

SKRIPSI

**PEMODELAN PENEREMAN REGENERATIF PADA
HYBRID RUBBER TIRED GANTRY CRANE**

Disusun dan diajukan oleh

**ANUGRAH AGUNG SAPUTRA
D041 18 1513**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**PEMODELAN Pengereman Regeneratif pada Rubber Tired Gantry Crane**

Disusun dan diajukan oleh:

**ANUGRAH AGUNG SAPUTRA
D041181513**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 13 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,




Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T.
Nip. 19601106 198601 2 001



Ir. Gassing, M.T.
Nip. 19600720 198702 1 001

Ketua Departemen Teknik Elektro,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Anugrah Agung Saputra
NIM : D041181513
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PEMODELAN Pengereman Regeneratif pada Hybrid Rubber Tired Gantry Crane

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Januari 2023

Yang menyatakan



Anugrah Agung Saputra

ABSTRAK

ANUGRAH AGUNG SAPUTRA. *Pemodelan Pengereman Regeneratif pada Rubber Tired Gantry Crane* (dibimbing oleh Sri Mawar Said dan Gassing).

Rubber tired gantry (RTG) *crane* adalah *crane* yang digunakan untuk menumpuk kontainer di lapangan pelabuhan. Ketika rubber tired gantry *crane* menurunkan kontainer, motor pengangkat bertindak sebagai generator, menghasilkan energi yang dapat diserap apabila RTG *crane* memiliki sistem penyimpanan energi sehingga akan meningkatkan efisiensi dari RTG *crane*. Dalam tugas akhir ini, dilakukan pemodelan RTG *crane* dengan tambahan baterai (hybrid) sebagai sumber energi alternatif, kemudian melakukan perbandingan energi yang digunakan antara konvensional dan hybrid RTG *crane*. Pemodelan dilakukan menggunakan Matlab Simulink, dengan mengikuti spesifikasi *crane* yang ada di PT Pelindo Makassar New Port. Pemodelan dilakukan dengan memodelkan sumber 3 fasa, Bus DC, Pengereman resistor, baterai, motor *hoist*, dll. Pada tugas akhir ini, dilakukan simulasi dengan kapasitas dan kemampuan daya *charging/discharging* baterai dengan mengubah konfigurasi dari baterai, sehingga simulasi dilakukan dengan beberapa skenario yaitu konvensional (tanpa baterai) dan 3 jenis *hybrid* yaitu *hybrid A*, *hybrid B* dan *hybrid C* kemampuan daya *charging/discharging* secara berurut sebesar 46,704 kWh, 93,408 kWh dan 140,112. Hasil analisis dari penelitian ini diperoleh bahwa untuk menyerap seluruh daya regeneratif, maka diperlukan baterai dengan kemampuan penyerapan daya minimal 139 kW. Adapun penggunaan energi dari hybrid jika dibandingkan dengan konvensional sebesar 51,3% – 70,5% untuk *hybrid A*, 39,1% – 48,8% untuk *hybrid B*, dan 0,297% – 0,486% untuk *hybrid C*.

Kata Kunci: RTG *Crane*, Baterai, Pengereman Regeneratif, Matlab Simulink, Energi.

ABSTRACT

ANUGRAH AGUNG SAPUTRA. Regenerative Braking Modeling on Rubber Tired Gantry Crane (supervised by Sri Mawar Said and Gassing).

Rubber tired gantry (RTG) crane is crane used for stacking containers in the port yard. When the rubber tired gantry crane lowering the container, the lifting motor acts as a generator, producing energy that can be absorbed if RTG crane has an energy storage system so that it will increase the efficiency of the RTG crane. In this final project, RTG modeling is carried out crane with the addition of a battery (hybrid) as an alternative energy source, then do a comparison of the energy used between conventional and hybrid RTG crane. Modeling is done using Matlab Simulink, following the specifications crane at PT Pelindo Makassar New Port. Modeling is done by modeling a 3 phase source, DC Bus, Braking resistor, battery, motor hoist, etc. In this final project, a simulation is carried out with power capacity and capability charging/discharging battery by changing the configuration of the battery, so that the simulation is carried out with several scenarios, namely conventional (without battery) and 3 types hybrid that is hybrid A, hybrid B and hybrid C the charging/discharging power capability is respectively 46.704 kWh, 93.408 kWh and 140.112. The results of the analysis of this study show that in order to absorb all the regenerative power, a battery with a minimum capacity of 139 kW is needed. The energy use from hybrid when compared to conventional is 51.3% – 70.5% for hybrid A, 39.1% – 48.8% for hybrid B, and 0.297% – 0.486% for hybrid C.

Keywords: RTG Crane, Battery, Regenerative Braking, Matlab Simulink, Energy.

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xii
KATA PENGANTAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Rubber Tyred Gantry Crane	4
2.2 Motor Induksi 3 Fasa	7
2.3 Pengereman Regeneratif	8
2.4 Variable Frequency Drives	9
2.5 Kontrol Proportional Integral	10
2.6 Field Oriented Control	11
2.7 Konverter DC-DC	14
2.8 Generator Modulasi Lebar Pulsa	15
2.9 Baterai	16
BAB III METODE PENELITIAN	18
3.1 Jenis Penelitian	18
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.3 Alat dan Bahan	19
3.4 Blok Diagram Pemodelan RTG Crane	19
3.5 Diagram Fishbone Penelitian	20
3.6 Diagram Alir Penelitian	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Data	22

