linear seperti penambahan beban jatuh. Hal ini memberikan informasi dalam mempertimbangkan pemilihan beban jatuh untuk penyimpanan energi dengan besar tertentu dan juga bagaimana memilih mekanisme kontrol dari penyimpanan energi tersebut.*

**Kata kunci:** Penyimpanan Energi, Pengisian Energi, Rugi penyimpanan energi, Penyimpanan Gravitasi

## 1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik energi terbarukan saat ini semakin banyak dibangun guna mengurangi dominasi pembangkit listrik tenaga fosil di Indonesia yang menyumbang banyak emisi karbon. Pembangkit listrik energi terbarukan memiliki biaya investasi yang relatif lebih besar dibandingkan pembangkit energi fosil dan memiliki reliabilitas yang lebih rendah dari pembangkit energi fosil atau pembangkit energi terbarukan memiliki daya output yang tidak stabil [1][2].

Sifat intermitten dari pembangkit ini apabila masuk ke sistem interkoneksi maka akan memberikan respon bervariasi. Jika suplai daya yang bersifat intermitten relatif besar nilainya dari total daya sistem maka frekuensi dan tegangan sistem akan beresilasi yang akan menurunkan kualitas penyaluran daya listrik. Apabila suplai daya intermitten relatif kecil dari keseluruhan daya yang ada pada sistem maka osilasi frekuensi dan tegangan yang ditimbulkan pada sistem akan menjadi relatif kecil [3][4].

Pada pemanfaatan pembangkit energi listrik terbarukan misalnya untuk sel surya dan pembangkit tenaga angin di area terpencil atau pada mode standalone, ketidakstabilan output dari pembangkit EBT ini akan menjadi signifikan. Untuk mengatasi masalah tersebut biasanya digunakan baterai kimia yang tentunya menambah masalah baru yakni masalah biaya. Penambahan baterai pada sistem pembangkitan energi terbarukan dapat menambah biaya yang signifikan per kWh nya meskipun manfaat yang didapatkan adalah daya output dari pembangkit menjadi stabil [5].

Untuk mengatasi masalah biaya penyimpanan energi terdapat berbagai alternatif energi penyimpanan selain penyimpanan energi kimia misalnya menggunakan sistem pumped hydro (PHS), compressed gas (CGAS), flywheel energy storage, dan gravity storage. Keempat penyimpanan energi tersebut memiliki efisiensi dan biaya investasi dan operasional yang berbeda-beda. Meskipun demikian, tidak dapat ditentukan penyimpanan mana yang paling bagus digunakan untuk semua jenis kondisi sistem tenaga listrik [6][7].

Beberapa hal utama yang perlu diperhatikan dalam mendesain suatu sistem penyimpanan energi diantaranya adalah mengenai densitas energi dan Levelized energy cost. Energy density menunjukkan seberapa besar energi yang ditampung per volume penyimpanan energi, sementara itu levelized energy cost menggambarkan seberapa besar biaya yang diperlukan untuk menyimpan energi per kWh nya [8][9][10].

Berikut perbandingan karakteristik beberapa penyimpanan energi alternative yang telah banyak diaplikasikan dan diteliti dalam sistem tenaga listrik [11][12]

