

BAB II

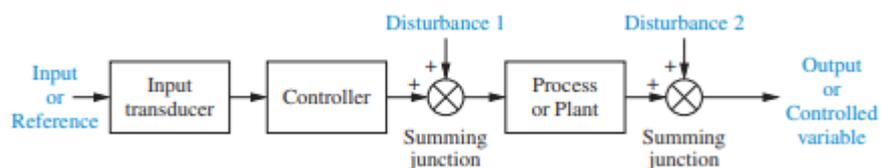
LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Kontrol

Sistem adalah kombinasi beberapa komponen yang bekerja secara bersamaan dan menjalankan tujuan tertentu. Sedangkan kontrol berarti pengukuran nilai variabel yang dikontrol dari sistem dan menerapkan sinyal kontrol ke sistem untuk mengoreksi atau membatasi penyimpangan nilai yang diukur dari nilai yang diinginkan (Ogata, 2010). Sistem kontrol terdiri dari subsistem dan proses (*plant*) yang disusun untuk tujuan memperoleh *output* dan kinerja yang diinginkan dengan *input* yang telah ditentukan (Nise, 2015).

2.1.1 Sistem Loop Terbuka (*Open Loop Systems*)

Open loop systems ditunjukkan pada Gambar 2.1, dimulai dengan subsistem yang disebut dengan *transduser input* yang mengubah bentuk *input* untuk digunakan oleh *controller* yang menjalankan proses. *Input* disebut referensi, sedangkan *output* dapat disebut variabel terkontrol. Sinyal lainnya, seperti gangguan bisa muncul pada *controller* dan *output process* melalui *summing junction*, sehingga menghasilkan penjumlahan aljabar dari sinyal *input* maupun *output* sistem (Nise, 2015).



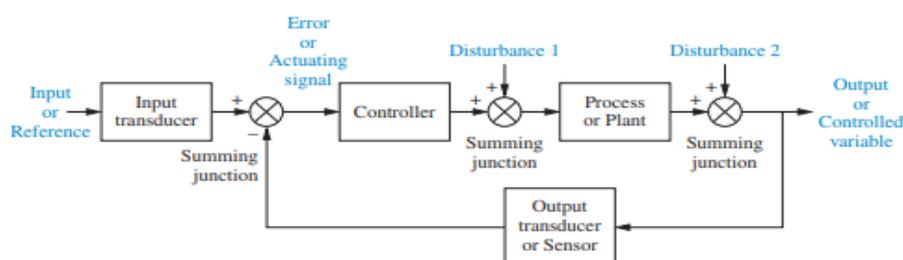
Gambar 2.1 Sistem Loop Terbuka

Sumber : (Nise, 2015)

Open loop systems merupakan suatu sistem dimana *output* atau variabel terkontrol tidak berpengaruh pada tindakan *controller* (Ogata, 2010). Dengan kata lain, *output* tidak diukur dan diumpangkan kembali untuk perbandingan dengan nilai referensi. Jadi, setiap nilai referensi bersifat tetap yang mengakibatkan keakuratan sistem bergantung pada kalibrasi. Jika terdapat sinyal gangguan, sistem ini tidak akan melakukan tugas yang diinginkan. Sistem ini biasanya diaplikasikan pada kontrol dengan basis waktu, seperti mesin cuci dan lampu lalu lintas.

2.1.2 Sistem Loop Tertutup (*Closed Loop Systems*)

Closed loop system ditunjukkan pada Gambar 2.2, dimana transduser *input* mengubah bentuk *input* untuk digunakan oleh *controller*. Transduser *output* atau sensor mengukur respon *output* dari proses dan mengubahnya menjadi bentuk yang digunakan oleh *controller*. *Summing junction* pertama menambahkan sinyal *input* ke sinyal *output* yang berasal dari umpan balik yaitu jalur dari transduser output, dimana hasilnya disebut sinyal penggerak. Namun, dalam sistem dimana sinyal *input* dan *output* memiliki *gain* satu (transduser memperkuat *input* sebesar 1), maka nilai sinyal penggerak sama dengan perbedaan aktual antara *input* dan *output* yang disebut *error*. Sinyal gangguan pada sistem ini diukur dan dimasukkan kembali melalui jalur umpan balik dan dibandingkan dengan sinyal *input* di *summing junction* (Nise, 2015).



Gambar 2.2 Sistem Loop Tertutup

Sumber : (Nise, 2015)

2.2 Motor Induksi Tiga Fasa

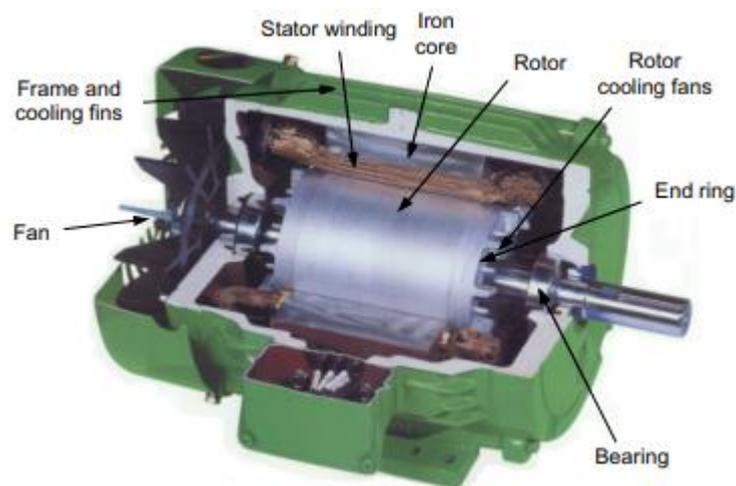
Prinsip dasar motor induksi pertama kali didemonstrasikan oleh percobaan yang dikenal sebagai Disk Arago pada tahun 1824. Dari percobaan tersebut, ditemukan bahwa ketika magnet digerakkan berputar di sepanjang tepi piringan tembaga (non magnetik), piringan tersebut ikut berputar dengan kecepatan yang lebih kecil dari kecepatan magnetnya. Pada tahun 1832, Faraday juga mendemonstrasikan bahwa fenomena dari percobaan itu disebabkan oleh arus yang diinduksi dalam piringan tembaga. Konsep dasar ini kemudian mengarah pada pengembangan motor induksi. Ketika magnet melewati tepi piringan, gaya gerak listrik (ggl) diinduksi pada bagian piringan yang mengalami perubahan medan magnet. Tegangan yang diinduksi menyebabkan arus *eddy* mengalir di piringan. Akibatnya, berlaku gaya Lorentz dimana arah gaya sama dengan arah gerakan magnet dan membuat piringan tembaga berputar bersama magnet (Kim, 2017).

Pada motor induksi, magnet berputar tersebut diwujudkan dengan medan putar magnet yang dihasilkan dari belitan stator tiga fasa yang dihubungkan ke sumber daya AC tiga fasa, Kemudian, rotor mengikuti arah putaran dari medan magnet tersebut.

Motor induksi atau motor asinkron merupakan motor yang paling umum digunakan untuk aplikasi industri karena sangat ekonomis, tahan lama, dan dapat diandalkan. Motor induksi adalah jenis motor AC yang daya listriknya disuplai ke rotor melalui induksi elektromagnetik. Hal ini dikarenakan gaya magnet bekerja antara stator dan rotor. Arus di sisi stator berinteraksi dengan arus sekunder yang menyebabkan adanya perubahan energi listrik menjadi energi mekanik, adanya torsi, dan medan elektromagnetik (Zhang & Gao, 2021).

2.2.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Struktur umum motor induksi ditunjukkan pada Gambar 2.3, dimana stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara. Stator dan rotor terdiri dari inti besi, yang memiliki belitan didalamnya. Inti besi tersebut tidak terbentuk secara padat tetapi dibuat dari tumpukan laminasi baja silikon dengan ketebalan 0,3-0,5 mm untuk mengurangi kehilangan arus *eddy*, menghasilkan fluks magnet dan mengurangi rugi-rugi histeresis (Kim, 2017).



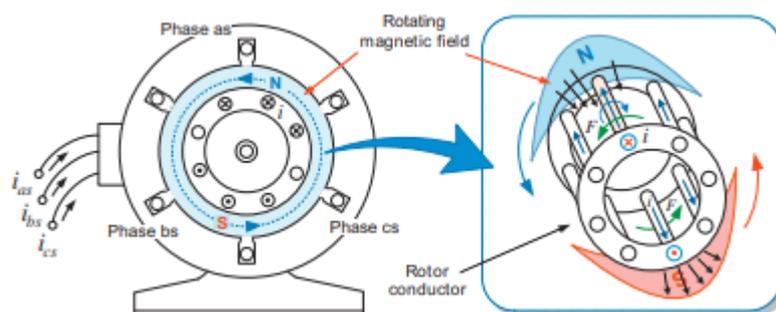
Gambar 2.3 Konstruksi Motor Induksi

Sumber : (Kim, 2017)

Dalam motor induksi, terdapat stator yang digabungkan dengan belitan tiga fasa, dimana suplai daya AC tiga fasa dihubungkan dengan belitan ini. Setiap belitan ini terdistribusi secara kontinyu sehingga dapat membentuk fluks sinusoidal di celah udara ketika arus mengalir melaluinya. Rotor memiliki inti besi silinder yang disusun menyerupai sangkar, dimana setiap ujungnya dihubung singkat dengan dihubung menyerupai cincin. Hal ini dilakukan supaya rangkaian rotor dapat diinduksi (Kim, 2017).

2.2.2 Prinsip Dasar Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi biasanya digunakan pada aplikasi penggerak kecepatan yang dapat diatur yang memiliki belitan stator dan belitan rotor (Muhammad H. Rashid, 2014). Dalam motor induksi, ketika sumber tegangan AC tiga fasa disuplai ke belitan stator, yang dipindahkan oleh 120 derajat listrik satu sama lain, arus tiga fasa yang mengalir dalam belitan ini akan menghasilkan medan putar magnet di celah udara (*air gap*) seperti pada Gambar 2.4. Kecepatan medan putar magnet berbanding lurus dengan frekuensi tegangan sumber daya (Kim, 2017).



Gambar 2.4 Medan Putar Magnet

Sumber : (Kim, 2017)

Ketika medan putar magnet terhubung dengan konduktor rotor, gaya gerak listrik (ggl) diinduksikan di konduktor sebagaimana hukum Faraday. Peristiwa timbulnya arus listrik akibat perubahan medan putar magnet dinamakan induksi elektromagnetik. Karena rotor tidak memiliki sumber daya eksternal, maka sumber daya AC tiga fasa disuplai melalui induksi elektromagnetik. Tegangan induksi menyebabkan munculnya arus pada konduktor hubung singkat. Torsi dihasilkan pada konduktor pembawa arus (batang rotor) dalam medan putar magnet. Dengan torsi ini, rotor akan mulai berputar ke arah yang sama dengan arah medan putar magnet. Saat motor induksi beroperasi, kecepatan rotor (n_r) selalu lebih kecil dari

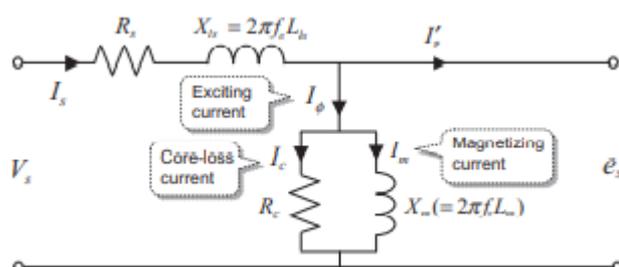
kecepatan medan putar magnet (n_s) atau kecepatan sinkron. Kecepatan rotasi medan magnet ditulis dalam persamaan (2.1).

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (2.1)$$

Dimana f adalah frekuensi suplai daya pada stator (*hertz*) dan p adalah jumlah kutub motor.

2.2.3 Rangkaian Ekuivalen Stator

Rangkaian ekuivalen stator direpresentasikan pada Gambar 2.5. Ketika tegangan stator (v_s) dialirkan ke belitan stator, arus stator (i_s) mengalir dalam belitan tersebut. Arus (i_s) menghasilkan gaya gerak magnet pada stator ($N_s i_s$) kemudian menghasilkan fluks stator ϕ_s , dimana fluks itu melintasi celah udara dan terhubung ke belitan rotor. Fluks celah udara ini disebut fluks bersama (*mutual flux*) atau fluks magnetik (ϕ) yang berpengaruh dalam menghasilkan torsi. Fluks yang melintasi celah udara hanya sebagian besarnya saja, sebagian kecilnya terhubung kembali ke stator, sehingga disebut fluks bocor ϕ_{is} (*leakage flux*) (Kim, 2017).