4.2 Skenario	23
4.3 Pemodelan RTG <i>Crane</i> Konvensional	26
4.4 Pemodelan Hybrid RTG Crane.....	30
4.5 Hasil Simulasi.....	34
4.6 Energi yang Digunakan	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1 Kesimpulan.....	68
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Sistem kelistrikan RTG <i>crane</i> (Papaioannou, Pietrosanti, Holderbaum, Becerra, & Mayer, 2017)	4
Gambar 2 RTG <i>crane</i> dan gerakannya (Papaioannou, Pietrosanti, Holderbaum, Becerra, & Mayer, 2017)	5
Gambar 3 Aktivitas ekspor dan impor (Pietrosanti, 2018)	6
Gambar 4 Grafik operasi motor induksi 3 fasa (Mahapatra, 2014)	8
Gambar 5 Rangkaian <i>Variable Frequency Drives</i> (Ayman, 2022).....	9
Gambar 6 Blok diagram sistem pengontrolan motor induksi menggunakan <i>field oriented control</i> (Fauzi, Happiyanto, & Sulistijono, 2014)	11
Gambar 7 Transformasi park dan clarke algoritma FOC (Fattah, 2015).....	12
Gambar 8 Konverter DC-DC (Pratiwi, 2020).....	14
Gambar 9 Sinyal <i>carrier</i> dan output dari PWM (Mathworks, 2023).....	15
Gambar 10 Baterai (Ceder, Hautier, Jain, & Ong, 2012).....	16
Gambar 11 Lokasi penelitian pada jalan Makassar New Port	18
Gambar 12 Blok diagram RTG <i>crane hybrid</i>	19
Gambar 13 Diagram fishbone penelitian	20
Gambar 14 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 15 Siklus kerja RTG <i>crane</i>	23
Gambar 16 Grafik kecepatan vertikal kontainer 20 ton	26
Gambar 17 Pemodelan RTG <i>crane</i> konvensional.....	26
Gambar 18 Blok diagram berat ke torsi	27
Gambar 19 Blok diagram kecepatan vertikal ke kecepatan putar motor	28
Gambar 20 Blok diagram motor controller.....	28
Gambar 21 Blok diagram alat ukur.....	29
Gambar 22 Blok diagram pengereman resistor.....	29
Gambar 23 Pemodelan <i>hybrid</i> RTG <i>crane</i>	30
Gambar 24 Blok diagram konverter DC-DC dan baterai.....	31
Gambar 25 Blok diagram baterai kontroler	33
Gambar 26 Grafik daya PLN kontainer 4,67 ton	34
Gambar 27 Grafik daya PLN kontainer 6 ton	34
Gambar 28 Grafik Daya PLN Kontainer 8 Ton.....	35
Gambar 29 Grafik daya PLN kontainer 10 ton	35
Gambar 30 Grafik daya PLN kontainer 12 ton	36
Gambar 31 Grafik daya PLN kontainer 14 ton	36
Gambar 32 Grafik daya PLN kontainer 16 ton	36
Gambar 33 Grafik daya PLN kontainer 18 ton	37

Gambar 34 Grafik daya PLN kontainer 20 ton	37
Gambar 35 Grafik daya PLN kontainer 22 ton	38
Gambar 36 Grafik daya PLN kontainer 24 ton	38
Gambar 37 Grafik daya PLN kontainer 26 ton	38
Gambar 38 Grafik daya PLN kontainer 28 ton	39
Gambar 39 Grafik daya PLN kontainer 30 ton	39
Gambar 40 Grafik daya PLN kontainer 32 ton	40
Gambar 41 Grafik daya PLN kontainer 34 ton	40
Gambar 42 Grafik daya baterai kontainer 4,67 ton.....	41
Gambar 43 Grafik daya baterai kontainer 6 ton.....	41
Gambar 44 Grafik daya baterai kontainer 8 ton.....	42
Gambar 45 Grafik daya baterai kontainer 10 ton.....	42
Gambar 46 Grafik daya baterai kontainer 12 ton.....	43
Gambar 47 Grafik daya baterai kontainer 14 ton.....	43
Gambar 48 Grafik daya baterai kontainer 16 ton.....	44
Gambar 49 Grafik daya baterai kontainer 18 ton.....	44
Gambar 50 Grafik daya baterai kontainer 20 ton.....	45
Gambar 51 Grafik daya baterai kontainer 22 ton.....	45
Gambar 52 Grafik daya baterai kontainer 24 ton.....	46
Gambar 53 Grafik daya baterai kontainer 26 ton.....	46
Gambar 54 Grafik daya baterai kontainer 28 ton.....	47
Gambar 55 Grafik daya baterai kontainer 30 ton.....	47
Gambar 56 Grafik daya baterai kontainer 32 ton.....	48
Gambar 57 Grafik daya baterai kontainer 34 ton.....	48
Gambar 58 Grafik daya pengereman resistor kontainer 4,67 ton	49
Gambar 59 Grafik daya pengereman resistor kontainer 6 ton	50
Gambar 60 Grafik daya pengereman resistor kontainer 8 ton	50
Gambar 61 Grafik daya pengereman resistor kontainer 10 ton	50
Gambar 62 Grafik daya pengereman resistor kontainer 12 ton	51
Gambar 63 Grafik daya pengereman resistor kontainer 14 ton	51
Gambar 64 Grafik daya pengereman resistor kontainer 16 ton	52
Gambar 65 Grafik daya pengereman resistor kontainer 18 ton	52
Gambar 66 Grafik daya pengereman resistor kontainer 20 ton	52
Gambar 67 Grafik daya pengereman resistor kontainer 22 ton	53
Gambar 68 Grafik daya pengereman resistor kontainer 24 ton	53
Gambar 69 Grafik daya pengereman resistor kontainer 26 ton	54
Gambar 70 Grafik daya pengereman resistor kontainer 28 ton	54
Gambar 71 Grafik daya pengereman resistor kontainer 30 ton	54
Gambar 72 Grafik daya pengereman resistor kontainer 32 ton	55
Gambar 73 Grafik daya pengereman resistor kontainer 34 ton	55

Gambar 74 Grafik tegangan bus DC kontainer 4,67 ton.....	56
Gambar 75 Grafik tegangan bus DC kontainer 6 ton.....	56
Gambar 76 Grafik tegangan bus DC kontainer 8 ton.....	57
Gambar 77 Grafik tegangan bus DC kontainer 10 ton.....	57
Gambar 78 Grafik tegangan bus DC kontainer 12 ton.....	58
Gambar 79 Grafik tegangan bus DC kontainer 14 ton.....	58
Gambar 80 Grafik tegangan bus DC kontainer 16 ton.....	58
Gambar 81 Grafik tegangan bus DC kontainer 18 ton.....	59
Gambar 82 Grafik tegangan bus DC kontainer 20 ton.....	59
Gambar 83 Grafik tegangan bus DC kontainer 22 ton.....	60
Gambar 84 Grafik tegangan bus DC kontainer 24 ton.....	60
Gambar 85 Grafik tegangan bus DC kontainer 26 ton.....	61
Gambar 86 Grafik tegangan bus DC kontainer 28 ton.....	61
Gambar 87 Grafik tegangan bus DC kontainer 30 ton.....	61
Gambar 88 Grafik tegangan bus DC kontainer 32 ton.....	62
Gambar 89 Grafik tegangan bus DC kontainer 34 ton.....	62
Gambar 90 Total penggunaan energi	65
Gambar 91 Persentase penggunaan energi.....	67

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 1 Data motor <i>hoist</i>	22
Tabel 2 Data kontainer	22
Tabel 3 Data pendukung	23
Tabel 4 Siklus kerja gerakan impor RTG <i>crane</i>	24
Tabel 5 Kecepatan dan waktu <i>hoist</i> terhadap berat kontainer.....	25
Tabel 6 Spesifikasi baterai	31
Tabel 7 Konfigurasi baterai dan parameternya	31
Tabel 8 Parameter konverter DC-DC.....	33
Tabel 9 penggunaan energi PLN.....	63
Tabel 10 <i>State of Charge</i> baterai.....	64
Tabel 11 Total penggunaan energi.....	65
Tabel 12 Persentase penggunaan energi	66