**Tabel 1.** Perbandingan karakteristik berbagai penyimpanan energi alternatif

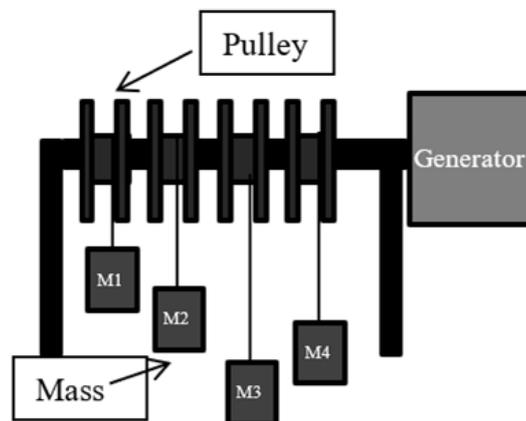
Jenis Teknologi Penyimpanan	Densitas Energi (Wh/l)	Rating Daya (W)	Waktu Discharging h	Usia Pemakaian years	Efisiensi Roundtrip %
Flywheel energy storage	20-80	$<2.5 \cdot 10^5$	$<0.25$	15	85-95
Compressed air storage	0,4-20	$5 \cdot 10^6$ - $3 \cdot 10^8$	1-24	20-60	50-89
Pumped hydro energy storage	0,13-0,5	$10^8$ - $5 \cdot 10^9$	1-24	40-60	65-87
Underwater ocean energy storage system	-	$<10^9$	1-10	n/D	65-90

Gravity power module	1,6	$4.10^7$ - $1,6.10^9$	1-4	30+	75-80
Hydraulic hydro storage	-	$2.10^7$ - $2,75.10^9$	1-24	40+	80
Ground-breaking energy storage	-	$10^8$	24	40+	80
Advanced rail energy storage	-	$10^8$ - $3.10^9$	2-24	40+	75-86
Gravitricity	-	$<4.10^7$	$<2$	50+	80-90

## 2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

Seperti yang telah dipaparkan diatas dimana tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki rugi-rugi dari penyimpanan energi gravitasi yang diusulkan maka terlebih dahulu dipaparkan gambar konsep penyimpanan energi gravitasi yang diusulkan.

Baterai gravitasi jenis menara beban terdiri dari beberapa bagian utama yakni massa beban, katrol, dan generator. Operasi kerja dari Menara beban ini terdiri dari 2 bagian yakni proses pengisian dan pelepasan, masing-masing proses menggunakan beberapa bagian yang berbeda yang akan menghasilkan rugi-rugi yang berbeda pula. Skematik dari penyimpanan energi gravitasi yang diusulkan dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



**Gambar 1.** Gambar mekanisme kerja sistem baterai gravitasi yang diusulkan

Pada gambar 1 terlihat generator yang digunakan terkopel dengan poros pulley yang menggunakan bearing freewheel yang hanya dapat bergerak 1 arah. Penggunaan freewheel disini dimaksudkan untuk memudahkan kontinuitas pelepasan energi gravitasi sehingga dapat berjalan 24 jam. Dengan mekanisme freewheel tersebut sistem dapat sekaligus mengisi dan melepas energi secara simultan dan adapun penggunaan multiple freewheel disini dimaksudkan untuk menunjang proses tersebut atau agar beberapa massa dapat bekerja secara parallel jika sistem membutuhkan daya output yang besar. Sistem ini dapat memberikan responsibilitas yang baik dengan pengadaan pengontrolan langsung pada pulley freewheel dan selain itu simultaniuitas dari proses pengisian dan pelepasan energi dapat terjadi sehingga lebih sistem akan bekerja lebih efisien dan bekerja dalam waktu kontinyu.

Analisa teoritis dari mekanisme penyimpanan ini akan dijelaskan sebagai berikut:

Secara umum energi potensial yang dimiliki oleh beban pada ketinggian tertentu dirumuskan dengan

$$E = mgh \quad (1)$$

Untuk membuat suatu massa memiliki energi potensial sebesar  $E$  maka dibutuhkan energi sebesar  $E_c$  yang disebut energi proses pengisian. Kemudian untuk memanfaatkan energi potensial tersebut maka digunakan generator/generator yang akan menghasilkan energi sebesar  $E_d$ . Idealnya efisiensi maksimum tercapai apabila  $E_c = E_d$  yang akan terjadi jika sama sekali tidak ada rugi-rugi energi yang terjadi pada kedua proses yakni pengisian dan pelepasan.

