

Analisis Numerik Jatuh Tegangan pada Derek Kontainer di Pelabuhan Akibat Arus Mula Motor

Adi Kurniawan¹, Firman Rachmat Wahyudy¹, Sardono Sarwito¹

¹Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

E-mail: adi.kurniawan@ne.its.ac.id, firmanrw06@yahoo.com, sarsar@its.ac.id

Abstrak— *Container crane* atau derek kontainer membutuhkan transformator untuk mengatur tegangan sesuai dengan spesifikasi tegangan dari motor-motor listrik yang menggerakkan derek tersebut. Dalam pengoperasian transformator, timbul arus mula yang mengalir melalui transformator pada saat motor-motor listrik mulai dinyalakan. Meskipun durasi munculnya arus mula tidak lama, namun memiliki beberapa dampak yang dapat mengganggu pengoperasian peralatan. Salah satunya adalah timbulnya jatuh tegangan. Pada penelitian ini dilakukan simulasi kondisi arus mula serta arus pada kondisi tunak pada derek, serta menganalisis dampak dari arus tersebut terhadap jatuh tegangan pada sistem. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga. Pada perangkat simulasi, keempat jenis motor yang menggerakkan derek kontainer yaitu motor *hoist*, motor *boom*, motor *gantry* dan motor *trolley* dinyalakan secara bergantian untuk melihat respon sistem pada masing-masing penyalaan. Hasil simulasi menunjukkan terdapat durasi jatuh tegangan yang tidak memenuhi standar dari *International Electrotechnical Commission (IEC)*. Penambahan kapasitor sebesar 806.400 VAR dilakukan untuk memastikan bahwa jatuh tegangan yang terjadi dapat memenuhi standar dari IEC.

Kata Kunci—*infrastruktur transportasi, kualitas daya listrik, mesin listrik, pemodelan sistem*

I. PENDAHULUAN

Transportasi laut memegang peranan sangat penting dalam roda perputaran ekonomi dunia. Diperkirakan sekitar 80% dari perdagangan global dieksekusi melalui jalur laut [1]. Hal ini sangat masuk akal karena kapal dapat membawa muatan dalam jumlah lebih banyak dari moda transportasi yang lain, termasuk pesawat terbang [2]. Selain itu, penerapan pembangkit listrik energi terbarukan lebih memungkinkan untuk dilakukan di kapal, sehingga membuat transportasi laut menjadi lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan [3]–[5].

Di Indonesia, peran transportasi laut bahkan jauh lebih signifikan, mengingat bahwa sebagian besar wilayah Indonesia terdiri atas laut. Laut Indonesia tidak hanya menjadi jalur bagi perdagangan antar pulau di Indonesia, tetapi juga menjadi jalur perdagangan global, setidaknya 25% dari komoditas perdagangan global diangkut melalui perairan di Indonesia [6].

Selain kapal sebagai pengangkut barang, pelabuhan juga memiliki peran yang tidak kalah penting. Pelabuhan menjadi pusat terjadinya perpindahan barang sebagai bagian dari proses perdagangan [7]. Di pelabuhan, barang dipindahkan

pendek usia peralatan [17]. Oleh karena itu, kriteria analisa numerik yang diamati adalah persentase dari tegangan jatuh,

dari darat menuju kapal, dari kapal menuju darat, atau pada sebagian kasus, dari sebuah kapal ke kapal lainnya.

Salah satu jenis kapal dagang terbanyak di dunia adalah kapal kontainer yang mengangkut peti kemas [8]. Berat peti kemas bervariasi, namun setidaknya berada pada ratusan kilogram sehingga tidak mungkin diangkat menggunakan tenaga manusia. Oleh karena itu, proses bongkar muat peti kemas dari ataupun ke kapal dilakukan dengan menggunakan bantuan derek kontainer [9].