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Dimensi RTG <i>Crane</i>	72
Lampiran 2 Single Line Diagram RTG Crane.....	73
Lampiran 3 Spesifikasi baterai.....	74
Lampiran 4 Bus DC overvoltage.....	74
Lampiran 5 Spesifikasi motor hoist	75

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
RTG	Rubber Tired Gantry
PI	Proportional Integral
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
SoC	State of Charge (%)
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
FOC	Field Oriented Control
Ψ	Flux (Wb)
R	Resistansi (Ω)
L	Induktansi (H)
C	Kapasitansi (F)
Lm	Mutual induktansi (H)
Lr	Induktansi rotor (H)
Rr	Resistansi rotor (Ω)
Ls	Induktansi stator (H)
Rr	Resistansi rotor (Ω)
T	Torsi (Nm)
θ	Sudut ($^{\circ}$)
S	Slip (%)
Ns	Kecepatan sinkron (rpm)
Nr	Kecepatan putar rotor (rpm)
V	Tegangan (V)
I	Arus (A)
D	Duty Cycle (%)
P	Daya (W)
V_{high}	Tegangan sisi tegangan tinggi (V)

V_{low}	Tegangan sisi tegangan rendah (V)
C_{high}	Kapasitor sisi tegangan tinggi (F)
C_{low}	Kapasitor sisi tegangan rendah (F)
f	Frekuensi (Hz)
p	Jumlah kutub Stator

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pemodelan Pengereman Regeneratif pada *Hybrid Rubber Tired Gantry Crane*”. Skripsi ini diajukan guna memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Strata 1 (S1) Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Keberhasilan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis dan seluruh keluarga yang telah mendidik, mendoakan, memberikan dukungan, nasehat dan motivasi kepada penulis.
2. Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. Dosen Pembimbing I dan Bapak Ir. Gassing, M.T. selaku Dosen Pembimbing II.
3. Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku dosen penguji.
4. Kepada seluruh staff divisi teknik PT. PELINDO New Port yang telah membantu dalam proses pengambilan data.
5. Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, Para Dosen, Staf Pengajar, Laboran, dan Staf Administrasi Departemen Teknik Elektro
6. Kepada seluruh elemen “CAL18RATOR” yang telah menjadi komponen penting dalam usaha mencapai cita-cita.
7. Kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan yang penulis tidak sempat sebutkan.

Gowa, 24 Januari 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengiriman barang dilakukan di seluruh dunia dengan laju pengiriman yang belum pernah terjadi sebelumnya, barang dikirim melalui darat, udara dan laut. Terminal peti kemas menangani pemindahan kargo melalui laut. Pada terminal peti kemas, ada beberapa jenis *crane* yang beroperasi. Pertama ada *crane ship-to-shore* (STS), yang memindahkan kontainer dari kapal ke truk kontainer dan sebaliknya. Kemudian kontainer dibawa oleh truk kontainer menuju lapangan kontainer untuk ditumpuk. Di terminal yang kecil, penumpukan ini dapat dilakukan oleh pengangkut *straddle*, tetapi di terminal besar penumpukan ini dilakukan menggunakan *rubber tired gantry* (RTG) *crane*.

RTG *crane* melakukan pengereman saat beroperasi, ketika RTG *crane* menurunkan kontainer, motor pengangkat (*hoist*) bertindak sebagai generator, menghasilkan energi regeneratif. RTG *crane* konvensional mengkonversi energi yang diregenerasi melalui resistor pengereman dalam bentuk panas, yang mengakibatkan energi dari pengereman regeneratif tidak dapat digunakan. Apabila RTG *crane* dilengkapi dengan perangkat penyimpanan energi, energi dari pengereman regeneratif dapat diserap yang dapat digunakan untuk gerakan RTG *crane* selanjutnya sehingga akan meningkatkan efisiensi dari RTG *crane*.

Saat ini telah banyak dilakukan penelitian tentang pemodelan *hybrid* RTG *crane* dengan perangkat penyimpanan energi yang berbeda-beda, adapun perangkat penyimpanan energinya yaitu baterai, *ultra* kapasitor dan *flywheel*. Pada tugas akhir ini, perangkat penyimpanan yang digunakan adalah baterai dan penelitian dilakukan di PT PELINDO Makassar New Port. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan beberapa variasi berat kontainer dan kapasitas baterai, sehingga dengan tugas akhir ini pemilihan kapasitas baterai yang tepat dalam pengembangan RTG *crane* dapat dilakukan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat pemodelan rtg crane konvensional dan hybrid?
2. Bagaimana cara menentukan kapasitas baterai yang dibutuhkan agar dapat menyerap seluruh daya regeneratif?
3. Bagaimana kurva beban dari RTG *crane* konvensional dan *hybrid*?
4. Bagaimana perbandingan penggunaan energi dari pemodelan RTG *crane* konvensional dan *hybrid*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pemodelan hybrid rtg crane konvensional dan hybrid sehingga simulasi dapat dilakukan.
2. Mengetahui kapasitas baterai yang dibutuhkan agar dapat menyerap seluruh daya regeneratif.
3. Menganalisis kurva beban dari RTG *crane* konvensional dan *hybrid*.
4. Mengetahui perbandingan penggunaan energi dari pemodelan RTG *crane* konvensional dan *hybrid*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dengan pemodelan di matlab dapat diketahui besar energi yang dapat dihasilkan dari pengereman regeneratif.
2. Dapat menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang berhubungan dengan pengereman regeneratif pada RTG *crane*.
3. Dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pihak pengembang sistem RTG *crane* konvensional menjadi RTG *crane hybrid*.

1.5 Batasan Masalah

Mengingat ruang lingkup yang luas dalam menyelesaikan permasalahan tugas akhir ini, maka batasan masalah yang diperlukan adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan menggunakan Matlab Simulink.
2. Pemodelan yang dilakukan adalah pemodelan motor hoist RTG *crane*.
3. Simulasi yang dilakukan merupakan gerakan impor dari RTG *crane*.
4. Data yang diambil berdasarkan salah satu RTG *crane* di PT. PELINDO Makassar Newport.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi gambaran awal dari tugas akhir ini, berupa latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang mendasari proses pengambilan dan pengolahan data serta penarikan kesimpulan akhir dari penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode pelaksanaan penelitian, lokasi penelitian, waktu penelitian, dan proses pengambilan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data yang telah diperoleh dan dianalisis sesuai dengan kebutuhan penelitian.