Telah diketahui bahwa terdapat beberapa jenis penyimpanan energi gravitasi yang telah diteliti dengan mekanismenya yang berbeda satu-sama lain. Pada penyimpanan energi gravitasi model katrol seperti yang dikembangkan oleh Energy Vault diperoleh efisiensi penyimpanan roundtrip sebesar 80-90%. Terdapat rugi-rugi dalam rentang 10-20% dari sistem tersebut yang dapat berasal dari kerja beberapa motor servo mekanik untuk merubah posisi dari kait katrol. Hal ini merupakan konsekuensi dari pemaksimalan daya tampung energi dari Menara beban dimana beban diletakkan bertumpuk secara konsentris disekitar Menara katrol. Selain itu pada prakteknya, untuk Menara dengan ketinggian yang cukup tinggi dan beban yang ringan terlihat beban berayun ketika diturunkan yakni dalam proses pelepasan.

Berdasarkan persamaan (1) tentang energi potensial yang dimiliki oleh massa dan energi listrik yang bisa dihasilkan dari proses konversi energi potensial tersebut maka dapat dibuat relasi sebagai berikut:

$$E_d = \eta mgh \quad (2)$$

Dimana  $\eta$  adalah efisiensi sistem baterai gravitasi

$\eta$  disini atau lebih lanjut disebut efisiensi terbagi 2 yaitu efisiensi dipengaruhi oleh rugi-rugi operasi baterai atau rugi-rugi mekanis dan efisiensi dari generator listrik. Komponen yang bergerak pada sistem baterai gravitasi yang diusulkan diantaranya adalah pulli/katrol, gearbox dan tali katrol.

Pada katrol yang menggunakan bearing untuk meredam gaya gesek akibat putaran poros rotor, momen rugi-rugi mekanis dapat ditulis dengan persamaan :

$$T_l = I\alpha \quad (3)$$

Dimana  $\alpha$  disini adalah percepatan yang bernilai negatif atau disebut perlambatan,  $I$  adalah inersia sistem dan  $T_l$  adalah rugi-rugi torka mekanis.

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa rugi-rugi mekanis dapat memberikan perlambatan pada perputaran pulli atau rotor generator. Persamaan diatas juga memberikan informasi bahwa perlambatan tersebut dipengaruhi oleh besarnya inersia total dari sistem dan juga torka yang menjadi variable utama yang memberikan pengaruh besar. Torka tersebut sebagian besar berasal dari gaya gesekan antara bola besi pejal dengan poros putaran bearing.

Berdasarkan model harris, rugi-rugi yang terdapat pada bearing terdiri dari 2 jenis yakni rugi-rugi karena pengaruh beban dan rugi-rugi karena viskositas pelumas. Dalam desain sistem penyimpanan yang diajukan, bearing menggunakan pelumas yang sangat cair sehingga losses karena viskositas fluida diabaikan.

Untuk rugi torka yang dipengaruhi oleh beban disebabkan oleh gesekan antara roller dan cincin bearing. Torka riaksi yang dipengaruhi beban diberikan dengan persamaan dibawah ini :

$$M_l = f_l F_\beta d_m \quad (4)$$

Dimana  $M_l$  torka friksional,  $f_l$  adalah faktor yang tergantung desain bearing dan besar beban yang didefinisikan dengan:

$$f_l = z \left( \frac{F_s}{C_s} \right)^y \quad (5)$$

$F_s$  dan  $C_s$  adalah beban statis ekivalen dan beban statis ekivalen dasar.  $y$  adalah faktor yang bergantung dengan sudut kontak roller dan cincin bearing [16].

Berdasarkan persamaan (5) maka dapat terlihat bahwa semakin besar beban statis yang diberikan pada sistem maka semakin besar pula nilai  $f_l$  yang terjadi.

Generator pada baterai gravitasi yang dibuat, dihubungkan ke poros pully penggerak melalui gearbox yang dimaksudkan untuk mengontrol putaran rotor generator pada aplikasi beban yang dinamis. Penggunaan gearbox disini akan memberikan rugi-rugi tambahan.