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Belitan Stator

Sumber : (Kim, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.5, didapatkan tegangan stator yang dinyatakan pada persamaan (2.2).

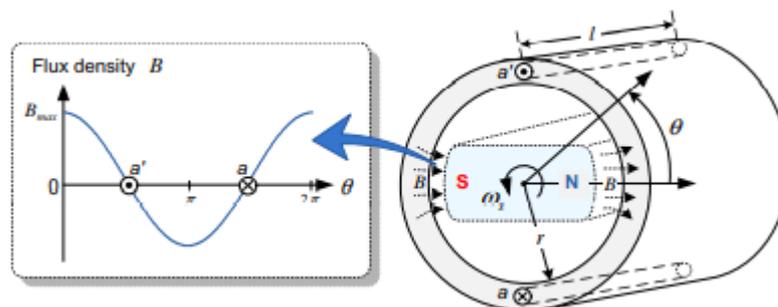
$$v_s = R_s i_s + L_{ls} \frac{d i_s}{dt} + L_m \frac{d i_m}{dt} = R_s i_s + L_{is} \frac{d i_s}{dt} + e_s \quad (2.2)$$

Dimana L_{is} adalah kebocoran induktansi stator, L_m adalah induktansi magnetik, i_m adalah arus magnetisasi dan e_s adalah tegangan induksi di belitan stator (*back-emf*).

Tegangan induksi berbanding lurus dengan laju perubahan waktu fluks stator. Untuk memperoleh nilai tegangan induksi diperlukan nilai rapat fluks. Medan putar magnet akan menginduksi tegangan pada belitan stator dan rotor. Ketika medan putar magnet sejajar dengan sumbu magnet dari fasa a_s ($\theta = 0^\circ$) sebagaimana Gambar 2.6, maka rapat fluks di celah udara dapat dinyatakan dalam persamaan (2.3).

$$B(\theta) = B_{max} \cos \theta \quad (2.3)$$

Dimana $\theta (= \omega_s t)$ sudut posisi fluks celah udara.



Gambar 2.6 Rapat Fluks Terdistribusi di Celah Udara

Sumber : (Kim, 2017)

Saat medan putar magnet bergerak di celah udara, posisi fluks yang menghubungkan belitan akan berubah secara kontinyu. Hubungan fluks untuk kumparan stator dari fasa a_s akan menjadi maksimum pada $\theta = 0^\circ$ dan menjadi nol pada $\theta = 90^\circ$ (Kim, 2017). Tegangan yang diinduksi dalam setiap belitan fasa stator dinyatakan dengan persamaan (2.4).

$$e_a = \omega_s N_s \phi \sin \omega_s t = E_{max} \sin \omega_s t$$

$$e_b = E_{max} \sin (\omega_s t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_{max} \sin (\omega_s t + 120^\circ) \quad (2.4)$$

Dimana N_s merupakan jumlah lilitan stator setiap fasa. Maka, nilai *root mean square* (rms) dari tegangan yang diinduksi dinyatakan dalam persamaan (2.5).

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} K_{os} = \frac{\omega_s N_s \phi}{\sqrt{2}} K_{os} = 4,44 f_s N_s \phi K_{os} \quad (2.5)$$

Dimana K_{os} merupakan faktor belitan (0,85-0,95) (Kim, 2017).

2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Rotor

Medan putar magnet di celah udara menginduksi tegangan yang menjadi sumber tegangan bagi rotor. Tegangan induksi pada rotor dapat dinyatakan dalam persamaan (2.6).

$$E_r = 4,44 N_r \phi K_{os} f_r \quad (2.6)$$

Tegangan induksi pada belitan rotor menghasilkan arus rotor. Torsi pada belitan ini dihasilkan oleh interaksi yang terjadi antara arus rotor dengan medan putar magnet stator, dimana rotor akan mulai berputar. Kecepatan rotor (n_r) selalu lebih kecil dari kecepatan medan putar magnet stator atau kecepatan sinkron (n_s), dimana perbedaan kecepatan ini dinamakan slip dan dinyatakan dalam persamaan (2.7).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

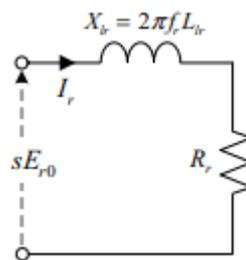
Slip merupakan faktor penting, dimana sebagian besar karakteristik motor induksi, seperti torsi, arus, efisiensi dan faktor daya bergantung pada nilai slip. Slip tergantung pada beban, dimana peningkatan beban akan memperlambat putaran rotor dan meningkatkan slip. Biasanya kisaran nilai slip motor induksi berada rentang 1-5%. Ketika rotor stasioner ($s = 1$), tegangan terbesar diinduksi dalam rangkaian rotor. Ketika kecepatan rotor meningkat, tegangan induksi menurun dan jika kecepatan rotor sama dengan kecepatan sinkron, maka tegangan menjadi nol

(Kim, 2017). Dengan demikian, tegangan induksi rotor pada slip s dinyatakan dalam persamaan (2.8).

$$E_r = 4,44 f_s N_r \phi K_{or} s f_s \quad (2.8)$$

Dimana N_r adalah jumlah lilitan per fasa rotor, K_{or} adalah faktor belitan rotor, dan $s f_s$ adalah frekuensi rotor.

Persamaan (2.8) menunjukkan bahwa besarnya tegangan induksi rotor berbanding lurus dengan slip. Tegangan sumber rotor adalah sE_r . Maka, rangkaian ekuivalen rotor dapat digambarkan pada Gambar 2.7.

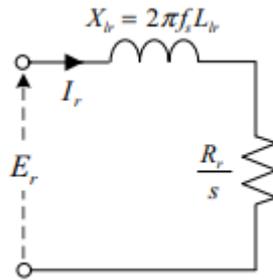


Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Belitan Rotor

Sumber : (Kim, 2017)

Rangkaian ekuivalen rotor pada Gambar 2.7 direpresentasikan dalam frekuensi rotor. Hal ini berarti rangkaian tersebut tidak bisa dikombinasikan dengan rangkaian ekuivalen stator pada Gambar 2.5 dalam kesatuan rangkaian karena keduanya berbeda frekuensi (f_r).

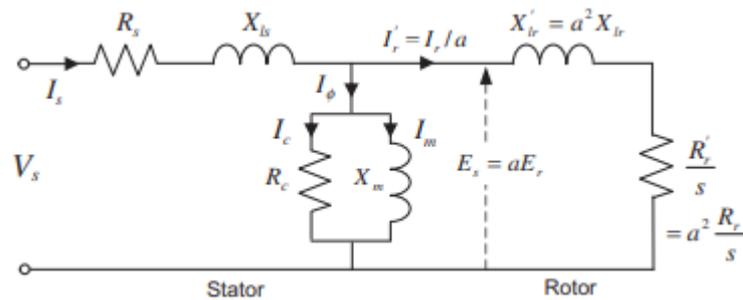
Pembagian tegangan dan impedansi pada Gambar 2.7 dengan slip s , akan diperoleh rangkaian ekuivalen rotor seperti pada Gambar 2.8, dimana arus rotor dan frekuensi operasinya sama (f_s). Dengan demikian, ini menjadi rangkaian ekuivalen rotor yang terlihat dari sisi stator.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Rotor dari Sisi Stator

Sumber : (Kim, 2017)

Dengan adanya rangkaian Gambar 2.8, ekuivalen stator dan rotor dapat digabungkan bersama dengan mempertimbangkan rasio belitan $a (= N_s/N_r)$ dari belitan stator dan rotor. Rangkaian ekuivalen per fasa motor induksi digambarkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Sumber : (Kim, 2017)

2.2.5 Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa

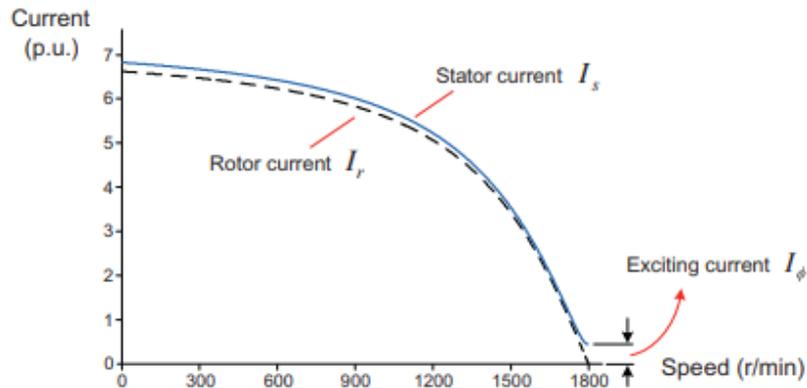
Arus stator merupakan *input* arus dari motor induksi. Dari Gambar 2.9, dengan mengabaikan rugi-rugi inti, *input* impedansi sebagai fungsi dari slip dinyatakan sebagai persamaan (2.9).

$$Z_s = R_s + jX_{ls} + [X_m / (\frac{R_s}{s} + jX_{lr})] = |Z_s| < \theta_s \tag{2.9}$$

Dimana θ_s merupakan sudut impedansi. Dengan menerapkan tegangan stator dan *input* impedansi, maka arus stator dinyatakan dalam persamaan (2.10).

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} = I_\phi + I_r \tag{2.10}$$

Arus stator adalah penjumlahan dari arus eksitasi (I_ϕ) dan arus rotor (I_r). Dengan tegangan stator konstan (v_s), arus stator sebagai fungsi kecepatan ditunjukkan pada Gambar 2.10.



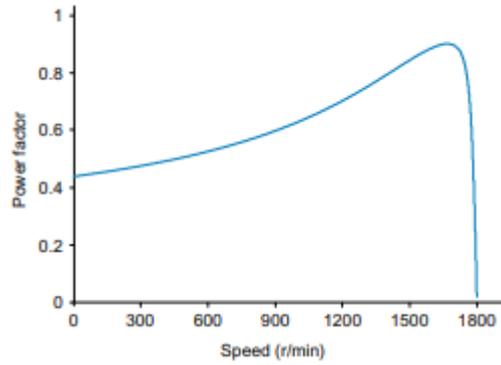
Gambar 2.10 Kurva Arus Stator Terhadap Fungsi Kecepatan
Sumber : (Kim, 2017)

Dari persamaan (2.9), *input* faktor daya dinyatakan dalam persamaan (2.11).

$$PF = \cos \varphi_s \quad (2.11)$$

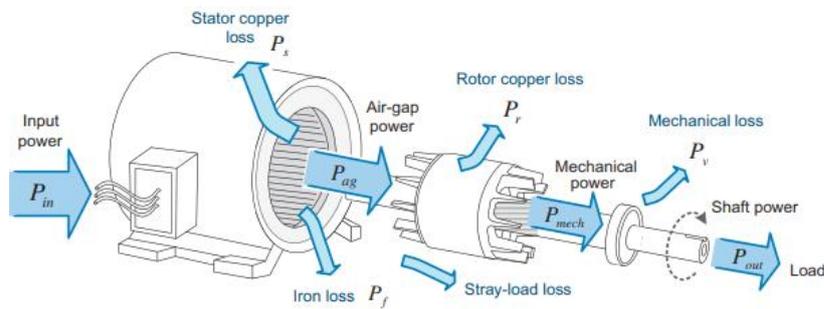
Faktor daya motor induksi berubah secara kontinyu seperti pada Gambar 2.11, dimana nilainya selalu kurang dari 1. Perubahan faktor daya bergantung pada beban yang diberikan, dimana akan minimum jika tanpa beban dan mencapai puncak saat beban penuh (Kim, 2017).

Output torsi motor induksi dapat dicari dengan menurunkan persamaan dari diagram aliran daya pada Gambar 2.12. *Input* daya P_{in} ($= 3V_s I_s \cos \theta_s$) akan disuplai ke rotor (tidak termasuk rugi-rugi stator) melintasi celah udara dan diubah menjadi daya mekanik P_{mech} .



Gambar 2.11 Kurva Faktor Daya Terhadap Kecepatan

Sumber : (Kim, 2017)



Gambar 2.12 Diagram Aliran Daya Motor Induksi

Sumber : (Kim, 2017)

Daya yang disuplai melalui celah udara dari stator ke rotor disebut daya celah udara (P_{ag}). Berdasar pada Gambar 2.9, daya celah udara dinyatakan dalam persamaan (2.12).