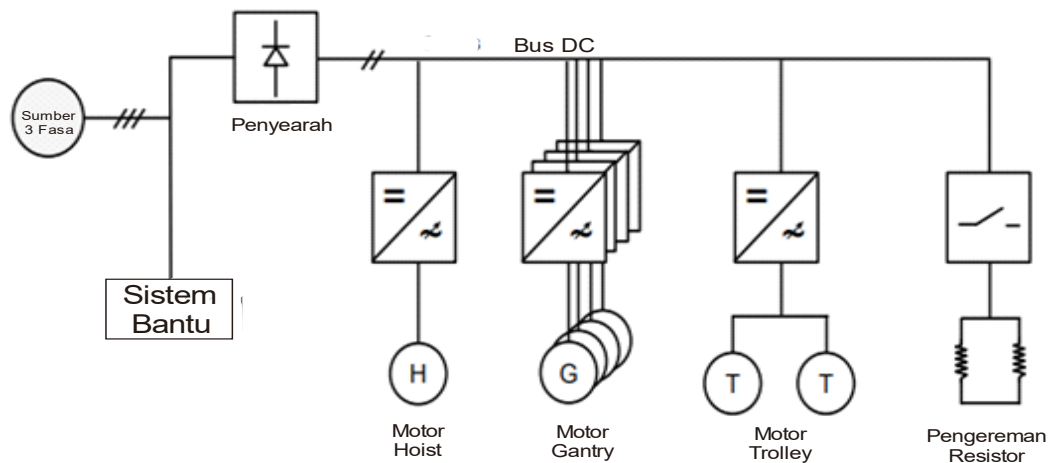
BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Rubber Tyred Gantry Crane

Rubber tyred gantry (RTG) crane adalah *crane* yang digunakan untuk menumpuk kontainer di lapangan pelabuhan. Seperti namanya, *crane* ini memiliki 8 atau 16 roda yang mampu menangani kontainer 20 hingga 40 kaki dengan berat hingga 40 ton. Sistem kelistrikan dari RTG crane dapat dilihat pada Gambar 1 (Bolonne & Chandima, 2018).



Gambar 1 Sistem kelistrikan RTG *crane* (Papaioannou, Pietrosanti, Holderbaum, Becerra, & Mayer, 2017)

RTG *crane* memiliki bus DC yang terkoneksi ke inverter, dimana dioda penyearah akan mengkonversi sumber AC 3 fasa menjadi DC yang akan dikonversikan kembali menjadi AC 3 fasa menggunakan inverter. Energi dari pengereman regeneratif akan mengalir ke bus DC, sehingga motor lain dapat menggunakan sebagian dari energi regeneratif, sedangkan kelebihan energinya akan dibuang ke rem resistor. Rem resistor digunakan untuk membuang energi regeneratif ketika pengereman (kontainer diturunkan) yang secara otomatis akan aktif dengan naiknya nilai tegangan bus DC pada nilai tertentu. Pada bus DC ini, juga dapat ditambahkan penyimpanan energi yang dapat di *charge* dan *discharge* oleh motor yang terhubung ke bus DC (Pietrosanti, 2018).



Gambar 2 RTG *crane* dan gerakannya (Papaioannou, Pietrosanti, Holderbaum, Becerra, & Mayer, 2017)

Adapun gerakan-gerakan berdasarkan jenis motor yang dilakukan oleh RTG *crane* dapat dilihat pada Gambar 2 adalah sebagai berikut:

1. Troli bergerak horizontal dalam arah tegak lurus terhadap panjang kontainer. Jenis gerakan ini dikenal sebagai “gerakan troli”;
2. Gerakan ke atas dan ke bawah dari spreader dilakukan dengan memutar drum utama yang digabungkan ke motor *hoist*. Ini disebut “gerakan *hoist*”;
3. “Gerakan *gantry*” didefinisikan sebagai gerakan seluruh *crane* di sepanjang tumpukan kontainer menggunakan empat set roda karet (Papaioannou, Pietrosanti, Holderbaum, Becerra, & Mayer, 2017).

Aktivitas RTG *crane* dapat dibagi menjadi empat kategori, yaitu: *housekeeping*, gerakan *gantry*, waktu idle, dan impor dan ekspor.

2.1.1 Housekeeping

Ketika kontainer yang perlu diangkat oleh *crane* tidak dapat diakses karena berada di bawah satu atau lebih kontainer, sehingga perlu untuk memposisikan ulang tumpukan untuk mengakses kontainer tertentu.

2.1.2 Gerakan Gantry

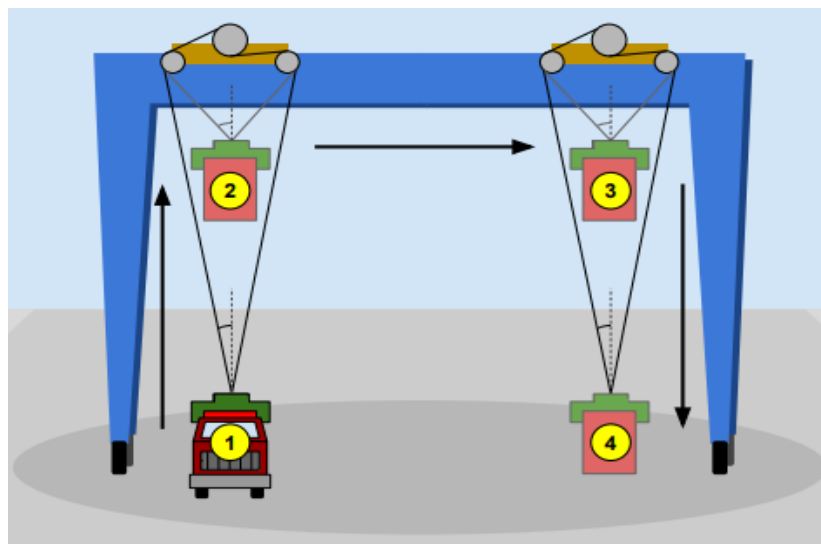
RTG *crane* memiliki roda yang memungkinkannya bergerak secara horizontal di sepanjang lapangan. Gerakan *gantry* relatif jarang jika dibandingkan dengan gerakan *hoist* dan juga energi yang digunakan sedikit.

2.1.3 Waktu idle

RTG *crane* dapat menghabiskan sebagian besar waktu menunggu truk yang membawa kontainer tiba. Proporsi waktu ini tergantung pada tingkat aktivitas terminal, tetapi biasanya berkisar antara 20% hingga 60%.