Dikarenakan oleh kondisi losses mekanik dari baterai gravitasi yang dipengaruhi oleh beban dan kecepatan putaran bearing atau gear maka massa yang akan digunakan dalam percobaan akan divariasikan untuk melihat karakteristik losses dari baterai gravitasi yang dibangun. Adapun tabel spesifikasi beban dan komponen-komponen baterai gravitasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

**Tabel 2.** Spesifikasi beban dan komponen-komponen baterai gravitasi yang diuji

Material	Type/model	Inertia
Jenis generator	Selfexcited alternator	0.202 $\times 10^{-3} kg.m^2$
Material Pulley rotor	PVC	0.14 $\times 10^{-3} kg.m^2$
Material Pulley/katrol	PLA	0.1017 $\times 10^{-3} kg.m^2$
Bearing	Roller bearing 32/64	-
Freewheel gear	One way freewheel gear	0.2187 $\times 10^{-3} kg.m^2$

Ketika suatu beban diturunkan maka generator akan berputar menurut persamaan berikut:

$$I \frac{d^2\omega}{dt^2} = \sum T$$

$$I \frac{d^2\omega}{dt^2} = T_m - T_l - T_e \quad (6)$$

Dimana  $I$  adalah total inersia yang merupakan gabungan inersia pulli, katrol dan poros generator,  $a$  adalah akselerasi,  $T_m$  adalah torka mekanik yang berasal dari massa yang diturunkan, besar torka mekanik dapat dicari dengan

$$T_m = m.g.r \quad (7)$$

dimana

- $r$  adalah jari-jari katrol dan  $m$  adalah massa beban yang diturunkan,
- $T_l$  adalah torka losses yang berasal dari bearing dan flywheel pada poros gerak rotor generator.
- $T_e$  adalah torka elektrik yang berasal dari arus yang mengalir pada terminal output generator.

Parameter seperti inersia dan torka elektrik merupakan variabel yang terikat pada geometri (inersia) dan besar beban yang disuplai oleh generator serta putaran generator (torka elektrik). Parameter inersia akan selalu konstan dalam percobaan.

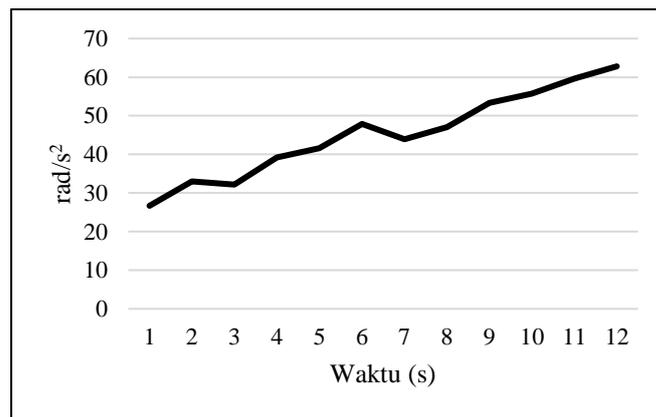
Torka elektrik merupakan besaran yang terkait dengan arus yang dipengaruhi kecepatan putaran rotor generator sehingga nilainya dinamis, sementara itu kecepatan putaran rotor juga dipengaruhi oleh torka mekanik yang nilainya tergantung besar massa yang diturunkan. Dalam

penelitian ini apabila yang ingin dilihat karakteristiknya adalah loses mekanik maka torka elektrik dapat dihilangkan dengan cara menguji generator dalam kondisi open circuit atau dengan memutus arus eksitasi ke alternator

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persamaan (6) Rugi-rugi torka mekanik dapat diketahui dengan melakukan percobaan tanpa membebani generator.

