

Torka Motor Induksi pada Mesin CNC di PT. Dirgantara Indonesia menggunakan Software PSIM

SENI NURJANAH, NASRUN HARIYANTO, SABAT ANWARI

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email : senurjanahh@gmail.com

Received 19 April 2021 | *Revised* 11 Mei 2021 | *Accepted* 24 Juni 2021

ABSTRAK

Mesin CNC digunakan untuk membuat kerangka pesawat terbang, motor induksi sebagai tenaga penggerak diatur kecepatan putarnya untuk menghasilkan torka sesuai kebutuhan dikendalikan oleh VSD. Pengendalian VSD pada mesin CNC menggunakan software PSIM untuk mengetahui karakteristik mesin CNC dengan tegangan dan frekuensi yang divariasikan agar menghasilkan torka konstan. Analisis karakteristik motor induksi digunakan rangkaian pengganti dan perhitungan matematis. Untuk mengetahui rentan kerja mesin CNC maka arus starting 61,83Ampere; torka starting 23,28N.m; torka maksimum 14,1N.m; putaran sinkron 1500rpm. Pengolahan data dilakukan secara matematis, pada pengukuran mendapatkan torka 35N.m sedangkan simulasi beban 30% menghasilkan torka 4.2N.m; beban 60% menghasilkan torka 8.3N.m; beban 90% menghasilkan torka 12.5N.m. Dapat disimpulkan kendali V/f menghasilkan torka konstan sepanjang pengaturan kecepatan putar.

Kata kunci: *PSIM, Variable Speed Drive, Torka Motor Induksi, Mesin CNC*

ABSTRACT

CNC machines are used to make aircraft frames, the induction motor as the driving force is set to rotate its speed to produce torque as needed, controlled by a variable speed drive. VSD control on CNC machines uses PSIM software to determine the characteristics of CNC machines with varied voltages and frequencies to produce constant torque. Analysis of the characteristics of the induction motor used a replacement circuit and mathematical calculations to determine the working range of the CNC machine. Then the starting current is 61.83Amperes; starting torque 23.28N.m; maximum torque 14.1N.m; synchronous speed 1500rpm. Data processing is done mathematically, the measurement gets 35N.m of torque while the 30% load simulation produces 4.2N.m of torque; 60% load produces 8.3N.m torque; 90% load produces 12.5N.m of torque. It can be concluded that the V/f control produces constant torque throughout the rotational speed setting.

Keywords: *PSIM, Variable Speed Drive, Induction Motor Torque, CNC Machine*

1. PENDAHULUAN

PT. Dirgantara Indonesia memfokuskan salah satu bisnisnya di bidang *Aerostructure*. Bisnis satuan *aerostructure* memproduksi pengembangan rekayasa dan perencanaan **(Indonesia, 2016)**.

Mesin CNC (*ComputerNumericalControl*) paling banyak digunakan pada industri salah satunya adalah PT.Dirgantara Indonesia dengan menggunakan motor induksi sebagai mesin penggerak mesin CNC dalam proses pembuatan komponen di bidang *aerostructure* **(Indonesia, 2016) (Jufrizaldy, Ilyas, & Marzuki, 2020)**.

Mesin bubut CNC proses pemahatan benda kerja memerlukan kecepatan potong yang tetap agar hasil kerja memiliki tingkat presisi tinggi. Agar dapat menghasilkan benda yang halus, torka *spindle* pada saat pemotongan harus dijaga konstan, sedangkan pada saat pemotongan kecepatan *spindle* dapat berkurang yang diakibatkan naiknya torka beban **(Permana & Rameli, 2013)**.

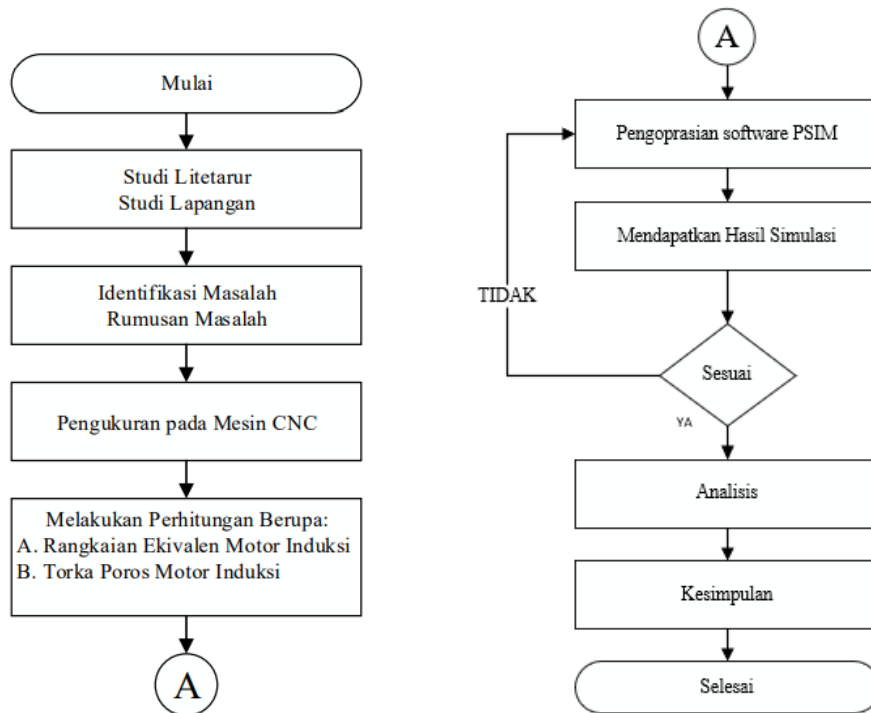
Kendali V/f konstan merupakan salah satu cara untuk mengendalikan kecepatan putar motor induksi dengan merubah tegangan dan frekuensi, tetapi menjaga konstan rasio keduanya. Sehingga dengan cara kendali ini, torka yang dihasilkan dapat dijaga konstan sepanjang daerah pengaturan kecepatan. Hal yang paling umum dalam penerapan cara ini adalah dengan menggunakan perangkat yang dikenal sebagai inverter **(Haryanto, 2011) (Atmam, Tanjung, & Zulfahri, 2018)**.