2.1.4 Impor dan ekspor

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, ketika kontainer dipindahkan ke lapangan kontainer, terdapat tiga fase: dari titik 1 ke titik 2 dengan gerakan vertikal ke ketinggian yang aman, gerakan horizontal ke titik 3 di atas baris tujuan, dan selanjutnya gerakan vertikal ke bawah ke posisi akhir (titik 4). Ketinggian yang dicapai kontainer tergantung pada berbagai faktor termasuk keberadaan kontainer lain di lapangan, karena tidak perlu mencapai puncak *crane* untuk setiap pengangkatan (Pietrosanti, 2018).



Gambar 3 Aktivitas ekspor dan impor (Pietrosanti, 2018)

2.2 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa merupakan motor arus bolak-balik 3 fasa yang paling luas penggunaannya. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor pada motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator (Wijaya, 2001).

Kelebihan dari motor induksi 3 fasa, yaitu: mempunyai konstruksi yang sederhana, relatif lebih murah harganya bila dibandingkan dengan jenis motor yang lainnya, menghasilkan putaran yang konstan, mudah perawatannya, untuk pengasutan tidak memerlukan motor lain sebagai penggerak mula. tidak membutuhkan sikat-sikat, sehingga rugi gesekan bisa dikurangi. Kekurangan dari motor induksi 3 fasa, yaitu: putarannya sulit diatur, arus asut yang cukup tinggi berkisar antara 5 hingga 6 kali arus nominal motor (Sumardjati, Yahya, & Mashar, 2008).

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan sinkron.

$$N_s = \frac{120f}{2p} \quad (1)$$

Dimana,

f : Frekuensi (Hz),

N_s : Kecepatan sinkron (rpm),

p : Kutub magnet.

Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor. Adanya arus pada belitan rotor akan menimbulkan medan magnet dan gaya pada rotor. Syarat terinduksinya tegangan pada rotor adalah adanya perbedaan kecepatan relatif (slip) antara kecepatan putar stator (N_s) dan kecepatan putar rotor (N_r). Kecepatan relatif dapat dituliskan sebagai berikut (Wijaya, 2001):

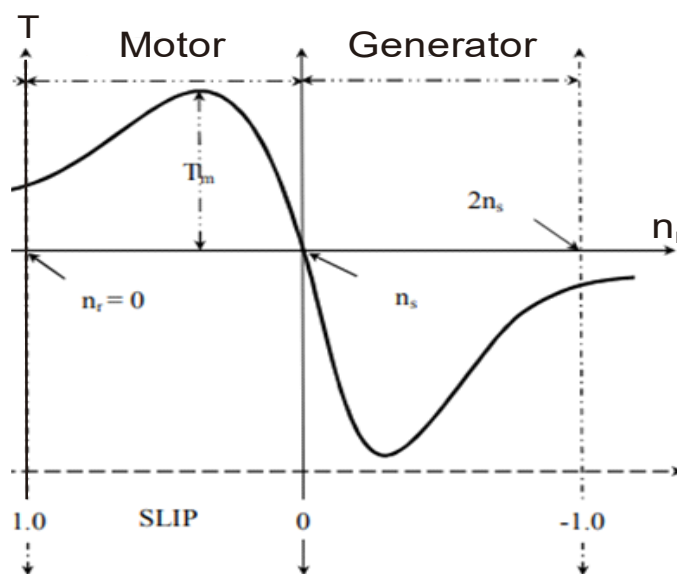
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2)$$

dimana,

N_r : Kecepatan putar rotor (rpm),

S : Slip (%).

2.3 Pengereman Regeneratif

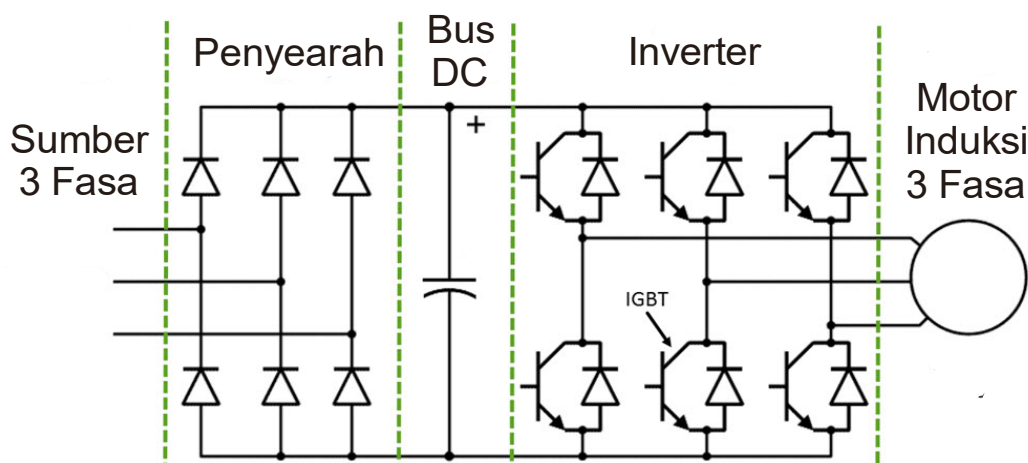


Gambar 4 Grafik operasi motor induksi 3 fasa (Mahapatra, 2014)

Mode operasi pembangkit digunakan dalam beberapa aplikasi penggerak untuk memberikan pengereman regeneratif. Sebagai contoh, motor induksi atau motor asinkron yang terhubung dengan *variable frequency drives* (VFD) untuk mengontrol kecepatan sistem penggerak. Untuk menghentikan sistem penggerak, frekuensi suplai dikurangi secara bertahap, sehingga kecepatan sesaat sistem penggerak lebih tinggi daripada kecepatan sinkron yang dapat dilihat pada Gambar 4. Akibatnya, aksi pembangkitan dari mesin induksi akan menyebabkan aliran daya berbalik arah dan energi kinetik dari sistem penggerak akan diumpankan kembali ke sumber. Proses ini dikenal sebagai pengereman regeneratif (Sen, 2014).

2.4 Variable Frequency Drives

Variable frequency drives (VFD) mengubah kecepatan motor dengan mengubah tegangan dan frekuensi daya yang disuplai ke motor. VFD mengontrol kecepatan motor dengan memvariasikan tegangan dan frekuensi keluaran. Tegangan suplai tiga fasa pertama-tama melewati unit penyearah gelombang penuh tiga fasa yang akan diubah menjadi suplai DC. Bus DC terdiri dari bagian filter di mana harmonik yang dihasilkan selama konversi AC ke DC disaring. DC yang difilter melewati inverter yang terdiri dari enam IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) sehingga DC diubah menjadi gelombang sinusoidal (AC) yang disuplai ke motor induksi yang terhubung dengannya. Kecepatan motor (rpm) bergantung pada frekuensi, oleh karena itu dengan memvariasikan frekuensi catu daya melalui VFD untuk mengontrol kecepatan motor (Aditya, 2013).