Sebagian kapal kontainer memiliki derek kontainer yang terpasang pada kapal tersebut untuk memudahkan jika pelabuhan tempat tujuan kapal tersebut tidak memiliki derek kontainer. Namun sebagian besar pelabuhan saat ini juga telah memiliki derek kontainer. Pada penelitian ini derek kontainer yang menjadi pembahasan adalah derek kontainer yang terletak pada Pelabuhan Tanjung Perak di Surabaya.

Derek kontainer yang digunakan pada Pelabuhan Tanjung Perak sudah menggunakan motor listrik seperti pada pelabuhan modern lainnya. Derek kontainer menggunakan motor listrik lebih hemat energi dan rendah emisi jika dibanding menggunakan motor jenis lain. Hal ini mendukung cita-cita terwujudnya konsep *green port* [10], [11].

Sistem derek kontainer di Pelabuhan Tanjung Perak disuplai dari generator yang menggunakan tegangan menengah yaitu sebesar 3,3 kV. Motor-motor listrik yang terdapat di derek membutuhkan tegangan rendah yaitu sebesar 440 V. Oleh karena adanya perbedaan nilai tegangan, maka digunakan transformator untuk menyesuaikan tegangan dari generator sebelum masuk ke motor.

Selama ini sistem derek kontainer telah beroperasi dan tidak ada tanda-tanda mengalami gangguan teknis. Meskipun demikian, analisis numerik dari kualitas daya listrik dipandang penting untuk mencegah dan memberi rekomendasi sehingga tidak terjadi hal yang tidak diinginkan yang dapat menimbulkan kerugian secara teknis maupun ekonomis [12]–[15].

Pada penelitian ini dilakukan analisis numerik untuk mengamati kualitas daya listrik pada derek kontainer, terutama pada saat awal penyalaan motor listrik yang terdapat pada sistem. Berdasarkan teori, penyalaan motor listrik, khususnya motor asinkron tiga fasa seperti yang terpasang pada derek kontainer yang dibahas, akan menyebabkan tarikan arus mula yang sangat besar dan dapat menyebabkan jatuh tegangan [16]. Kondisi jatuh tegangan sendiri dapat menyebabkan kerja dari motor ataupun peralatan yang tersambung menjadi tidak optimal dan dalam jangka panjang dapat memper

yaitu persentase pengurangan tegangan yang masuk pada motor dibandingkan dengan nilai nominalnya. Nilai tegangan

jatuh yang teramati dibandingkan dengan nilai standar yang diperbolehkan IEC. Jika nilai tegangan jatuh melampaui standar yang diperbolehkan, maka perbaikan dilakukan dengan menambahkan kapasitor sampai nilai tegangan jatuh memenuhi standar yang diperbolehkan oleh IEC.

II. BAHAN DAN METODE

Pada bagian ini diuraikan terkait dengan spesifikasi peralatan yang terpasang pada sistem derek kontainer yang dianalisis, terutama terkait dengan transformator dan motor. Selain itu dijelaskan pula secara singkat alur pengerjaan dalam penelitian ini.

A. Spesifikasi Peralatan

Sistem derek kontainer disuplai oleh generator yang memiliki spesifikasi kapasitas sebesar 1,25 MVA dengan tegangan sebesar 3,3 kV. Pada sistem terdapat tiga buah transformator. Transformator pertama digunakan untuk menurunkan tegangan menjadi 460 V sebagai suplai dari motor *hoist* dan motor *boom*. Setelah melalui transformator pertama, jaringan diparalel ke transformator kedua dan ketiga yang menurunkan tegangan ke level 440 V untuk menjadi suplai dari motor *trolley* dan motor *gantry*. Motor *hoist* dan *boom* yang digunakan pada sistem ini masing-masing berjumlah hanya satu buah, sedangkan motor *trolley* terdapat dua buah, dan motor *gantry* merupakan motor terbanyak dengan jumlah 8 buah. Spesifikasi dari ketiga transformator yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1 sedangkan spesifikasi dari motor listrik ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 1. SPESIFIKASI TRANSFORMATOR PADA DEREK KONTAINER