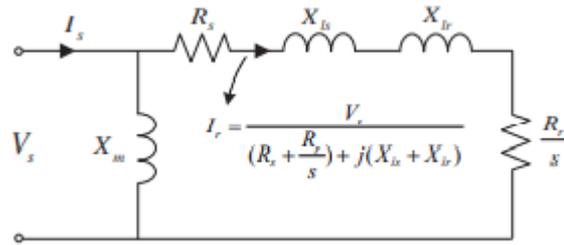
$$P_{ag} = I_r^2 \frac{Rr}{s} \tag{2.12}$$

Daya celah udara ini merupakan *input* daya ke rotor, dimana akan terdapat rugi-rugi tembaga rotor dan diubah menjadi daya mekanik. Jadi, daya mekanik dinyatakan dalam persamaan (2.13).

$$P_{mech} = s P_{ag} = I_r^2 \frac{Rr}{s} (1 - s) \tag{2.13}$$

Pada persamaan (2.13), dapat disimpulkan bahwa distribusi daya bergantung pada nilai slip. Semakin rendah slip motor, maka semakin rendah rugi-

rugi tembaga rotor dan semakin tinggi *output* daya mekaniknya. Hal ini tentu akan berpengaruh pada torsi yang dihasilkan.



Gambar 2.13 Perkiraan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Sumber : (Kim, 2017)

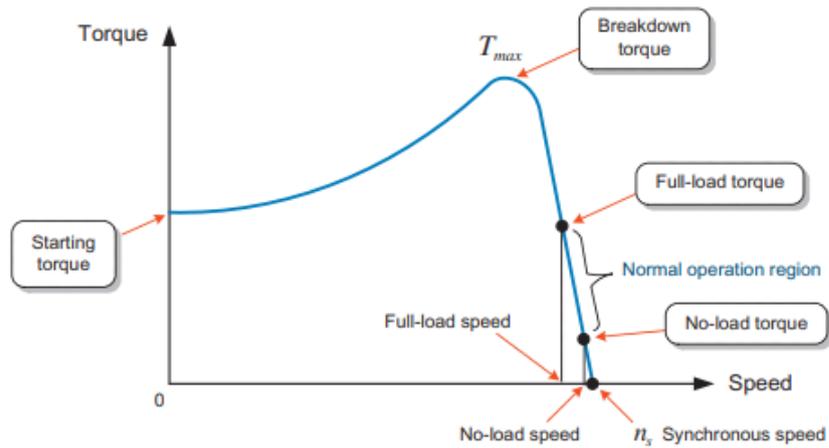
Pada Gambar 2.13, dapat diperoleh arus rotor, dimana resistansi rugi inti diabaikan dan induktansi magnetisasi digeser ke sisi *input* dengan asumsi $R_s + jX_{ls} < \omega_s L_m$. Maka, arus rotor dinyatakan dalam persamaan (2.14).

$$I_r = V_s / [(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_{ls} + X_{lr})] \tag{2.14}$$

Torsi *output* (per fasa) yang dihasilkan, dinyatakan dalam persamaan (2.15).

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_s} \cdot [V_s^2 / [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + j(X_{ls} + X_{lr})^2]] \cdot \frac{R_r}{s} \tag{2.15}$$

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_s^2}{R_r} \cdot s$$



Gambar 2.14 Kurva Torsi Terhadap Kecepatan Motor Induksi

Sumber : (Kim, 2017)

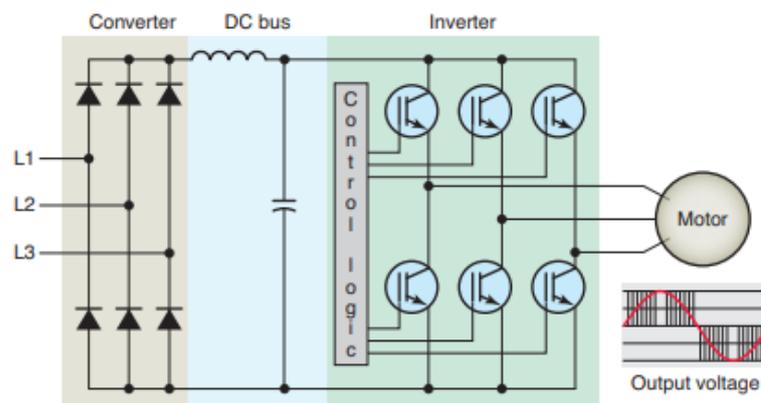
Resistansi rotor (R_r) merupakan parameter penting yang mempengaruhi nilai slip maksimum, dimana torsi maksimum terjadi. Torsi maksimum motor induksi dinyatakan dalam persamaan (2.16).

$$T_{max} = \frac{1}{2\omega_s} \cdot [V_s^2 / [R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}]] \quad (2.16)$$

Nilai maksimum tidak tergantung pada resistansi rotor. Gambar 2.14 menunjukkan kurva kecepatan terhadap torsi *output* ketika motor induksi dimulai dengan tegangan penuh.

2.3 Variable Frequency Drives (VFD)

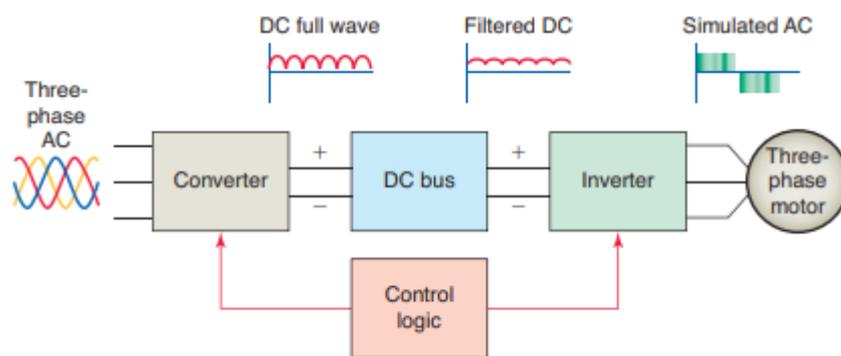
Variable Frequency Drives (VFD) merupakan penggerak kecepatan yang dapat diatur, dimana penggerak ini digunakan untuk mengontrol kecepatan motor AC dengan mengatur frekuensi dan tegangan *input* yang disuplai ke motor. VFD terdiri dari komponen aktif dan pasif perangkat elektronika daya, unit kontrol kecepatan dan sensor. Fungsi dasar VFD yaitu sebagai variabel generator frekuensi untuk mengatur kecepatan motor sesuai dengan keinginan *user* (Dharkar & Daigavane, 2017).



Gambar 2.15 Bagian-bagian *Variable Frequency Drives*

Sumber : (Petruzella, 2016)

Kemampuan VFD dalam mengatur kecepatan dan torsi motor menjadi alasan mengapa penggunaan VFD dapat menghemat energi (Sequeira & Alahakoon, 2019). Gambar 2.15 menunjukkan bahwa VFD memiliki 3 bagian dasar, yaitu *Rectifier* (penyearah) atau *Converter*, *DC Bus*, dan Inverter. Prinsip dasar VFD adalah memvariasikan tegangan dan frekuensi untuk suplai daya motor. Gambar 2.16 menunjukkan proses operasi VFD, dimana tegangan suplai AC yang dihubungkan ke VFD diubah menjadi DC melalui *Rectifier*. Tegangan DC yang dihasilkan akan difilter oleh *DC Bus* untuk mengurangi riak dan membuatnya mendekati gelombang DC murni. Tegangan DC yang telah difilter akan diubah menjadi AC terkontrol melalui Inverter dan menjadi suplai daya ke motor induksi (Aditya, 2013). Dalam penelitian ini, VFD digunakan untuk mensuplai daya terkontrol ke motor. VFD akan menerima nilai referensi arus terhadap torsi dan kecepatan dari PLC.



Gambar 2.16 Diagram Blok *Variable Frequency Drives*

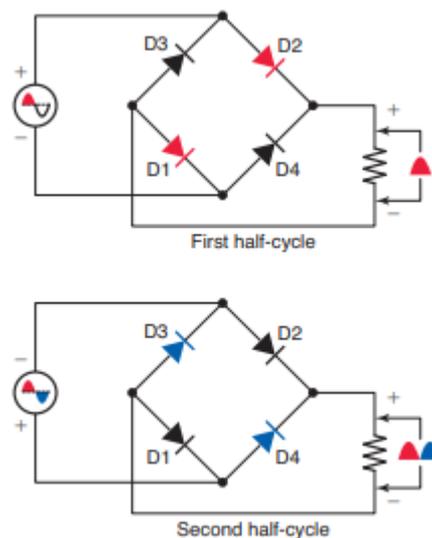
Sumber : (Petruzella, 2016)

2.3.1 *Rectifier* (Penyearah)

Menurut (Muhammad H. Rashid, 2014) *rectifier* adalah rangkaian yang mengubah sinyal AC menjadi sinyal DC. Bentuk gelombang tegangan *output* yang dihasilkan akan memiliki bentuk yang sama dengan tegangan *input*, tetapi bagian negatif akan muncul sebagai nilai positif. Bentuk tegangan keluaran *rectifier*

idealnya harus DC murni, namun dalam praktiknya tegangan keluaran mengandung riak.

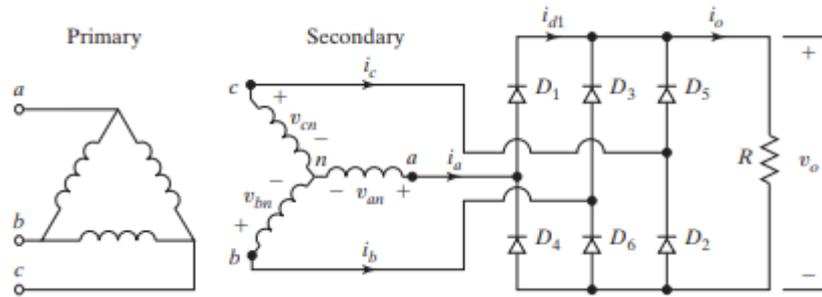
Pada VFD, konverter biasanya penyearah jembatan gelombang penuh, baik itu satu fasa atau tiga fasa. Penyearah jembatan satu fasa menggunakan 4 dioda untuk mendapat gelombang DC penuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Selama setengah siklus positif, dioda D1 dan D2 dalam keadaan *forward bias*, sedangkan dioda D3 dan D4 dalam keadaan *reverse bias*. Sebaliknya, ketika setengah siklus berikutnya (siklus negatif) polaritas tegangan AC berbalik, sehingga dioda D3 dan D4 menjadi *forward bias*, sedangkan dioda D1 dan D2 *reverse bias*. Hal ini terus menerus terulang dan menghasilkan gelombang DC penuh (Petruzella, 2016).



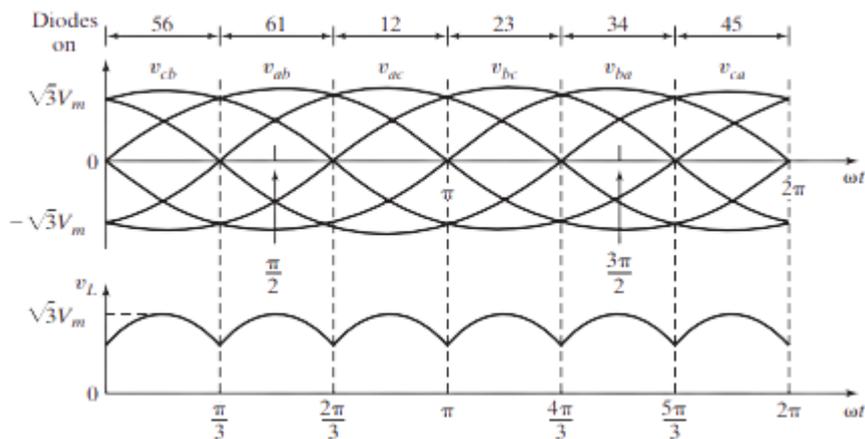
Gambar 2.17 Penyearah Jembatan Satu Fasa

Sumber : (Petruzella, 2016)

Penyearah tiga fasa umumnya diaplikasikan pada daya tinggi dan ditunjukkan oleh Gambar 2.18, dimana sepasang dioda yang terhubung dengan suplai daya dan memiliki nilai tegangan *line to line* sesaat tertinggi akan konduksi. Bentuk gelombang dan waktu konduksi dioda ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.18 Penyearah Jembatan Tiga Fasa
 Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

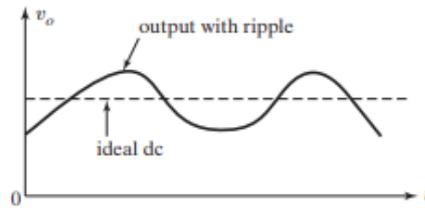


Gambar 2.19 Bentuk Gelombang dan Waktu Konduksi Dioda
 Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

Salah satu kelebihan dari VFD adalah dapat mengoperasikan motor AC tiga fasa dari suplai AC satu fasa. VFD tidak bergantung pada suplai tegangan yang diterimanya, baik itu satu fasa atau tiga fasa. Terlepas dari daya inputnya, *output* yang dihasilkan akan selalu tiga fasa (Petruzella, 2016).