Gambar 5 Rangkaian *Variable Frequency Drives* (Ayman, 2022)

Dikarenakan adanya perubahan nilai tegangan dari 3 fasa menjadi DC, maka digunakan Persamaan 3 (Mathworks, Average-Value Rectifier (Three-Phase), 2023).

$$V_{DC} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{RMS} \quad (3)$$

dimana,

V_{DC} : Tegangan DC (V),

V_{RMS} : Tegangan 3 fasa *root mean square* (V).

2.5 Kontrol Proportional Integral

Kontrol PI (*Proportional Integral*) merupakan suatu pengendali yang mampu memperbaiki tingkat akurasi dari suatu sistem yang memiliki karakteristik umpan balik pada sistem tersebut. Kontrol PI berfungsi untuk menghitung dan meminimalisasi nilai error/selisih antara output dari proses terhadap input yang diberikan ke sistem (Jepry, 2010).

2.5.1 Proporsional

Penggunaan proporsional cukup penting dalam memperbaiki waktu respon (responsivitas) sistem. Dalam kinerjanya proporsional memiliki ciri sebagai berikut:

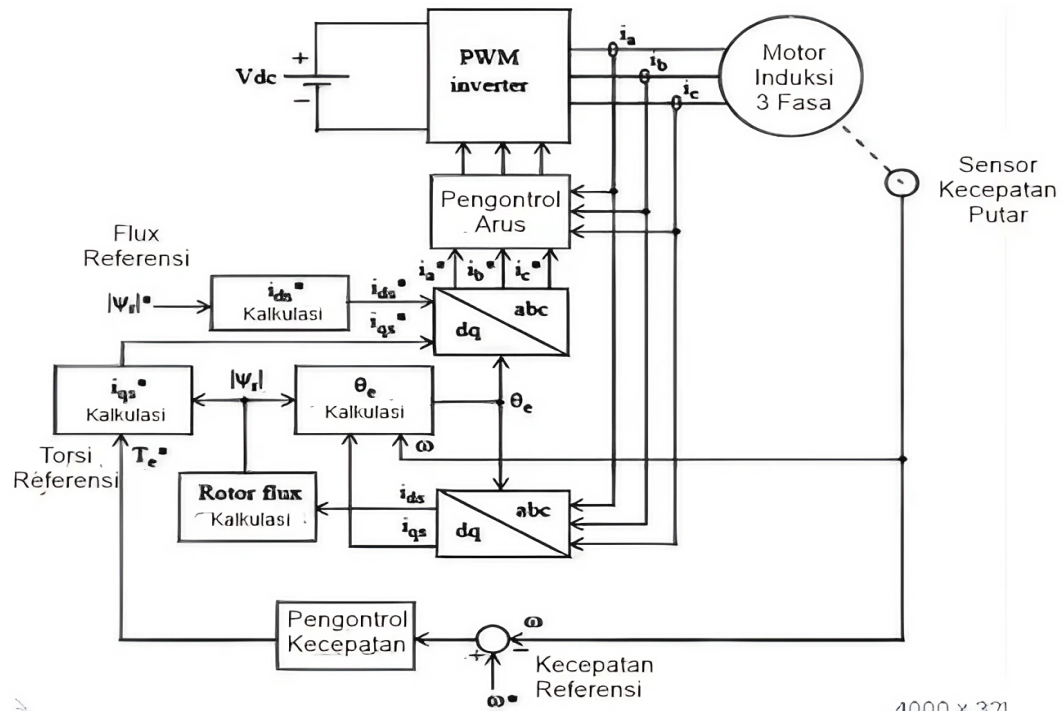
- a. Apabila nilai Proporsional kecil maka proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil pula dan menjadikan respon sistem yang lambat atau secara konsep menambah waktu respon pada sistem menjadi lebih lama.
- b. Apabila nilai Proporsional diperbesar membuat waktu respon sistem menjadi lebih cepat mencapai kondisi yang diinginkan, tetapi jika nilai ini terlalu besar akan membuat osilasi (ketidakstabilan) pada kerja sistem.

2.5.2 Integral

Nilai integral umumnya memiliki besaran yang amat kecil karena sistem akan mengalami osilasi apabila memiliki nilai yang cukup besar. Dalam kinerjanya integral memiliki ciri berupa:

- a. Pengatur integral umumnya memperlambat respon karena butuh selang waktu tertentu dalam mengakumulasi error.
- b. Semakin besar nilai integral yang diberi akan meningkatkan osilasi pada sistem.
- c. Apabila error yang didapat tidak berubah maka nilainya akan dipertahankan seperti yang sebelumnya, dan sebaliknya jika nilai error berubah maka akan terlihat perubahan yang dipengaruhi besaran nilai error dan integral (Alfatah, 2021).

2.6 Field Oriented Control



Gambar 6 Blok diagram sistem pengendalian motor induksi menggunakan *field oriented control* (Fauzi, Happiyanto, & Sulistijono, 2014)

Field Oriented Control (FOC) adalah metode kontrol motor yang mengendalikan arus stator dalam bentuk vektor. Teknik kontrol ini bertujuan mengubah sistem tiga fasa kerangka acuan tetap menjadi sistem dua koordinat yaitu (d dan q kordinat) yang blok diagramnya dapat dilihat pada Gambar 6. Transformasi Clarke, yaitu digunakan untuk mengubah Sistem tiga koordinat (a, b, c) menjadi sistem (α , β). Transformasi Park, yaitu digunakan untuk mengubah sistem (α , β) menjadi sistem (d, q).