Transformers no.	Spesifikasi		
	Daya (kVA)	Tegangan Primer (V)	Tegangan Sekunder (V)
Transformer 1	800	3.300	460
Transformer 2	300	460	440
Transformer 3	300	460	440

TABEL 2. SPESIFIKASI MOTOR LISTRIK PADA DEREK KONTAINER

Jenis Motor	Spesifikasi		
	Power (kW)	Tegangan Input (V)	Jumlah
Motor Hoist	315	460	1
Motor Boom	110	460	1
Motor Trolley	37	440	2
Motor Gantry	15	440	8

B. Metode Pengerjaan

Pada penelitian ini data yang dianalisis berasal dari simulasi menggunakan program analisis sistem tenaga [18]. Sumber listrik berupa generator, trafo, kabel, dan motor dimodelkan dalam program dan diisi sesuai dengan nilai spesifikasi masing-masing.

Pada program dilakukan simulasi dalam kondisi motor baru dinyalakan. Metode penyalaan setiap motor adalah dengan menggunakan saklar bintang-delta dimana perubahan dari rangkaian bintang ke rangkaian delta dilakukan pada detik kelima. Simulasi dilakukan selama periode waktu satu menit.

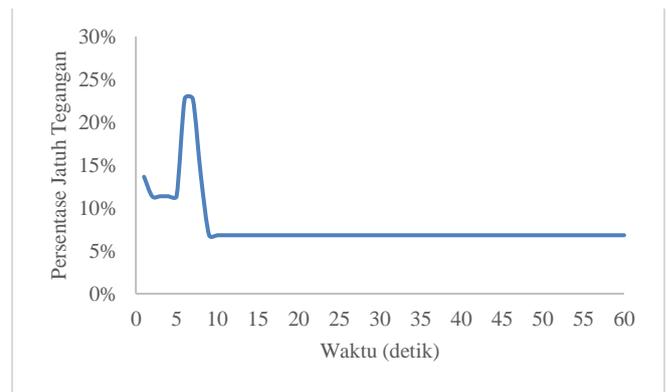
Berdasarkan hasil simulasi, tegangan output dari transformator, atau dalam hal ini juga merupakan tegangan input untuk motor akan diamati. Besarnya tegangan akan dihitung menjadi jatuh tegangan dibanding dengan nilai tegangan fundamentalnya. Sesuai dengan standar IEC 60364, nilai jatuh tegangan oleh sistem pada kategori tegangan rendah yang disuplai oleh sumber mandiri dibatasi sebesar 8% dari nilai tegangan fundamental [19]. Standar tersebut dilihat pada saat tegangan telah mencapai kondisi tunak.

Setelah performa sistem diamati berdasarkan simulasi, akan diketahui standar jatuh tegangan masih tercapai atau tidak. Jika nilai jatuh tegangan pada salah satu atau lebih motor tidak memenuhi standar, maka akan dirancang penambahan kapasitor untuk memperbaiki nilai jatuh tegangan sehingga dapat memenuhi standar.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

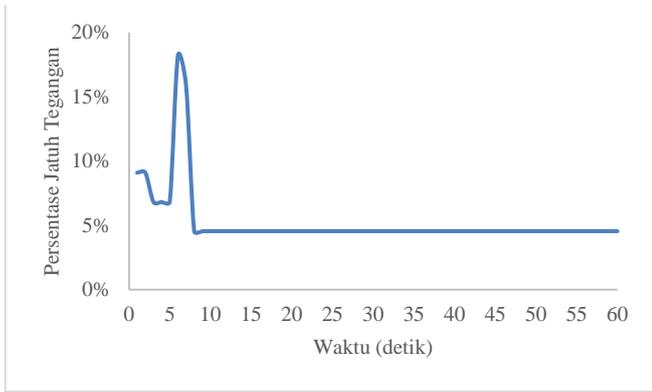
Pada bagian ini disajikan hasil simulasi penyalan masing-masing jenis motor pada derek kontainer. Setiap jenis motor dinyalakan secara bergantian namun dengan total jumlah sesuai terpasang. Sebagai contoh, untuk motor *gantry* yang berjumlah delapan buah, maka jumlah daya dari kedelapan motor tersebut digunakan sebagai daya motor yang dinyalakan dan diamati nilai jatuh tegangan yang terjadi.