2.3.2 DC Bus

Menurut (Muhammad H. Rashid, 2014) gelombang *output* penyearah mengandung harmonisa atau riak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20. *DC Bus (filter)* digunakan untuk menghaluskan tegangan *output* DC yang dihasilkan oleh penyearah untuk disuplai ke inverter.



Gambar 2.20 Tegangan Keluaran Penyearah

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

2.3.3 Transistor Daya

Transistor daya memiliki karakteristik kontrol ketika keadaan hidup dan mati. Transistor yang digunakan sebagai elemen pensaklaran (*switching*), dioperasikan di daerah saturasi, yang menghasilkan penurunan tegangan yang rendah ketika keadaan hidup. Kecepatan *switching* dari transistor modern jauh lebih tinggi daripada thyristor dan banyak digunakan dalam konverter DC-DC dan DC-AC, dengan dioda yang saling terhubung secara paralel terbalik untuk memberikan aliran arus dua arah. Namun, *rating* tegangan dan arusnya lebih rendah daripada thyristor, dimana transistor biasanya digunakan dalam aplikasi daya rendah hingga menengah. Dengan perkembangan teknologi semikonduktor daya, peringkat transistor daya terus ditingkatkan, dimana IGBT semakin banyak digunakan dalam aplikasi daya tinggi (Muhammad H. Rashid, 2014).

Transistor daya dapat diklasifikasikan menjadi lima kategori, yaitu:

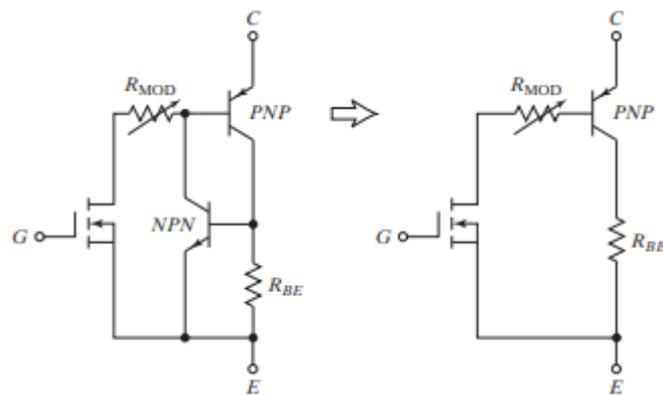
1. *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFETs)
2. COOLMOS
3. *Bipolar Junction Transistor* (BJTs)
4. *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBTs)
5. *Static Induction Transistor* (SITs)

Transistor daya diatas dapat dianggap sebagai saklar ideal untuk konverter daya. Pada penerapannya, transistor sangat berbeda dengan perangkat ideal, dimana

transistor memiliki batasan tertentu sesuai dengan karakteristiknya, sehingga terbatas pada beberapa aplikasi. Oleh karena itu, batasan tersebut perlu diperhatikan untuk menentukan kesesuaiannya dengan aplikasi yang dibutuhkan.

Menurut (Petruzella, 2016), saat ini VFD menggunakan transistor *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) untuk pensaklaran tegangan dari DC Bus. Tegangan dari DC Bus dilakukan *switching* pada interval waktu tertentu, yang bertujuan untuk mengubah tegangan DC menjadi 3 saluran tegangan AC.

IGBT mengombinasikan kelebihan dari BJT dan MOSFET, dimana IGBT memiliki impedansi input yang tinggi seperti MOSFET dan rugi konduksi yang rendah ketika keadaan hidup seperti BJT. IGBT merupakan transistor daya yang *switching* nya dikendalikan oleh tegangan. Rangkaian ekuivalen dari IGBT ditunjukkan pada Gambar 2.21, yang dapat disederhanakan menjadi rangkaian disampingnya (Muhammad H. Rashid, 2014).



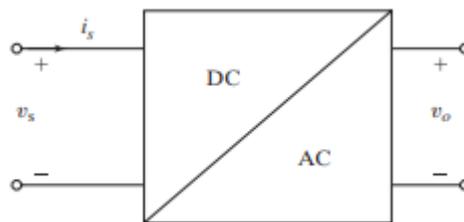
Gambar 2.21 Rangkaian Ekuivalen IGBT

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

IGBT merupakan transistor daya yang *switching* nya dikendalikan oleh tegangan. Ketika kaki *gate* dibuat lebih positif terhadap kaki *emitter*, *n-channel* pembawa ditarik ke *p-channel* sampai mendekati *rating gate*, hal ini menghasilkan bias maju pada NPN-transistor, sehingga kondisinya menyala.

2.3.4 Inverter

Konverter DC ke AC dikenal juga sebagai inverter. Fungsi dari inverter adalah untuk mengubah tegangan *input* DC menjadi tegangan *output* AC yang besaran tegangan dan frekuensinya disesuaikan dengan nilai yang diinginkan (Muhammad H. Rashid, 2014). Gambar 2.22 merupakan diagram blok konversi *input/output* pada inverter:

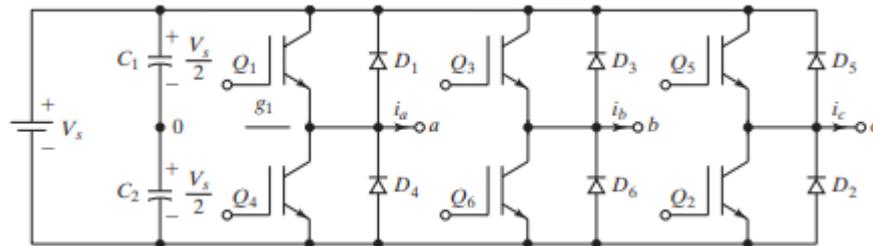


Gambar 2.22 Diagram Blok Inverter

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

Menurut (Muhammad H. Rashid, 2014), bentuk gelombang tegangan *output* dari sebuah inverter idealnya berbentuk *sinusoidal*. Namun, dalam praktiknya bentuk gelombang pada inverter adalah *nonsinusoidal* dan mengandung harmonisa. Untuk penggunaan inverter pada daya rendah sampai menengah, bentuk tegangan *square wave* atau *quasi-square wave* masih dapat diterima. Namun, untuk penggunaan pada daya tinggi sangat dibutuhkan gelombang *sinusoidal* dengan distorsi yang rendah. Dengan adanya perangkat semikonduktor daya berkecepatan tinggi, kandungan harmonisa yang terdapat pada tegangan *output* dapat diminimalkan dengan teknik pensaklaran.

Inverter tiga fasa biasa digunakan untuk aplikasi daya tinggi, dimana konfigurasinya seperti tiga buah inverter jembatan satu fasa yang dihubungkan secara paralel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.

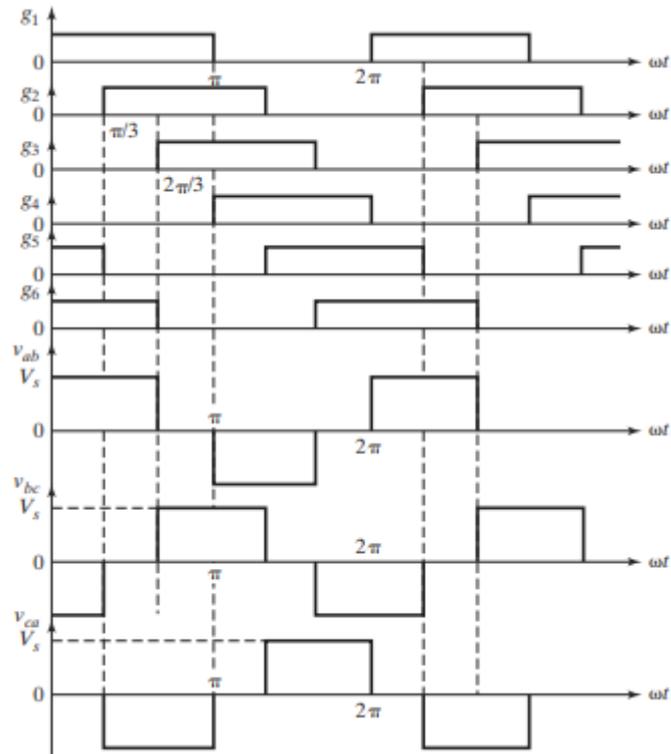


Gambar 2.23 Inverter Jembatan Tiga Fasa

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

Output tiga fasa dapat diperoleh dari konfigurasi 6 transistor dan 6 dioda, dimana konfigurasi ini disebut saklar seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.23. Dalam konteks VFD, transistor daya yang digunakan adalah IGBT, dan dioda adalah dioda *free-wheeling*. Ketika tegangan positif diterapkan ke *gate*, keadaannya menyala (menutup). Hal ini dikarenakan arus mengalir antara *collector* dan *emitter*. Dioda *free-wheeling* melindungi transistor dengan mengalirkan arus saat transistor dalam keadaan mati (membuka) dan juga merupakan jalur saat motor dihubungkan ke beban overhaul, dimana inersia beban lebih besar dari motor (Petruzella, 2016).

Menurut (Muhammad H. Rashid, 2014) dua jenis sinyal kontrol dapat diterapkan pada transistor, yaitu konduksi 180° atau konduksi 120° , dimana konduksi 180° memiliki manfaat pensaklaran yang lebih baik. Dalam konduksi 180° terdapat tiga transistor yang tetap menyala setiap saat. Ketika Q1 hidup, terminal a terhubung ke terminal positif dari tegangan *input* DC dan ketika Q4 hidup, terminal a terhubung ke terminal negatif dari tegangan *input* DC. Ada 6 mode operasi dalam satu siklus dan durasi setiap mode adalah 60° . Sinyal *gate* yang ditunjukkan pada Gambar 2.24 digeser satu sama lain sebesar 60° untuk mendapatkan tegangan tiga fasa seimbang.



Gambar 2.24 Gelombang *Switching* Konduksi 180°

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

Saklar kaki inverter (S1 dan S4, S3 dan S6, atau S5 dan S2) tidak dapat dinyalakan secara bersamaan karena akan mengakibatkan korsleting pada suplai tegangan DC. Saklar dari kaki inverter manapun tidak dapat dimatikan secara bersamaan karena dapat menghasilkan tegangan yang bergantung pada polaritas arus *line* masing-masing.

Tabel 2.1 menunjukkan konfigurasi 8 status saklar yang valid. Transistor Q1 dan Q6 pada Gambar 2.23 masing-masing sebagai *switching* S1 dan S6. Ketika dua saklar (atas dan bawah) bekerja pada saat yang sama sehingga *output* $\pm V_s$, status *switching* adalah 1, sedangkan jika kedua saklar tersebut mati pada saat yang sama, status *switching* adalah 0. Status 1 sampai 6 menghasilkan tegangan *line* bukan 0, sedangkan status 7 dan 8 menghasilkan tegangan *line* 0 dan arus melewati

dioda *free-wheeling*. Dengan demikian, *output* tegangan *line AC* yang dihasilkan dibentuk dari nilai-nilai diskrit tegangan V_s , 0, dan $-V_s$.