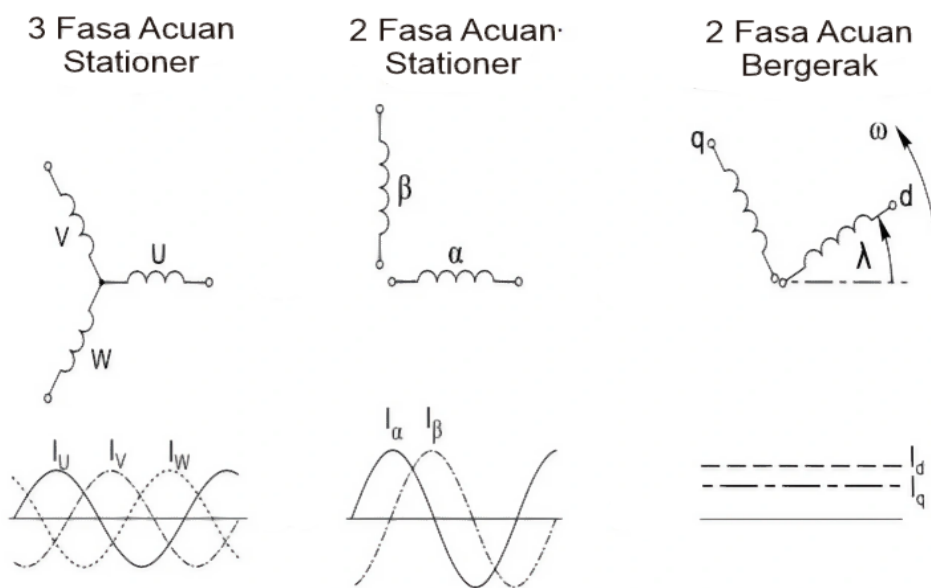
2.6.1 Transformasi Clarke

Dalam mempresentasikan kerangka 3 fasa (a, b, c) kedalam kerangka acuan dua fasa tegak lurus (α , β), dapat digunakan transformasi clarke. Transformasi clarke dinyatakan dengan Persamaan 4 dan transformasi *invers* clarke dinyatakan dengan Persamaan 5.

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.6.2 Transformasi Park



Gambar 7 Transformasi park dan clarke algoritma FOC (Fattah, 2015)

Dalam mempresentasikan kerangka acuan stasioner (α , β) kedalam kerangka acuan bergerak (d , q), dapat digunakan transformasi park. Transformasi *park* dinyatakan dengan Persamaan 6 dan transformasi invers park dinyatakan dengan Persamaan 7.

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (7)$$

Adapun algoritma FOC adalah sebagai berikut:

1. Mengukur arus fasa I_a , I_b dan I_c kemudian dikonversi menjadi I_α dan I_β menggunakan transformasi clarke.
2. I_α dan I_β di konversi menjadi I_d dan I_q menggunakan transformasi park.
3. Mencari rotor flux dengan menggunakan Persamaan:

$$\psi = \frac{L_m I_d}{1 + L_r/R_r} \quad (8)$$

4. Mencari sudut rotor dengan menggunakan Persamaan:

$$\theta = \int (\omega + \omega^*) \quad (9)$$

$$\omega = \frac{L_m R_r I_q}{L_r \Psi} \quad (10)$$

5. Mencari I_q referensi dengan menggunakan Persamaan:

$$I_q^* = \frac{2 L_r T_e^*}{3 p L_m \Psi} \quad (11)$$

6. Mencari I_d referensi dengan menggunakan Persamaan:

$$I_d^* = \frac{\Psi^*}{L_m} \quad (12)$$

7. I_d^* dan I_q^* ditransformasi ke I_α^* dan I_β^* menggunakan transformasi inverse park.
8. I_α^* dan I_β^* ditransformasi ke I_a^* , I_b^* dan I_c^* menggunakan transformasi inverse clarke.
9. Pengontrol arus akan membandingkan arus referensi dan arus yang terukur untuk menghasilkan sinyal gerbang inverter.

dimana,

Ψ : Flux (Wb),

L_m : Mutual induktansi (H),

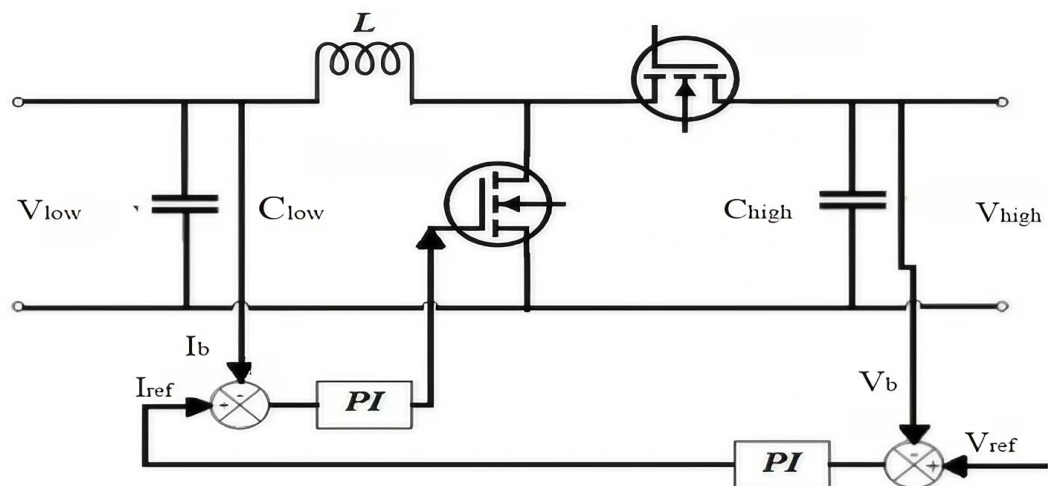
L_r : Induktansi rotor (H)

- R_r : Resistansi rotor (Ω)
 L_s : Induktansi stator (H),
 Θ : Sudut ($^\circ$),
 ω : Kecepatan sudut (rad/s),
 I_a, I_b, I_c : Arus 3 fasa stationer (A),
 I_α, I_β : Arus 2 fasa tegak lurus stationer (A),
 I_d : Arus direct (A),
 I_q : Arus quadratur (A).

Superskrip dari simbol asterisk (*) menandakan bahwa variabel tersebut merupakan variabel referensi (Fattah, 2015).

2.7 Konverter DC-DC

Konverter DC-DC mengkonversi DC ke DC, konverter DC dapat dianggap sebagai ekuivalen DC dengan transformator AC. Seperti halnya transformator, konverder DC-DC dapat digunakan untuk menurunkan atau menaikkan sumber tegangan DC. (Rashid, Kumar, & Kulkarni, 2014)



Gambar 8 Konverter DC-DC (Pratiwi, 2020)

Konverter DC-DC dua arah adalah perangkat yang berfungsi menaikkan atau menurunkan level tegangan dengan kemampuan daya aliran baik dalam arah maju atau mundur. Konverter DC-DC dua arah bekerja sebagai pengatur aliran daya tegangan bus DC dua arah (Ravi, Mallikarjuna Reddy, S.L, & Samuel, 2018).

Bidirectional DC-DC converter dapat mengontrol tegangan DC dengan mengendalikan duty cycle. Perbedaan antara tegangan baterai (V_b) dan tegangan referensi (V_{ref}) diproses dengan kontrol PI, lalu dimasukkan ke dalam loop sebagai arus referensi (I_{ref}) dan dibandingkan dengan arus keluaran induktor (I_b). Perbedaan diproses melalui kontrol PI untuk mendapatkan PWM (*pulse width modulation*) (Pratiwi, 2020).