Hasil simulasi tegangan untuk masing-masing motor, dimulai dari awal penyalaan di detik ke-0 sampai dengan satu menit ditunjukkan pada gambar 1 – gambar 4.



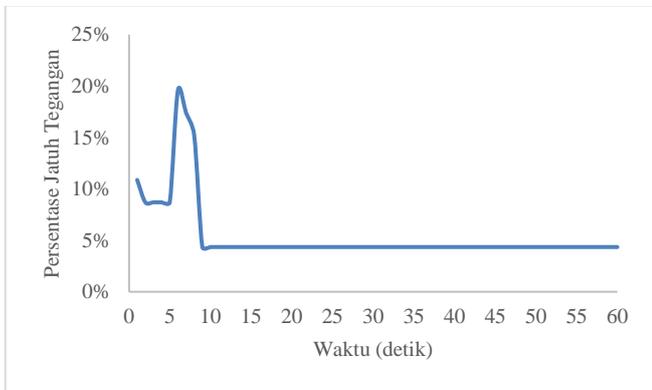
Gambar 1. Hasil simulasi jatuh tegangan motor *gantry*

Gambar 1 menunjukkan hasil simulasi nilai jatuh tegangan pada motor *gantry*. Pada saat awal penyalaan hingga sekitar detik ke-10, nilai jatuh tegangan pada motor melebihi nilai 10% bahkan mencapai lebih dari 20%. Hal ini akibat nilai arus yang besar saat motor baru dinyalakan [20]. Namun setelah motor mencapai kondisi tunak, nilai persentase jatuh tegangan menurun dan stabil pada nilai 6,82%. Dengan demikian, simulasi menunjukkan bahwa tidak ada permasalahan terkait dengan jatuh tegangan pada motor *gantry*. Oleh karena itu, tidak diperlukan penambahan kapasitor pada bus yang terhubung dengan motor *gantry*.



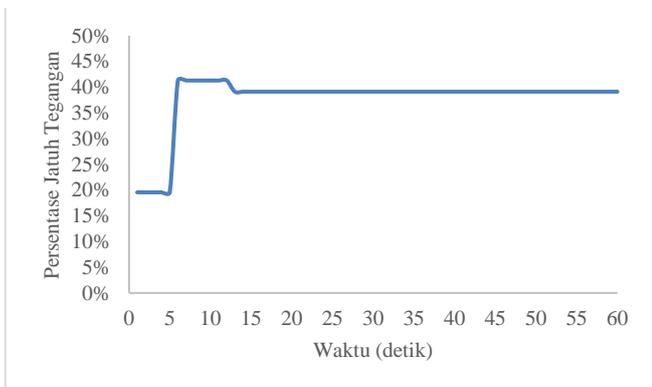
Gambar 2. Hasil simulasi jatuh tegangan motor trolley

Hasil simulasi nilai jatuh tegangan saat penyalaan mula motor trolley tidak jauh berbeda dengan grafik nilai jatuh tegangan motor gantry. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, nilai jatuh tegangan saat awal penyalaan bernilai lebih dari 10%, tetapi tidak sebesar pada motor gantry karena tidak ada nilai yang mencapai 20%. Mulai detik ke-8 dan seterusnya, nilai jatuh tegangan konstan pada nilai 4,5%. Nilai ini masih di dalam standar yang diizinkan.