Tabel 2.1 Konfigurasi *Switching* Inverter Tiga Fasa

Sumber : (Muhammad H. Rashid, 2014)

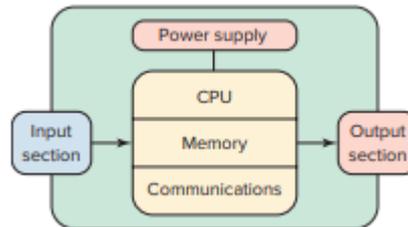
State No.	State	Switch States	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	$S_1 \& S_4, S_2 \& S_5, S_6 \& S_3$	1 0 0	V_s	0	$-V_s$
2	$S_2 \& S_5, S_3 \& S_6, S_1 \& S_4$	1 1 0	0	V_s	$-V_s$
3	$S_3 \& S_6, S_4 \& S_1, S_2 \& S_5$	0 1 0	$-V_s$	V_s	0
4	$S_4 \& S_1, S_5 \& S_2, S_3 \& S_6$	0 1 1	$-V_s$	0	V_s
5	$S_5 \& S_2, S_6 \& S_3, S_4 \& S_1$	0 0 1	0	$-V_s$	V_s
6	$S_6 \& S_3, S_1 \& S_4, S_5 \& S_2$	1 0 1	V_s	$-V_s$	0
7	$S_1 \& S_4, S_3 \& S_6, S_5 \& S_2$	1 1 1	0	0	0
8	$S_4 \& S_1, S_6 \& S_3, S_2 \& S_5$	0 0 0	0	0	0

2.4 Programmable Logic Controllers (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) adalah komputer industri yang menerima *input* dari perangkat *input* kemudian memproses *input* tersebut yang berupa program logika yang disimpan dan menghasilkan *output* untuk mengontrol perangkat *output*. PLC adalah perangkat yang dapat menggantikan rangkaian relai sekuensial yang diperlukan untuk kontrol proses (Khaled Kamel & Eman Kamel, 2014). PLC umumnya berfungsi untuk memantau dan mengendalikan sejumlah sensor dan aktuator yang dikonfigurasi dalam *input/output*. PLC memiliki memori yang dapat diprogram untuk menyimpan instruksi kontrol logika seperti, urutan, waktu, dan operasi aritmatika (Sequeira & Alahakoon, 2019).

PLC terbagi kedalam beberapa bagian seperti pada Gambar 2.25, yaitu *Central Processing Unit* (CPU), *Input/Output* (I/O), dan *Power Supply*. Dalam menggunakan PLC perlu diperhatikan tipe dan fitur pemrograman yang tersedia

didalamnya sesuai aplikasi yang dibutuhkan. Walaupun semua PLC prinsip dasar pemrogramannya sama, tetapi akan ada perbedaan pengalaman, alokasi memori, dan komunikasi data untuk tipe atau produsen yang berbeda (Petruzella, 2017).



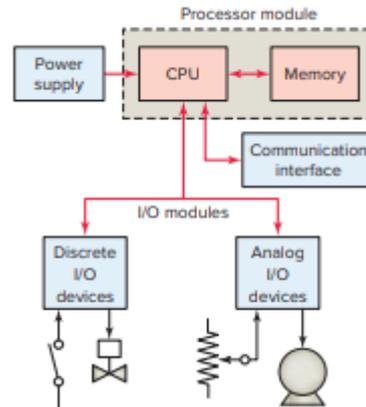
Gambar 2.25 Bagian-Bagian PLC

Sumber : (Petruzella, 2017)

Menurut (Petruzella, 2017), ada dua jenis PLC berdasarkan I/O nya, yaitu Tetap (*Compact*) dan Modular. Singkatnya, PLC *Compact* merupakan tipe PLC yang kecil, dimana CPU, Perangkat Komunikasi, dan I/O dibuat menjadi satu kesatuan yang tetap. PLC Modular merupakan tipe PLC yang terpisah, dimana terdapat rak untuk dipasang modul-modul PLC. Modul CPU, Power Supply, I/O dan Perangkat Komunikasi terpisah satu sama lain, dan digabungkan dalam sebuah rak yang dinamakan *Base Unit* atau *Base Rack*.

2.4.1 *Central Processing Unit (CPU)*

CPU merupakan otak PLC yang terdiri dari *chip* mikroprosesor dan IC (*Integrated Circuit*) untuk melakukan fungsi-fungsi logika dan mengendalikan komunikasi antar modul. CPU dan Memori merupakan bagian dari Modul Processor seperti Gambar 2.26. CPU mengeksekusi sistem operasi, mengatur memori, memonitor *input*, evaluasi program, dan mengontrol *output* yang sesuai.



Gambar 2.26 Bagian Pada Modul Processor

Sumber : (Petruzella, 2017)

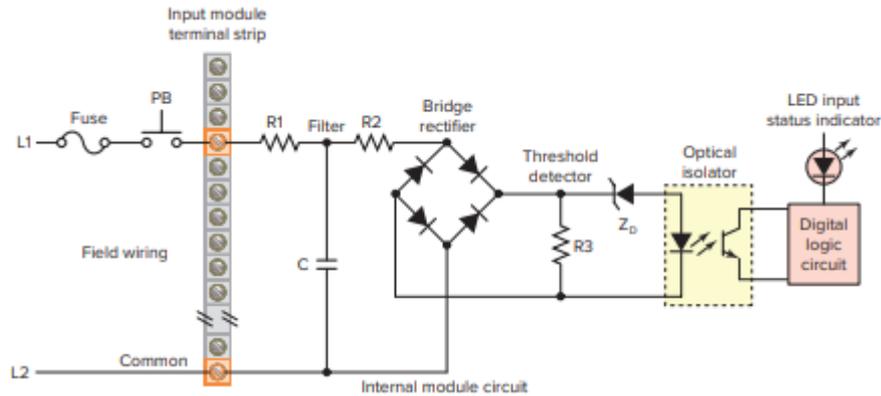
CPU mengeksekusi program dan kebutuhan komunikasi dengan modul lain, sementara memori sebagai penyimpan instruksi program yang dibuat *user*, nilai numerik serta status I/O.

2.4.2 Power Supply

Fungsi dari *Power Supply* adalah untuk konversi tegangan *input* 220 VAC menjadi 24 VDC, dimana suplai DC disalurkan ke setiap modul atau unit untuk operasi PLC. *Power Supply* memiliki tiga unit komponen, yaitu *rectifier*, *filter*, dan pengatur tegangan (*voltage regulator*).

2.4.3 Input/Output (I/O)

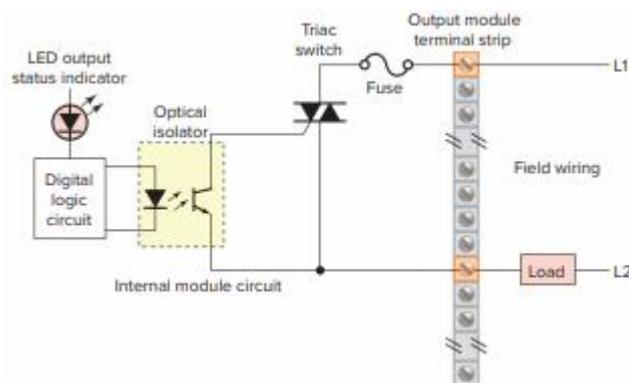
I/O membentuk antarmuka (*interface*), dimana perangkat medan seperti, sensor, relay, push button dan sebagainya dihubungkan ke *controller*. Perangkat *input* dihubungkan dengan terminal *input*, sedangkan perangkat *output* dihubungkan dengan terminal *output*. Dalam modul I/O untuk mengisolasi listrik antara sirkuit internal dan terminal I/O, digunakan isolator optik untuk menghubungkan sirkuit dan mencegah kerusakan prosessor karena transien dari tegangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27 dan Gambar 2.28.



Gambar 2.27 Rangkaian Modul Input

Sumber : (Petruzella, 2017)

Gambar 2.27 menunjukkan rangkaian untuk satu *input* dari modul *input* digital AC. *Filter* dan resistor digunakan untuk menghilangkan sinyal yang disebabkan oleh interferensi listrik. *Rectifier* sebagai konverter AC ke DC untuk disuplai ke dioda zener yang menetapkan batas minimum tegangan yang dapat dideteksi oleh isolator optik. Ketika cahaya dari LED mengenai fototransistor, konduksi terjadi dan status *input* dikomunikasikan secara logika ke prosesor. Sirkuit logika memproses sinyal digital ke prosesor, dimana sirkuit kontrol internal PLC beroperasi pada tegangan kurang dari atau sama dengan 5 VDC.



Gambar 2.28 Rangkaian Modul Output

Sumber : (Petruzella, 2017)

Gambar 2.28 menunjukkan rangkaian untuk satu *output* dari modul *output* digital AC. Sebagai bagian dari PLC, modul *output* beroperasi mengatur status

output sesuai dengan program. Saat prosesor meminta beban *output* untuk disuplai tegangan, LED akan memancarkan cahaya yang mengubah fototransistor konduksi. Hal ini akan memicu TRIAC menjadi konduksi, yang memungkinkan arus mengalir ke beban. Masing-masing modul memiliki indikator berupa LED yang menunjukkan status, baik itu *input* maupun *output* (Petruzella, 2017).

2.4.4 Memori

Memori adalah elemen yang menyimpan informasi, program, dan data. Memori PLC mencakup ruang untuk program yang dibuat *user* serta lokasi memori yang dapat dialamatkan untuk penyimpanan data. Proses penyimpanan data di memori disebut *create*, sedangkan pengambilan data disebut *read*.

Memori dibagi kedalam dua kategori, yaitu *volatile* dan *non-volatile*. Memori *volatile* akan kehilangan informasi yang tersimpan jika semua daya operasi terputus. Memori *non-volatile* tidak akan kehilangan informasi yang tersimpan meskipun daya terputus. PLC memiliki memori yang dapat diprogram untuk membuat program kontrol. Beberapa jenis memori yang menunjang kemampuan operasi PLC, antara lain:

1. *Read Only Memory* (ROM), bersifat *non-volatile* yang biasanya digunakan untuk menyimpan program dan data sebagai kemampuan dari PLC.
2. *Random Access Memory* (RAM), bersifat *volatile* yang biasanya digunakan untuk *create* dan *read* data. RAM digunakan sebagai tempat penyimpanan data sementara yang memungkinkan perubahan data secara cepat. Kebanyakan PLC menggunakan teknologi CMOS-RAM karena memiliki arus yang rendah dan dapat mempertahankan memori dalam waktu yang lama saat daya terputus (penggunaan baterai).

3. *Erasable Programmable Read-Only Memory* (EPROM), digunakan untuk mencadangkan, menyimpan, atau mentransfer program PLC. EPROM dirancang agar data yang tersimpan didalamnya dapat dibaca, tetapi tidak mudah untuk diubah.
4. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM), bersifat *non-volatile* yang digunakan untuk penyimpanan program secara permanen dan dapat diubah oleh perangkat pemrograman (PC).
5. *Flash EEPROM*, digunakan untuk penyimpanan cadangan, dimana dapat menyimpan dan mengambil data secara cepat. Jika daya mati saat PLC dengan memori *flash* beroperasi, PLC tidak kehilangan data kerja apapun saat dipulihkan.

2.5 *Human Machine Interface* (HMI)



Gambar 2.29 *Human Machine Interface*

Sumber : (Electric, 2020)

HMI merupakan media atau perangkat yang menghubungkan antara manusia dengan mesin. HMI memiliki kemampuan untuk mengumpulkan, mengolah data yang didapat dari mesin untuk dijadikan sebuah informasi, sehingga mudah dimengerti oleh manusia. Tujuan dari HMI adalah untuk meningkatkan interaksi

antara mesin dan manusia yang menjadi operator melalui tampilan layar untuk mengontrol dan mendapatkan informasi sistem (Haryanto & Hidayat, 2016).

HMI dapat berupa pengendali dan visualisasi status dalam sebuah sistem baik itu bersifat *manual* atau secara *real time*. Visualisasi HMI tersedia dengan cukup lengkap, meliputi tombol, lampu status, *slider*, grafik, alarm dan sebagainya. Sistem HMI bekerja dengan membaca data yang dikirimkan melalui I/O yang digunakan oleh *controller* dari sistem. HMI membaca dan mengirim *signal* data melalui komunikasi, dimana umumnya tersedia *serial port*, yaitu bisa berupa RS232, RS422, atau RS485 dan *ethernet port*.

2.6 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju perubahan energi terhadap waktu dalam besaran tegangan dan arus, atau jumlah energi yang dihasilkan dalam suatu sirkuit listrik. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan *watt* (W) atau *horsepower* (HP), dimana 1 HP setara dengan 746 watt (Shintawaty, 2013). Daya listrik dibagi menjadi 3, yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Daya listrik dinyatakan dalam persamaan (2.17).

$$P = V \times I \quad (2.17)$$

Dimana P adalah daya listrik, V adalah tegangan dan I adalah arus.