Hubungan antara V_{low} dan V_{high} pada Gambar 8 dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.13 Dalam pemilihan kapasitas minimum induktor dan kapasitor dapat menggunakan Persamaan 2.14, 2.15 dan 2.16 (Zhang, 2016).

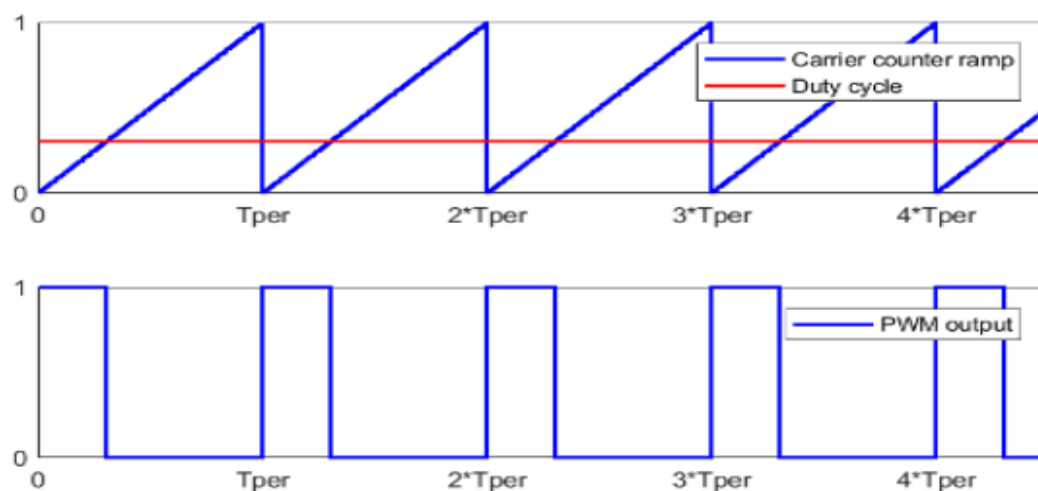
$$D = \frac{V_{low}}{V_{high}} \quad (13)$$

$$L = \frac{V_{low}(1 - D)}{0,6 \frac{P}{V_{low}} f} \quad (14)$$

$$C_{low} = \frac{DV_{high}(1 - D)}{0,08f^2LV_{low}} \quad (15)$$

$$C_{high} = \frac{P}{V_{high}} (1 - D) \quad (16)$$

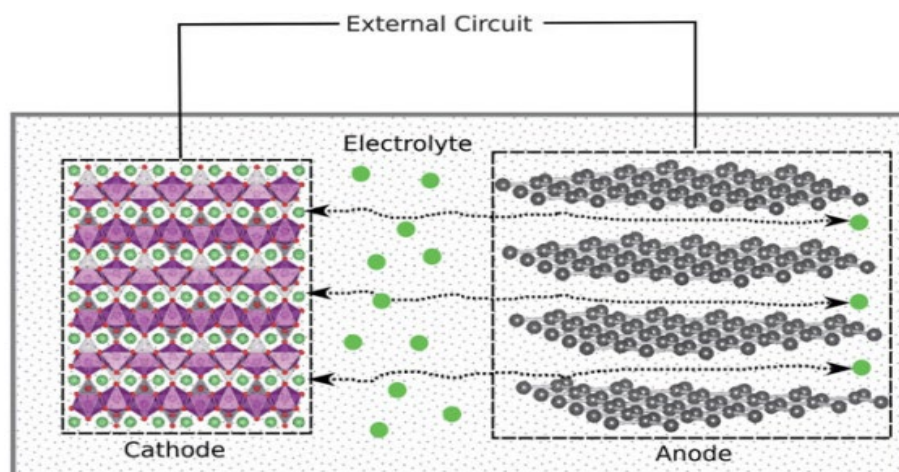
2.8 Generator Modulasi Lebar Pulsa



Gambar 9 Sinyal *carrier* dan output dari PWM (Mathworks, 2023)

Teknik modulasi lebar pulsa atau *pulse width modulation* (PWM) mengontrol transfer daya dari satu komponen listrik ke komponen lainnya dengan cepat beralih antara transfer daya penuh (1) dan tidak ada transfer daya (0). Output blok generator PWM bernilai 1 ketika duty cycle lebih besar dari nilai carrier counter atau bernilai 0 ketika duty cycle lebih kecil dari nilai carrier counter. Pengaturan periode setiap siklus dapat dilakukan dengan menentukan periode waktu T_{per} . Sinyal carrir dan output dari PWM dapat dilihat pada Gambar 9 (Mathworks, 2023).

2.9 Baterai



Gambar 10 Baterai (Ceder, Hautier, Jain, & Ong, 2012)

Penggunaan baterai sangat tinggi dalam bidang elektronik portabel karena energi spesifiknya yang tinggi, yang menyebabkan bobot baterai yang rendah, dan kepadatan energi yang tinggi, yang menyebabkan volume baterai menjadi rendah. Baterai terdiri dari dua elektroda (katoda dan anoda) yang dipisahkan oleh elektrolit yang dapat dilihat pada Gambar 10. Ketika *discharging*, ion bergerak melalui elektrolit dari potensial kimia litium tinggi yang ada di anoda ke potensial kimia litium rendah yang ada di katoda. Elektron yang bergerak di sirkuit eksternal dapat digunakan untuk melakukan kerja eksternal. Selama pengisian, potensial listrik eksternal diterapkan, dan prosesnya dibalik (Ceder, Hautier, Jain, & Ong, 2012).

Kelemahan dari baterai adalah kepadatan daya yang relatif rendah, hal ini bisa menjadi faktor pembatas untuk menyerap energi ketika kontainer diturunkan karena aliran daya dari motor hoist dapat mencapai ratusan kW. Meskipun demikian, baterai memiliki kepadatan energi yang memungkinkan banyak energi yang dapat disimpan dalam baterai. Kelemahan lain menggunakan baterai adalah siklus hidup yang terbatas karena degradasi (Pietrosanti, 2018).

Tingkat pengisian dan pengosongan baterai diatur oleh tingkat-C. Kapasitas baterai biasanya diberi nilai 1C, artinya baterai dengan kapasitas 1 Ah yang terisi penuh akan menghasilkan output arus sebesar 1 A dalam 1 jam, untuk baterai 2C maka output arus sebesar 2 A dalam 0,5 jam dan untuk baterai 0,5C maka output arus sebesar 0,5 A dalam 2 jam (University, BU-402: What Is C-rate?, 2021).