Gambar 3. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Motor Boom

Motor berikutnya yang dianalisis adalah motor boom. Berbeda dengan dua motor sebelumnya, motor ini menggunakan tegangan masukan 460 V. Hasil simulasi jatuh tegangan dari penyalaan motor boom ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai jatuh tegangan pada motor boom juga sempat melonjak mendekati 20% pada awal penyalaan. Namun pada detik ke-8, nilai jatuh tegangan sudah turun dan konstan pada 4,35%. Nilai jatuh tegangan ini adalah yang paling kecil dibanding dengan nilai jatuh tegangan pada dua motor sebelumnya.



Gambar 4. Hasil simulasi jatuh tegangan motor hoist

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi tegangan jatuh pada motor hoist. Grafik tegangan jatuh pada motor hoist berbeda dibandingkan dengan tiga motor sebelumnya. Nilai jatuh tegangan sejak awal mencapai 20% dan terus meningkat ketika terjadi perubahan rangkaian dari bintang ke delta. Nilai jatuh tegangan tertinggi mencapai 41% pada 12 detik pertama sejak penyalaan motor. Nilai jatuh tegangan sedikit menurun dan kemudian stabil pada 39,13%. Dengan demikian, motor hoist menjadi satu-satunya motor pada sistem derek kontainer yang mengalami jatuh tegangan di atas nilai yang diizinkan berdasarkan standar IEC.

Penyebab nilai jatuh tegangan pada motor hoist bernilai besar dibandingkan dengan jenis motor yang lain kemungkinan karena spesifikasi daya dari motor hoist yang jauh lebih besar. Dengan spesifikasi daya yang besar, nilai arus mula yang ditarik oleh motor menjadi berkali lipat dibanding arus pada kondisi normal, sehingga nilai jatuh tegangan menjadi sangat besar. Dengan demikian, diperlukan penambahan kapasitor untuk menurunkan nilai jatuh tegangan pada motor hoist sehingga dapat memenuhi nilai standar yang diizinkan oleh IEC.

Perbaikan nilai jatuh tegangan pada motor hoist dilakukan dengan pemasangan kapasitor pada bus di motor hoist tersebut. Nilai dari kapasitor yang dipasang dihitung berdasarkan nilai faktor daya pada kondisi semula serta target nilai daya yang diinginkan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai daya reaktif yang dibutuhkan oleh kapasitor adalah sebagai berikut:

$$Q_{cap} = Q_{awal} - Q_{tar} \quad (1)$$

$$Q_{cap} = P \times [\tan(\arccos \theta_{awal}) - \tan(\arccos \theta_{tar})] \quad (2)$$

dimana

Q_{cap} = Daya reaktif kapasitor yang diperlukan

Q_{awal} = Daya reaktif pada sistem sebelum dipasang kapasitor

Q_{target} = Daya reaktif yang diinginkan pada sistem

P = Daya aktif pada sistem

$\cos \theta_{awal}$ = Faktor daya sistem sebelum penambahan kapasitor

$\cos \theta_{awal}$ = Faktor daya yang diinginkan pada sistem

Dengan daya motor hoist sebesar 31,5 kW, nilai faktor daya awal sebesar 0,3 berdasarkan simulasi, serta ditargetkan nilai faktor daya menjadi sebesar 0,85, maka dapat dihitung daya reaktif yang dibutuhkan dari kapasitor dengan perhitungan sebagai berikut:

$$Q_{cap} = 31.500 \times [\tan(\arccos 0,3) - \tan(\arccos 0,85)]$$

$$Q_{cap} = 31.500 \times [\tan(72,54^\circ) - \tan(31,79^\circ)]$$

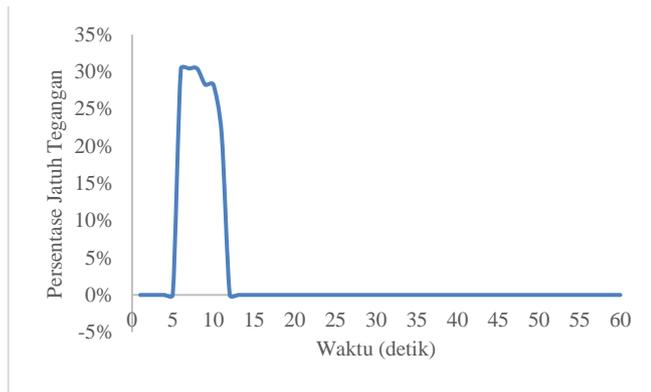
$$Q_{cap} = 31.500 \times [3,18 - 0,62]$$

$$Q_{cap} = 31.500 \times [2,56]$$

$$Q_{cap} = 806.400$$

Berdasarkan nilai tersebut, didapatkan nilai kapasitor yang dibutuhkan dengan daya reaktif sebesar 806,4 kVAR.

Nilai kapasitor berdasarkan perhitungan tersebut kemudian ditambahkan pada rangkaian simulasi pada perangkat lunak, kemudian dilakukan kembali simulasi untuk penyalan motor *hoist*.



Gambar 5. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Motor *Hoist* Setelah Penambahan Kapasitor

Gambar 5 menunjukkan grafik jatuh tegangan motor hoist setelah dipasang kapasitor sesuai perhitungan. Nilai jatuh tegangan masih memiliki nilai lonjakan yang besar mencapai 30%. Akan tetapi nilai tersebut tidak bertahan lama yaitu hanya sekitar 6 detik yaitu pada detik ke-6 sampai dengan ke-11. Setelah terjadi kondisi transien akibat perpindahan rangkaian, nilai jatuh tegangan berada pada nilai 0%. Dengan kata lain, motor hoist mendapat tegangan sesuai dengan kebutuhan. Berdasarkan simulasi tersebut, dengan penambahan kapasitor, motor *hoist* dapat beroperasi dengan menghasilkan torsi sesuai dengan spesifikasi motor tersebut sehingga operasional derek kontainer menjadi lebih optimal.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah disimulasikan penyalan empat jenis motor yang terdapat pada sistem derek kontainer di pelabuhan sesuai dengan data yang ada pada Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Variabel utama yang diamati adalah nilai jatuh tegangan pada masing-masing motor yang diakibatkan oleh arus mula pada saat penyalan. Hasil simulasi pada tiga jenis motor yaitu motor *gantry*, motor *trolley* dan motor *boom* menunjukkan bahwa jatuh tegangan yang terjadi pada ketiga motor tersebut masih memenuhi standar yang diberikan oleh IEC. Dari ketiga motor tersebut, motor gantry memiliki total daya terbesar yaitu 120 kW. Hasil yang berbeda didapatkan ketika dilakukan simulasi penyalan motor *hoist* yang memiliki daya sebesar 315 kW. Hasil simulasi jatuh tegangan motor hoist berada di luar standar yang diizinkan. Oleh karena itu ditambahkan kapasitor sebesar 806,4 kVAR untuk menanggulangi permasalahan tersebut. Setelah penambahan kapasitor, nilai jatuh tegangan pada motor *hoist* menjadi 0% saat mencapai kondisi tunak.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Lister, "Green Shipping: Governing Sustainable Maritime Transport," *Glob Policy*, vol. 6, no. 2, pp. 118–129, May 2015, doi: 10.1111/1758-5899.12180.

[2] S. Majune and A. F. Montfaucon, "Trade Policies and Sea and Air freight The Impact of COVID-19 Lockdowns on Imports and Exports," 2023. [Online]. Available: <http://www.worldbank.org/prwp>. [1]

[3] A. Kurniawan and E. Shintaku, "Determining the optimal inclination and orientation angles of solar panels installed on ship," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 10, no. 1, pp. 45–53, 2020.