2.6.1 Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang digunakan untuk melakukan energi sebenarnya. Daya aktif digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi lain seperti cahaya, gerak maupun bunyi. Satuan daya aktif, yaitu W (*watt*) dan

dilambangkan oleh simbol P yang dinyatakan dalam persamaan (2.18) untuk 1 fasa dan persamaan (2.19) untuk 3 fasa.

$$P_{1\phi} = V x I x \cos \varphi \quad (2.18)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} x V_{ll} x I_{ll} x \cos \varphi \quad (2.19)$$

2.6.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet, atau daya yang ditimbulkan oleh beban yang bersifat induktif. Satuan daya reaktif, yaitu VAR (*volt ampere reaktif*) dan dilambangkan oleh simbol Q yang dinyatakan dalam persamaan (2.20) untuk 1 fasa dan persamaan (2.21) untuk 3 fasa.

$$Q_{1\phi} = V x I x \sin \varphi \quad (2.20)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} x V_{ll} x I_{ll} x \sin \varphi \quad (2.21)$$

2.6.3 Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus listrik, atau hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Satuan daya semu, yaitu VA (*volt ampere*) dan dilambangkan oleh simbol S yang dinyatakan dalam persamaan (2.22) untuk 1 fasa dan persamaan (2.23) untuk 3 fasa.

$$S_{1\phi} = V x I \quad (2.22)$$

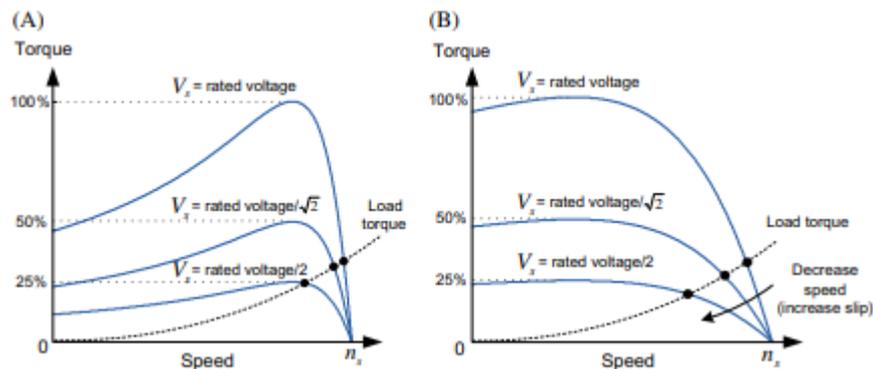
$$S_{3\phi} = \sqrt{3} x V_{ll} x I_{ll} \quad (2.23)$$

2.7 Metode Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Dalam pengoperasiannya, kecepatan motor induksi 3 fasa tergantung pada *slip* dan kecepatan *sinkron* yang diberikan beban. Oleh karena itu, kendali kecepatan motor induksi 3 fasa diklasifikasi menjadi 2 metode, yaitu *slip control* dan *synchronous speed control*.

2.7.1 Slip Control

Pada frekuensi stator yang konstan, kecepatan motor induksi dapat divariasikan sesuai dengan *slip*, dimana *slip* dapat diubah dengan variasi dari tegangan stator atau resistansi rotor. Pada kendali kecepatan dengan variasi tegangan stator, berdasarkan persamaan (2.15) dapat dilihat bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor induksi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan stator. Gambar 2.30 menunjukkan kurva torsi terhadap kecepatan dengan variasi tegangan stator, dimana dapat dilihat bahwa kendali kecepatan dengan variasi tegangan stator hanya tersedia untuk rentang yang terbatas. Kecepatan yang dikontrol bergantung pada nilai *slip* maksimum, dimana torsi maksimum tercapai. Berdasarkan Gambar 2.30, dapat dilihat bahwa motor dengan desain C dan D memiliki rentang kendali kecepatan yang lebih luas daripada motor desain A dan B.



Gambar 2.30 Karakteristik Torsi-Kecepatan Berdasarkan Variasi Tegangan Stator.

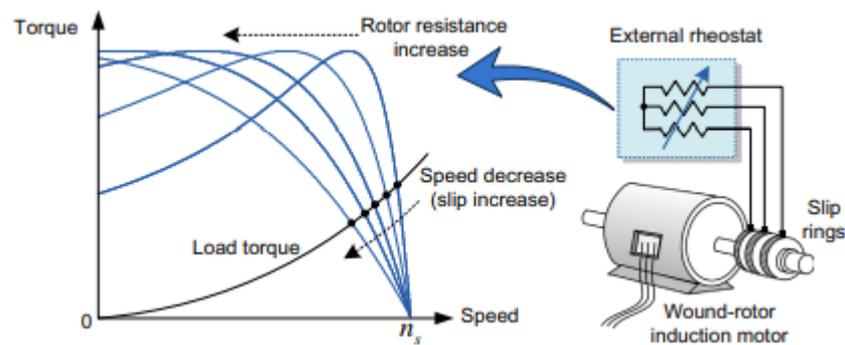
(A) Motor Desain A dan B, dan (B) Motor Desain C dan D

Sumber : (Kim, 2017)

Berdasarkan persamaan (2.24), *slip* maksimum berbanding lurus dengan resistansi rotor. Jadi, mengubah resistansi rotor akan mengubah bentuk kurva torsi terhadap kecepatan sesuai dengan operasi kecepatan motornya. Gambar 2.31 menunjukkan kurva torsi-kecepatan untuk tahanan rotor yang berbeda-beda.

$$s_{max} = [R_r / \sqrt{R_r^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}] \quad (2.24)$$

Kendali kecepatan dengan variasi resistansi rotor harus menggunakan motor induksi tipe rotor belitan. Kendali ini membutuhkan *rheostat* eksternal ke belitan rotor melalui cincin *slip*. Mengubah nilai *rheostat* akan mengubah kecepatan motor, tetapi rentang kendali kecepatan yang dapat dikontrol terbatas. Selain itu, dengan memasukkan nilai resistansi yang terlalu besar ke dalam sirkuit rotor akan mengurangi efisiensi *drives*.



Gambar 2.31 Kurva Kendali Kecepatan dengan Variasi Resistansi Rotor

Sumber : (Kim, 2017)

Dalam metode kendali kecepatan dengan variasi tegangan stator atau resistansi rotor, kecepatan dianggap berubah dengan memvariasikan *slip* pada frekuensi stator yang konstan. Karena efisiensi motor induksi bergantung pada *slip* operasi, maka pengurangan kecepatan dengan metode ini akan menyebabkan penurunan efisiensi.

2.7.2 Synchronous Speed Control

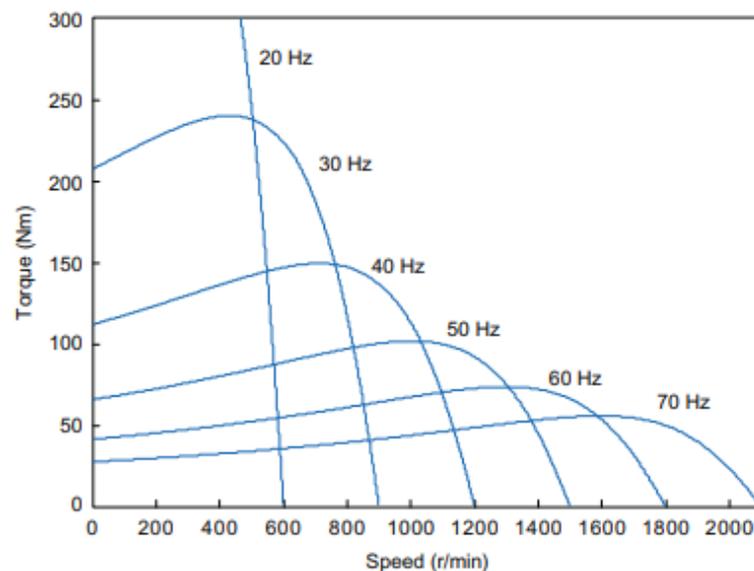
Rotor motor induksi mengikuti medan putar magnet stator pada kecepatan sinkron, yang sebanding dengan frekuensi statornya sebagaimana persamaan (2.1). Meskipun kecepatan sinkron dapat diubah dengan mengubah jumlah kutub motor, hal ini tidak efektif dan rumit, maka lebih efektif untuk mengubah frekuensi stator. Jika mengubah frekuensi stator, dimana tegangan stator tetap konstan, maka variasi dari frekuensi stator menyebabkan perubahan torsi dan kecepatan seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 2.32. Dari metode kontrol kecepatan, teknologi volt per hertz (V/f) adalah yang paling ekonomis dan mudah diterapkan. V/f mengontrol kecepatan sinkron motor dengan memvariasikan tegangan dan frekuensi suplai daya motor, dimana rasionya dijaga konstan (Petruzella, 2016).

Dari persamaan (2.5), dapat dilihat bahwa fluks celah udara bergantung pada rasio tegangan stator (V_s) terhadap frekuensi stator (f_s) yang dinyatakan pada persamaan (2.25).

$$\phi \propto \frac{E_s}{f_s} \approx \frac{V_s}{f_s} \quad (2.25)$$

dimana, $E_s = 4,44 f_s N_s \phi K_{\cos}$.



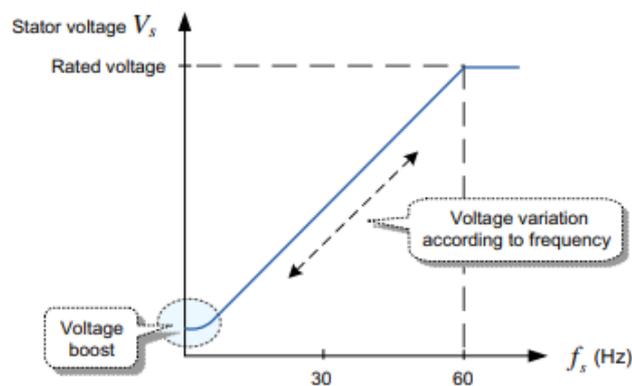
Gambar 2.32 Karakteristik Torsi-Kecepatan Terhadap Perubahan Frekuensi

Sumber : (Kim, 2017)

Gambar 2.32 menunjukkan pengaruh perubahan frekuensi stator tanpa perubahan tegangannya. Pengurangan frekuensi stator tanpa perubahan tegangannya akan menyebabkan peningkatan fluks celah udara, sehingga menjenuhkan motor dan berakibat pada peningkatan arus magnetisasi, rugi-rugi inti, rugi-rugi tembaga stator dan distorsi pada arus dan tegangan saluran.

Sedangkan, jika peningkatan frekuensi stator tanpa perubahan tegangannya menyebabkan penurunan torsi motor (Dorjee, 2014).

Saat mengontrol kecepatan operasi motor dengan memvariasikan tegangan stator dengan frekuensi stator secara linier, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.33, maka fluks celah udara (V/f) akan konstan, dimana arus rotor dan torsi akan konstan juga. Pada frekuensi rendah, karena pengaruh *drop* tegangan pada resistansi dan reaktansi stator, besarnya tegangan stator dengan V/f tidak akan cukup untuk menjaga nilai konstan fluks celah udara. Oleh karena itu, supaya V/f konstan pada frekuensi rendah diperlukan peningkatan tegangan stator untuk mentolerir penurunan tegangan stator tersebut (Kim, 2017).



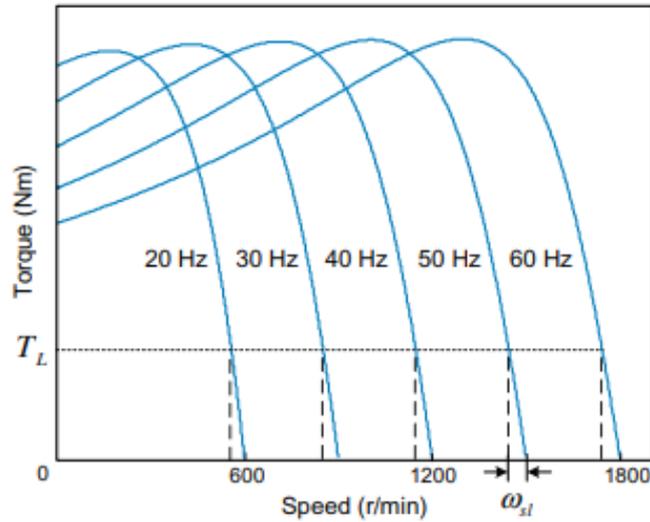
Gambar 2.33 Kurva Kontrol V/f

Sumber : (Kim, 2017)

Penggunaan kontrol V/f membuat torsi dan arus rotor motor tidak bergantung pada frekuensi stator, dimana kecepatan sinkron sebanding dengan frekuensi stator. Kontrol V/f digunakan untuk kontrol kecepatan dibawah *rated speed*. Jika frekuensi stator ditingkatkan lebih dari *rated frequency*, rasio V/f tidak dapat dipertahankan karena batasan dari *rated speed*. Hal ini menyebabkan torsi maksimum berkurang karena fluks celah udara berkurang.