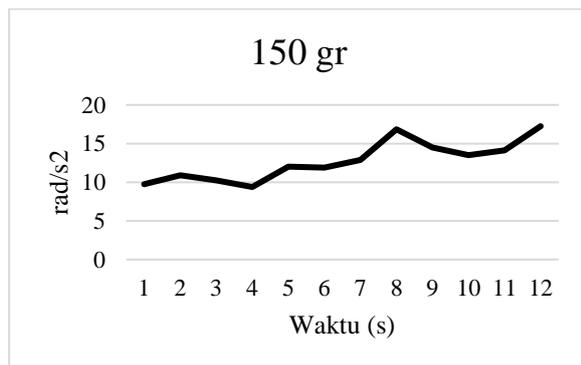
Generator dihubungkan dengan pully yang diberi beban jatuh sebesar 150 gr yang dijatuhkan dari ketinggian 15 m. Adapun data kecepatan sudut pully terhadap waktu dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



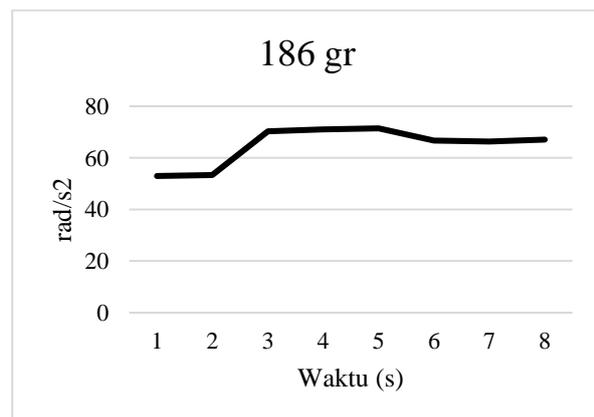
**Gambar 2.** Perubahan kecepatan pulley dengan beban jatuh 150 gr tanpa terkopel dengan generator

Data diatas menunjukkan kecepatan sudut putaran pully terhadap waktu dan dari hasil pengukuran tersebut didapatkan nilai percepatan sudut pully adalah sebesar  $3.02 \text{ rad/s}^2$ .

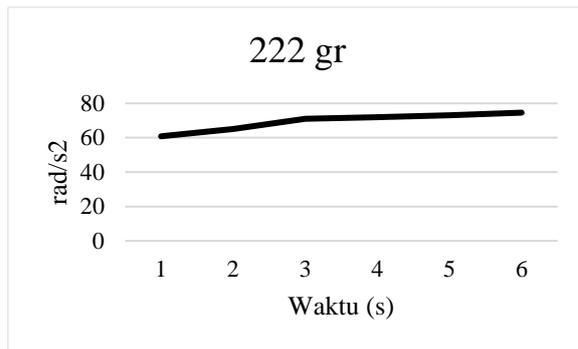
Percobaan selanjutnya adalah dengan memasang generator dan pully nya pada sistem katrol kemudian beban yang diturunkan divariasikan. Adapun hasil pengujiannya dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



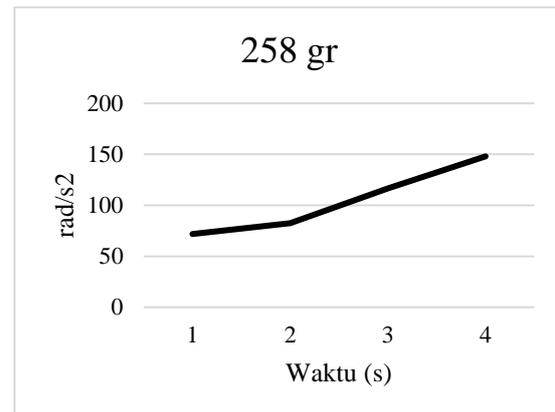
**Gambar 3.** Perubahan kecepatan pulley dengan beban jatuh 150 gr dengan kondisi generator tak berbeban



**Gambar 5.** Perubahan kecepatan pulley dengan beban jatuh 186 gr dengan kondisi generator tak berbeban



**Gambar 4.** Perubahan kecepatan pulley dengan beban jaruh 222 gr dengan kondisi generator tak berbeban



**Gambar 6.** Perubahan kecepatan pulley dengan beban jaruh 258 gr dengan kondisi generator tak berbeban

### Analisa rugi-rugi torka

Pada kondisi pengujian tanpa menggunakan pulley, dan dari data akselerasi yang diperoleh serta inersia dan torka mekanik maka dari persamaan (6) didapatkan bahwa terdapat rugi-rugi torka mekanik akan berasal dari bearing generator.