[4] H. Liu, M. Chen, Z. Han, H. Zhou, and L. Li, "Feasibility Study of a Novel Open Ocean Aquaculture Ship Integrating with a Wind Turbine and an Internal Turret Mooring System," *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/jmse10111729.

[5] S. Atilhan, S. Park, M. M. El-Halwagi, M. Atilhan, M. Moore, and R. B. Nielsen, "Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 31. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.coche.2020.100668.

[6] L. Adam, "KEBIJAKAN KONEKTIVITAS MARITIM DI INDONESIA," *Politica*, vol. 6, no. 1, pp. 20–41, Mar. 2015. [Online]. Available: http://jkw4p.com/download/nawa_cita.pdf.

[7] M. Mac Kinnon, G. Razeghi, and S. Samuelsen, "The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147. Elsevier Ltd, Sep. 01, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.111226.

[8] Statista Research Department, "Number of ships in the world merchant fleet," 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type/>

[9] J. H. Jo and S. Kim, "Key performance indicator development for ship-to-shore crane performance assessment in container terminal operations," *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/JMSE8010006.

[10] A. A. Masroeri, E. S. Koenhardono, and F. F. Asshanti, "Analysis of Electrical Power Consumption in Container Crane of Container Terminal Surabaya," *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 2, no. 1, pp. 86–93, 2017, doi: 10.12962/j25481479.v2i1.2623.

[11] R. O. S. Gurning and D. I. Tangkau, "The Analysis of the Conceptual Framework of Green Port Implementation in Indonesia Using Circular Economy: The Case Study of Benoa Public and Fishing Terminals," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/su14106083.

[12] I. Ranu Kusuma, B. Zaman, and F. Muhammad Satrio, "Designing Passive Harmonic Filter of Electric Propulsion System on Tanker Ship," *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 2, no. 3, pp. 2548–1479, 2018.

[13] D. Cahyagi and E. S. Koenhardono, "Study of Shipboard Power Distribution System: Review on an Application of AC Zonal Distribution," *Journal of Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 2337–8530, 2018.

[14] S. Sarwito, E. S. Koenhardono, and K. P. T. Martha, "Analysis of Transient Response and Harmonic Disturbances on the Tanker's Electrical System Based on Simulation," *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 3, no. 1, pp. 27–33, 2018.

[15] A. Kurniawan, J. Prananda, E. Koenhardono, S. Sarwito, I. R. Kusuma, and A. A. Masroeri, "Pelatihan Analisis Sistem Kelistrikan Kapal Menggunakan Perangkat Lunak untuk Fresh Graduate Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS," *Sewagati*, vol. 6, no. 2, pp. 1–6, Feb. 2022, doi: 10.12962/j26139960.v6i2.137.

[16] A. Paramonov, S. Oshurbekov, V. Kazakbaev, V. Prakht, and V. Dmitrievskii, "Investigation of the Effect of the Voltage Drop and Cable Length on the Success of Starting the Line-Start Permanent Magnet Motor in the Drive of a Centrifugal Pump Unit," *Mathematics*, vol. 11, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/math11030646.

[17] A. R. Kurniawan, A. Kurniawan, S. Sarwito, A. R. N. Gumilang, and F. Budiarto, "Power flow analysis of DC distribution system in a ship with non-electric propulsion," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 13, no. 1, p. 9, Feb. 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp9-16.

[18] D. Fasha and S. Sarwito, "Power Flow Study on Container Crane with Simulation-Based Renewable Energy Supply," *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 5, no. 4, p. 242, 2020.

[19] Iec, "Low-voltage electrical installations-Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions Low-voltage electrical installations-Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher," 2005. [Online]. Available: www.iec.ch

[20] A. Dwismara, G. Junio, and M. T. Setiawan, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Melalui Arus Rotor Menggunakan PI," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 7, no. 2, pp. 40–42, 2020.