Gambar 2.34 menunjukkan torsi *output* yang konstan terhadap kecepatan untuk frekuensi slip yang sama. Jadi, meskipun kecepatan dikurangi dengan

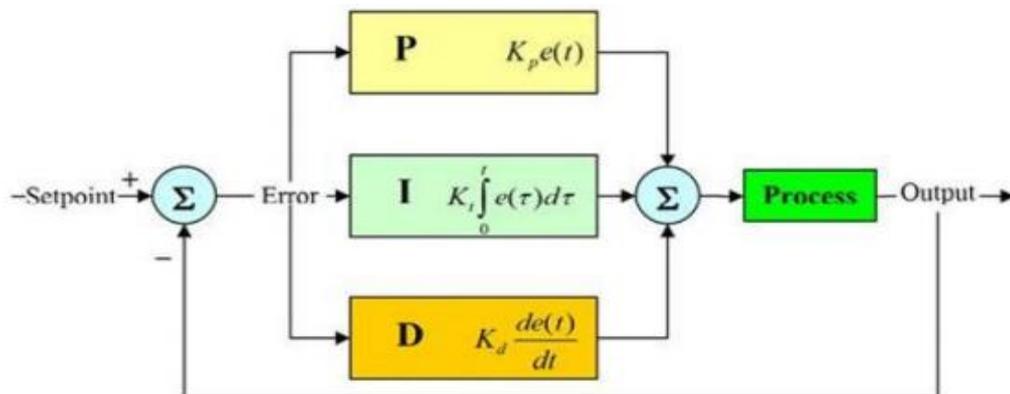
penurunan terhadap frekuensi stator, slip dapat dijaga supaya tetap rendah sehingga efisiensi tidak menurun.



Gambar 2.34 Karakteristik Torsi-Kecepatan dengan Kontrol V/f
 Sumber : (Kim, 2017)

2.8 Proportional, Integral, Derivative (PID)

Kontroler PID banyak digunakan di industri untuk tujuan kendali kecepatan. PID menghitung nilai *error* sebagai pembanding antara nilai *output* proses yang terukur dengan nilai referensi yang diinginkan. Perhitungan kontroler PID melibatkan tiga konstanta yang terpisah, yaitu *proportional*, *integral*, *derivative* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.35 (Idoko et al., 2017).



Gambar 2.35 Diagram Blok Kontroler PID
 Sumber : (Idoko et al., 2017)

Persamaan bentuk umum dari PID ideal ditunjukkan dalam persamaan (2.26).

$$CO(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.26)$$

dimana:

$CO(t)$: *output* kontroler

$e(t)$: selisih antara *set point* dengan nilai *output* proses

K_P : *gain* proporsional

T_I : *time* integral

T_D : *time* derivative

K_I : *gain* integral (K_P/T_I)

K_D : *gain* derivative ($K_P T_D$)

Menurut (Setiawan, 2008), aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan setiap konstanta dasar kontroler PID. Masing-masing dari ketiga konstanta tersebut memiliki fungsi:

1. Kontrol Proporsional (P), berfungsi untuk mempercepat respon *output* proses (memperkecil waktu penetapan proses)
2. Kontrol Integral (I), berfungsi untuk menghilangkan *steady state error* antara *setpoint* dengan *output* proses
3. Kontrol Derivative (D), berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien *output* proses.

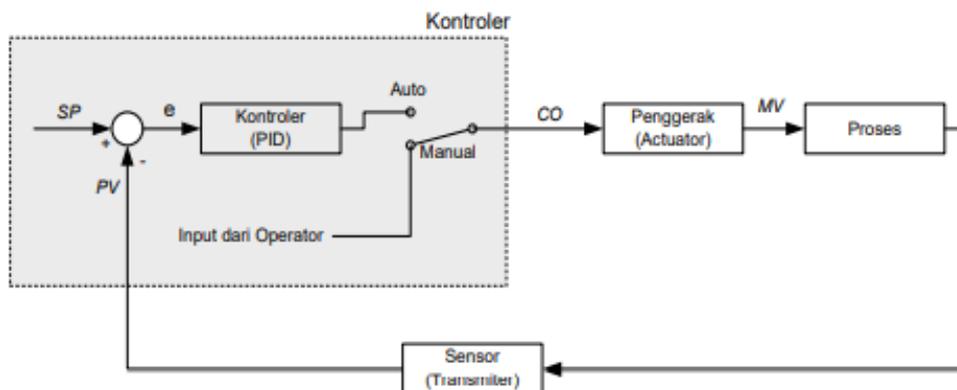
Dalam kontrol proses, terdapat 2 karakteristik model proses untuk mendapatkan model matematis *plant* untuk mencari parameter PID yang optimal. Model proses adalah hubungan sebab akibat antara variabel *input* dengan variabel *output* proses (PV). Kedua karakteristik model proses tersebut, yaitu model proses *self-regulating* (model proses yang sifatnya stabil) dan model proses *non self-*

regulating (model proses yang sifatnya tidak stabil), dimana penelitian ini menggunakan model proses *self-regulating* karena model prosesnya bersifat stabil (Setiawan, 2008).

Untuk kepentingan perancangan dan tuning parameter kontrol PID nya, model proses *self-regulating* menggunakan pendekatan model matematis FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) yang dicirikan oleh tiga buah parameter berikut:

1. *Process transport delay* (*delay* atau keterlambatan transportasi proses) – L
2. *Process time constant* (konstanta waktu proses) – T
3. *Process static gain* (*gain* statis proses) – K

Ketiga parameter tersebut menggambarkan dinamika proses, dimana dapat diidentifikasi dengan sebuah eksperimen yang dinamakan *Bump Test* atau tes sinyal tangga secara *open loop* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.36.



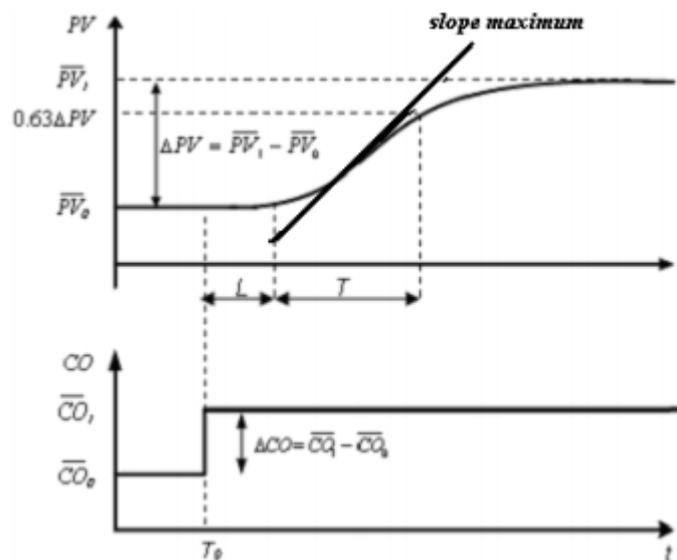
Gambar 2.36 Eksperimen *Bump Test* Mode Kontrol Manual (*Open Loop*)

Sumber : (Setiawan, 2008)

Secara teknis, *Bump Test* dilakukan dengan cara memberi perubahan sinyal tangga (*step signal*) *output* kontroler (CO) saat proses mengalami keadaan tetap (*steady state*) disekitar titik kerja nominalnya. Kemudian respon dari variabel *output* (PV) direkam dan dianalisa. Tahapan eksperimen *Bump Test* dilakukan dengan 4 tahap, yaitu:

1. Membuat sistem kontrol *open loop* dan *setting* nilai CO secara manual
2. Sebelum dilakukan eksperimen, perlu dipastikan proses telah dalam keadaan tetap (*steady state*) yaitu, tidak ada perubahan beban atau gangguan
3. Selama perekaman data *output* proses, perlu dipastikan kembali tidak terjadinya perubahan beban
4. Mengubah *output* kontroler dari nilai *steady state* awal menjadi nilai yang baru secara mendadak (*step*). Perubahan nilai *step* pada CO dapat bernilai positif (nilai $CO_1 > CO_0$) atau bernilai negatif (nilai $CO_1 < CO_0$). Perubahan CO sebaiknya tidak terlalu besar (umumnya 5%-10%), agar tidak mengganggu aspek *safety* dan menurunkan kualitas produk operasi proses secara ekstrim (*upset*).

Gambar 2.37 menunjukkan grafik tipikal model proses FOPDT yang diperoleh dari eksperimen *Bump Test*.



Gambar 2.37 *Step Response* Eksperimen *Bump Test* Model FOPDT

Sumber : (Setiawan, 2008)

Menurut (Setiawan, 2008), mengacu pada grafik respon Gambar 2.37, parameter proses FOPDT dapat diperoleh, yaitu:

1. *Process Transport Delay* (keterlambatan transportasi proses) – L

Waktu keterlambatan transportasi proses dihitung saat terjadinya perubahan sinyal *step* (CO) sampai dengan saat variabel proses (PV) mulai menanggapi *input* dari sinyal *step* (CO).

2. *Process Time Constant* (konstanta waktu proses) – T

Waktu yang diperlukan PV untuk mencapai kurang lebih 63% dari keadaan *steady* akhir. Perhitungan nilai konstanta waktu dimulai saat PV mulai menanggapi perubahan CO. Konstanta waktu proses dapat juga dihitung berdasarkan gradien atau *slope max* yang terjadi pada saat transien, yang dinyatakan dalam persamaan (2.27).

$$T = \frac{\Delta PV}{slope\ max} \quad (2.27)$$

dimana ΔPV adalah deviasi dan *slope max* adalah gradien *output* proses maksimum saat transien.

Nilai konstanta waktu proses juga mempengaruhi waktu cuplik (T_c) yang harus digunakan pada sebuah kontroler digital. Agar tidak terjadi *aliasing*, waktu cuplik yang digunakan harus pada kontroler digital harus jauh lebih kecil dari konstanta waktu proses yang akan dikontrol (nilai T_c yang dipilih umumnya paling tidak sebesar $0.1 T$).

3. *Process Static Gain* (*gain* statis proses) – K

Gain statis proses adalah perbandingan perubahan PV terhadap perubahan CO dalam keadaan *steady*, yang dinyatakan dalam persamaan (2.28).

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{PV_1 - PV_0}{CO_1 - CO_0} \quad (2.28)$$

Nilai *gain* ini menunjukkan kesensitifan dari proses, semakin besar *gain* statis, maka proses semakin sensitif. Hal ini berarti perubahan pada CO akan menghasilkan deviasi PV yang relatif besar. *Gain* statis proses bergantung dari proses dan sifat penggerakannya, sehingga dapat bernilai positif atau negatif.

Setelah eksperimen *Bump Test* dan analisa respon dilakukan, parameter L, T, dan K digunakan untuk mencari nilai konstanta kontroler PID, yaitu K_P , K_I , dan K_D atau K_P , T_I , dan T_D dengan menggunakan metode tuning kendali PID, seperti yang terdapat pada.

Tabel 2.2 Beberapa Metode Tuning PID Proses FOPDT

Sumber : (Setiawan, 2008)

Metode	K_P	T_I	T_D	Keterangan
Ziegler-Nichols	$\frac{1.2 T}{KL}$	$2L$	$0.5L$	Quarter decay ratio
Chien Regulator	$\frac{0.95T}{KL}$	$2.38L$	$0.42L$	0% overshoot $0.11 < \frac{L}{T} < 1$
	$\frac{1.2T}{KL}$	$2L$	$0.42L$	20% overshoot $0.11 < \frac{L}{T} < 1$

Keterangan *quarter decay ratio* pada Tabel 2.2, berarti akan menghasilkan *overshoot* yang terus mengecil sebesar 1/4 dari *overshoot* sebelumnya.