Kemudian untuk pengujian dengan menggunakan pulley dan beban yang divariasikan, rugi-rugi mekanik telah dikalkulasi dan hasilnya dapat diperoleh pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.** Rugi-rugi pelepasan energi dengan berbagai kondisi operasi

Kondisi	Berat Massa (gr)	Torka Mekanik (N.m)	Percepatan Sudut (rad/s <sup>2</sup> )	Total Inersia (x10 <sup>-3</sup> kg.m <sup>2</sup> )	Rugi Torka (N.m)
<b>Tanpa Katrol</b>	150	0.051818	3.023	0.202	0.051207
<b>Dengan Katrol</b>	150	0.051818	1.9625	0.4604	0.050914
	186	0.064254	2.01857	0.4604	0.063324
	222	0.07669	2.75064	0.4604	0.075424
	258	0.089126	25.39	0.4604	0.077437

Dari tabel tersebut terlihat apabila dibandingkan antara pengujian dengan memasang katrol kontrol dan tidak memasang katrol kontrol terdapat redaman torka yang berasal dari bearing dan katrol. Meskipun demikian dari hasil pengamatan pada implementasi katrol terlihat bahwa semakin besar torka mekanik yang diberikan maka kecepatan sudut rotor generator akan semakin besar. Disisi lain dari hasil perhitungan rugi-rugi torka mekanik ternyata kenaikan nilai rugi torka tidak linear. Selain itu semakin besar beban yang digunakan atau semakin besar torka mekanik yang diberikan pada pulley maka losses torka mekanik yang didapatkan menjadi semakin besar.

Pada penggunaan beban dengan berat 255 gr terjadi peningkatan akselerasi yang sangat besar dibandingkan penggunaan massa sebelumnya yang lebih ringan. Namun dari hasil perhitungan tetap saja losses mekanik lebih tinggi dari penggunaan massa yang lebih ringan.

Rugi-rugi mekanik dari sistem penyimpanan baterai gravitasi merupakan faktor utama yang sangat mempengaruhi efisiensi dari keseluruhan sistem. Sedangkan objektif dari pembuatan sistem

penyimpanan energi gravitasi adalah agar metode ini dapat bersaing dengan penyimpanan energi komersial lainnya dari segi efisiensi, biaya operasional dan biaya investasi. Oleh karena itu rugi-rugi ini harus diminimalkan

Dalam perencanaan penyimpanan energi gravitasi, pemilihan besar beban jatuh tergantung dari mekanisme kerja sistem yang diusulkan. Pada desain penyimpanan energi gravitasi oleh Morstyn [14] terlihat bahwa massa jatuh tidak dibatasi dan sizing dari sistem tersebut tergantung dari berat massa dan ketinggian massa tersebut saat diturunkan. Namun untuk membuat sistem sensitif terhadap perubahan permintaan output maka kontrol gearbox harus diimplementasikan dengan konsekuensi adanya rugi-rugi tambahan tergantung seberapa kompleks mekanisme gearboxnya. Selain itu implementasi model massa tersebut juga akan berdampak pada rugi-rugi dan cepat proses pengisian atau kenaikan beban, sebab massa yang besar akan membutuhkan batas minimum energi yang besar untuk merubah ketinggian massa tersebut.