2.9 Protokol Modbus

Menurut (Hittanagi et al., 2018), protokol Modbus dikembangkan oleh Modicon pada tahun 1979 untuk sistem kontrol proses. Modbus adalah protokol komunikasi dasar yang universal dan banyak diterapkan di industri. Modbus merupakan sistem dengan prinsip *master/slave* yang memungkinkan perangkat *master* terhubung ke satu atau lebih perangkat *slave* dalam jaringan, dimana dapat

diimplementasikan menggunakan transmisi RS-232 atau RS-485. Kabel *twisted pair* digunakan pada RS-485, dimana satu kabel difungsikan untuk mengirimkan data dan yang lainnya untuk menerima data. Dalam memberi *query* ataupun respon, Modbus menyediakan fitur yang ditentukan oleh kode fungsi. Kode fungsi inilah yang akan menentukan perintah yang harus dijalankan oleh perangkat *slave*, seperti menerima data, menginformasikan status dan sebagainya. Modbus memiliki memori untuk menyimpan data berdasarkan alamat dan kode fungsi yang digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Alamat Memori dan Kode Fungsi Modbus

Sumber : (Hittanagi et al., 2018)

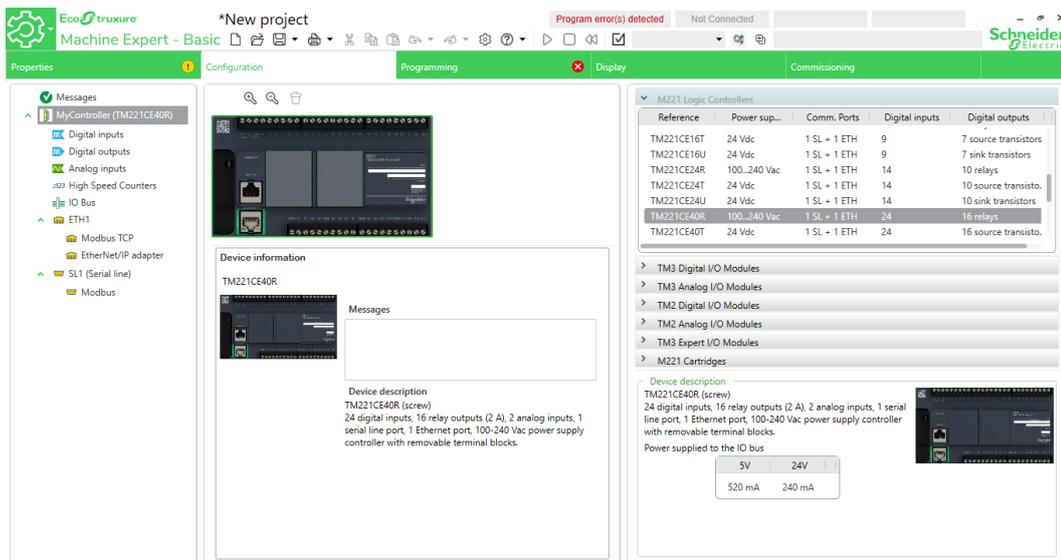
Alamat	Kode Fungsi	Tipe Objek	Ukuran Objek	Keterangan
1 – 9999	01	<i>Read or Write</i>	Single Bit	Coils
10001 - 19999	02	<i>Read only</i>	Single Bit	Discrete Input
30001 – 39999	04	<i>Read only</i>	16-Bit Word	Input Register
40001 - 49999	03	<i>Read or Write</i>	16-Bit Word	Holding Register

Ada dua mode transmisi data, yaitu ASCII dan RTU, dimana penelitian ini menggunakan mode transmisi RTU, dimana Modbus RTU merupakan protokol komunikasi *point to point*. Pada mode *unicast*, *master* mengirimkan *query* ke satu *slave*, dimana setelah *query* tersebut diproses, maka *slave* akan mengirim balasan kembali ke *master*. Sedangkan pada mode *broadcast*, *master* mengirimkan *query* ke semua *slave* secara bersamaan menggunakan alamat *broadcast*, tetapi tidak ada balasan yang dikirim *slave* ke *master*.

2.10 EcoStruxure Machine Expert-Basic

EcoStruxure Machine Expert-Basic merupakan *platform* pemrograman yang semula bernama *Somachine Basic* yang dikembangkan oleh perusahaan Schneider

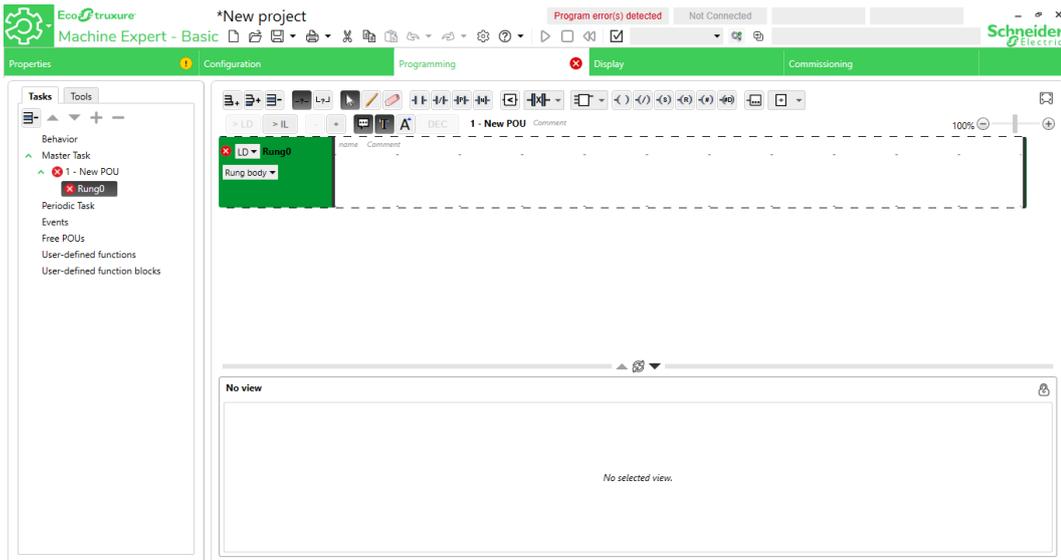
Electric. *Software* ini diperuntukkan untuk membuat program PLC yang dikhususkan untuk tipe M221. Inti dari *software* ini adalah bahasa pemrograman PLC, berupa *ladder diagram*, *function block diagram* maupun *structure text* untuk mendefinisikan cara kerja suatu *plant*.



Gambar 2.38 Tampilan Konfigurasi EcoStruxure Machine Expert-Basic

Gambar 2.38 menunjukkan tampilan konfigurasi, dimana pengguna dapat mengatur unit kontroler yang akan dipakai, modul ekspansi dan konfigurasi alamat PLC. Selain itu, bagian komunikasi juga diatur pada *section page* ini, seperti Ethernet ataupun Serial tergantung pada unit kontroler yang digunakan.

Gambar 2.39 menunjukkan tampilan pemrograman, dimana pengguna mendefinisikan alur kerja suatu *plant* kedalam logika pemrograman, umumnya *ladder diagram*. Semua fitur untuk membuat program terdapat pada *section page* ini, termasuk pembuatan tabel animasi untuk memonitor kondisi *input*, *output*, dan memori yang digunakan pada program saat mode *Run* diaktifkan.



Gambar 2.39 Tampilan Pemrograman EcoStruxure Machine Expert-Basic

2.11 Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan konsep dan judul penelitian, terdapat penelitian terkait yang sebelumnya telah dilakukan, yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Penelitian Sebelumnya

Judul	Penulis	Tahun	Isi Penelitian
<i>Design and Implementation of Constant Speed Control System for the Induction Motors Using Programmable Logic Controller (PLC) and Variable Frequency Drive (VFD)</i>	Khalid Hussien Khudier, Khalid G. Mohammed, dan Mayyadah Sahib Ibrahim	2021	Penelitian dilakukan dengan PLC menggunakan VFD input 3 fasa untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 fasa terhadap variasi beban. Input kecepatan dilakukan oleh PLC dan <i>feedback</i> kecepatan aktual diukur menggunakan tachometer melalui <i>Analog to Digital (ADC) Converter</i> .
<i>Design of Tuning Mechanism of PID Controller for Application in Three Phase</i>	Alfred A. Idoko, Iliya. T. Thuku, S. Y. Musa, dan Chinda Amos	2017	Penelitian dilakukan dengan kontrol PID untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan metode

Judul	Penulis	Tahun	Isi Penelitian
<i>Induction Motor Speed Control</i>			tuning Ziegler-Nichols. Perancangan yang dilakukan menggunakan pemodelan MATLAB dan disimulasikan pada Simulink
<i>Comparison between Performance of Conventional, Fuzzy and Fractional Order PID Controllers in Practical Speed Control of Induction Motor</i>	Mohammadreza Vahedpour, Abolfazl Ranjbar Noei, dan Hedyeh Agheh Kholerdi	2016	Penelitian ini membandingkan kontrol PID konvensional, PID-Fuzzy dan FOPID dengan menggunakan kontrol skalar yang disimulasikan terlebih dahulu. Kemudian, dilakukan uji praktik menggunakan inverter, tachogenerator dan komputer.
<i>Performance Evaluation of Fuzzy-PID in Speed Control of Three Phase Induction Motor</i>	H Maghfiroh, J S Saputro, F Adriyanto, A Sujono, R L Lambang	2021	Penelitian ini dilakukan sebagai bentuk evaluasi terhadap kontrol PID, yaitu menggunakan Fuzzy Logic Control untuk mengatur PID secara online. Adapun metode kontrol yang digunakan adalah kontrol vektor <i>Direct Torque Control</i> (DTC). Kontrol ini diaplikasikan dalam VFD yang dimodelkan pada MATLAB atau Simulink.
<i>Electric Drive System for Speed Adjusting of a Three-Phase Asynchronous Motor using a PLC</i>	Ene Lucian-Vasile, dan Sănătescu Diana-Ramona	2017	Sistem pengendali kecepatan motor induksi 3 fasa pada penelitian ini menggunakan PLC sebagai kontroler, dan VFD sebagai <i>driver</i> motor dengan 3 cara yang berbeda satu sama

Judul	Penulis	Tahun	Isi Penelitian
<i>for Propelling an Electric Vehicle</i>			lain. Adapun ketiga cara tersebut meliputi, otomatis, manual, dan GSM. Cara otomatis didasarkan pada pengaturan kecepatan di awal sebelum motor dijalankan. Cara manual berupa pengaturan kecepatan dilakukan melalui potensiometer atau HMI termasuk saat motor sedang dijalankan. Cara GSM berupa pengaturan kecepatan melalui ponsel pengguna dengan SMS.
<i>Speed Control Technique for Conveyor Using PSO based PID with Programmable Logic Controller</i>	Suppachai Howimanporn, Sunphong Thanok, Sasithorn Chookaew, dan Warin Sootkaneung	2017	Penelitian ini berfokus pada penggunaan <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO) untuk mengidentifikasi pengontrol PID yang optimal dalam kontrol kecepatan sistem konveyor. PLC digunakan sebagai kontroler dan <i>feedback</i> berasal dari <i>Encoder</i> melalui komunikasi Ethernet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengontrol PID berbasis PSO memberikan fluktuasi transien yang lebih rendah dan <i>steady state error</i> yang lebih kecil.
<i>Measurement and Control System for Variable-Frequency Speed Regulating of</i>	Xiaoming Cui, Bajin Li, Zhiwei Kou, dan Yanjun Qiao	2019	Penelitian ini memfokuskan cara monitoring pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa secara <i>real time</i> . Pengendalian dilakukan dengan kontroler

Judul	Penulis	Tahun	Isi Penelitian
<i>Motor based on PLC and HMI</i>			PLC dan VFD yang diintegrasikan dengan unit HMI. Kontrol yang dibuat merupakan <i>open loop system</i> , dimana tidak adanya <i>feedback</i> tetapi hanya sebatas mengendalikan putaran motor dengan VFD dan menampilkan indikator kecepatan pada HMI.
<i>Controller Based Performance Measures of Speed Control of Electrical Motor for Industrial Applications</i>	R Manikandan, dan S Smys	2017	Penelitian ini menyajikan analisis kontroler PID untuk pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa, dimana pemodelan matematis motor induksi didasarkan pada teori <i>Stationary Reference Frame</i> yang disimulasikan pada MATLAB.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, penelitian yang dilakukan ini jelas berbeda. Penelitian ini merancang suatu sistem kendali tertutup dimana akan memanfaatkan kendali PID yang tertanam pada PLC. PLC-VFD diintegrasikan dengan protokol komunikasi *modbus* sedangkan, PLC-HMI diintegrasikan dengan *ethernet*. Kendali PID juga dirancang supaya dapat memperbaiki kesalahan dari kecepatan aktual motor yang terukur terhadap nilai *setpoint* kecepatan yang diinginkan pengguna, dimana proses penyetelannya akan menggunakan metode *manual tuning* untuk mendapatkan hasil respon transien yang cepat dan teredam secara kritis. Selain itu, unit yang digunakan untuk penelitian juga berbeda dari penelitian sebelumnya, dimana PLC yang digunakan untuk penelitian ini

merupakan PLC Modicon TM221 merk Schneider dengan *support* port komunikasi *serial* dan *ethernet*, serta 40 I/O. VFD yang digunakan pun berbeda, yaitu VFD Altivar310 dengan *voltage input* 380 VAC 3 fasa kapasitas 4 kW dengan *support* port komunikasi *serial* dan *interface* yang digunakan yaitu HMI GXU3512 dengan *support ethernet*.