#### **4. KESIMPULAN DAN SARAN**

Paper ini telah membahas tentang rugi-rugi mekanik dari proses pelepasan energi suatu sistem penyimpanan energi gravitasi. Paper ini juga membahas mengenai pertimbangan teknis terkait mekanisme kerja baterai yang diusulkan dengan objektif meminimalkan rugi-rugi mekanis dan memaksimalkan responsibilitas dan kapasitas dari sistem. Berbagai pertimbangan teoritis dan praktis tentang rugi-rugi mekanik dari komponen bergerak telah diambil dalam mendesain gambaran umum dari sistem yang diusulkan. Untuk menyelidiki losses mekanik sistem dilakukan pengujian langsung menggunakan beban yang divariasikan besarnya. Dan hasil pengujian menunjukkan kesesuaian dengan teori atau hipotesis sebelumnya yakni model Harris, bahwa nilai losses mekanik dari suatu sistem yang berputar berbanding lurus dengan massa ekuivalen pada sistem tersebut semakin besar massanya semakin besar pula losses yang terjadi. Hal tersebut menjadi pertimbangan dalam menentukan beban minimum yang akan diangkat atau dilepaskan nantinya, berapa banyak beban minimum yang dapat diparalelkan agar losses dapat diminimalkan untuk menampung besar energi tertentu. Dalam mekanisme yang diusulkan, beban minimum menentukan sensitifitas sistem terhadap input pengisian energi. Sistem baterai gravitasi yang diusulkan ini memerlukan penelitian lebih lanjut agar dapat dikomersialkan terutama penelitian mengenai teknik kontrol beserta efisiensi dan responsibilitasnya, kajian ekonomis dan lainnya. Dan adapun hasil dari penelitian ini merupakan langkah awal yang memberikan informasi dalam mempertimbangkan parameter dan kriteria-kriteria lainnya yang akan diambil dalam proses penyempurnaan sistem penyimpanan baterai gravitasi yang diharapkan mampu bersaing dengan penyimpanan energi komersial yang telah eksis di pasaran.

#### **UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi PLN atas bantuan dana yang diberikan sehingga penelitian ini dapat berjalan.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] D. E. Nasional, "Outlook Energi Indonesia 2019," Sekr. Jendral dewan Energi Nas., 2019.
- [2] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," Appl. Energy, 2015.
- [3] K. Shivarama Krishna and K. Sathish Kumar, "A review on hybrid renewable energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015.

- 
- [4] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M. S. Ismail, and M. Moghavvemi, "Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [5] A. B. Gallo, J. R. Simões-Moreira, H. K. M. Costa, M. M. Santos, and E. Moutinho dos Santos, "Energy storage in the energy transition context: A technology review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [6] M. Aneke and M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review," *Applied Energy*. 2016.
- [7] C. D. Botha and M. J. Kamper, "Capability study of dry gravity energy storage," *J. Energy Storage*, 2019.
- [8] U.S. Department of Energy Office of Indian Energy Policy and Programs, "Levelized Cost of Energy (LCOE)," US Dep. energy, 2015.
- [9] C. S. Lai and M. D. McCulloch, "Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage," *Appl. Energy*, 2017.
- [10] V. Jülch, "Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method," *Appl. Energy*, 2016.
- [11] B. Maheswaran, N. B. Tedori, E. J. Whitmore, B. L. Ritchie, and L. Gross, "Regenerative braking system on a conventional bike," in *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2018.
- [12] A. C. Ruoso, "Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications," *Inventions*, vol. 4, no. 64, 2019.
- [13] Neasan O'Neill, "Is gravity and old mineshafts the next breakthrough in energy storage?," *Imperial College London*, 2018.
- [14] T. Morstyn, M. Chilcott, and M. D. McCulloch, "Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts," *Appl. Energy*, 2019.
- [15] R. Dufo-López et al., "Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage," *Appl. Energy*, 2011.
- [16] S. Abdan, N. Stosic, A. Kovacevic, I. Smith, and N. Asati, "Analysis of rolling bearing power loss models for twin screw oil injected compressor," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019.