PSIM merupakan *software* yang dirancang untuk elektronika daya dan kontrol motor **(Powersim, 2020)**. Simulasi pada PSIM terdiri dari tiga program yaitu *circuit schematic editor* - SIMCAD, PSIM *simulator*, *waveform processing* – SIMVIEW **(Asnil, 2013)**. Pada penelitian ini *software* PSIM digunakan untuk simulasi penggerak motor induksi yang di kopel dengan mesin CNC menggunakan pengendalian inverter sehingga mendapatkan karakteristik torka motor induksi pada mesin CNC. Rangkaian pengganti motor induksi digunakan untuk menentukan nilai torka dan nilai torka tersebut menjadi perbandingan dengan hasil simulasi *software* PSIM.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Diagram alir

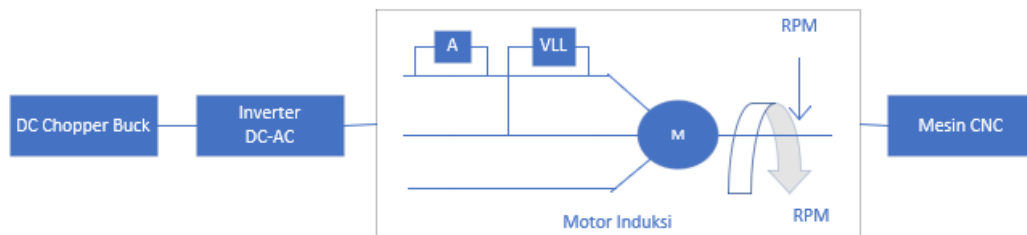
Gambar 1 merupakan alur metodologi yang digunakan secara singkat. Pengamatan lapangan diketahui aliran proses penggunaan mesin CNC setelah itu menjabarkan latar belakang, merumuskan masalah. Pengumpulan data yaitu dengan pengukuran pada mesin CNC dan selanjutnya melakukan perhitungan matematis dan melakukan simulasi pada *software* PSIM.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

2.2. Diagram Blok Sistem

Gambar 2 merupakan perancangan sistematis yang akan dibuat secara umum.

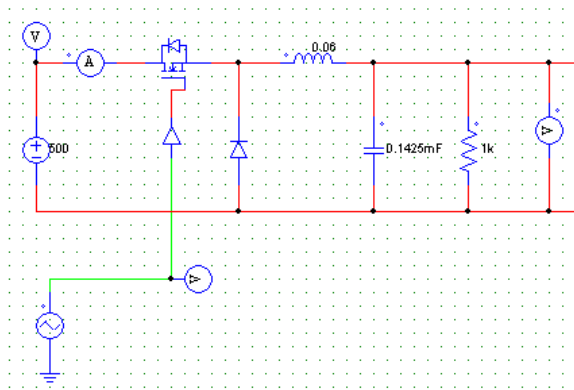


Gambar 2. Blok Perencana Sistematis

Gambar 2 DC *Chopper Buck* merupakan rangkaian untuk sumber tegangan *output* DC yang besarnya diatur sesuai dengan kebutuhan beban (**Nurlana & Murnomo, 2019**). DC Chopper digunakan untuk tegangan masukkan pada inverter (**Juarsah, Facta, & Nugroho, 2015**). Tegangan keluaran DC *Chopper Buck* akan masuk ke dalam inverter, disini inverter berfungsi sebagai rangkaian kontrol *V/f* agar mendapatkan nilai *output* sesuai dengan kebutuhan produksi. Nilai tegangan dan frekuensi yang diatur tersebut lalu masuk ke motor induksi sebagai motor penggerak yang dikopel dengan mesin CNC sehingga mesin CNC mendapatkan beberapa nilai putaran yang dapat diatur pada mata bor (*spindle*).

2.3. DC Chopper Buck

DC *Chopper Buck* atau *Buck Converter* berfungsi untuk mengkonversi tegangan *input* searah yang diatur sesuai perubahan *duty cycle* sehingga tegangan arus searah menjadi sumber arus tegangan yang *variable* (**Wibowo & Facta, 2013**) (**Hushaini & Hasan, 2019**). Rangkaian DC *Chopper Buck* dibangun oleh komponen MOSFET, induktor, kapasitor dan resistor. Gambar 3 merupakan Rangkaian DC *Chopper Buck* pada simulasi PSIM.



Gambar3. Rangkaian DC Chopper Buck

- Untuk parameter dalam DC Chopper Buck digunakan persamaan:

$$D = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (1)$$

Keterangan :

D = *Duty Cycle* (%)

V_{in} = Tegangan *Input Buck Converter* (Volt)

V_{out} = Tegangan *Output Buck Converter* (Volt)

- Menentukan nilai induktor :

$$\Delta IL = 5\% \times I_{out} \quad (2)$$

Keterangan :

ΔIL = *Ripple Arus Induktor* (Ampere)

I_{out} = Arus *Output Konverter* (Ampere)

Maka parameter induktansinya adalah sebagai berikut :

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out}) \times V_{out}}{F \times \Delta IL \times V_{in}} \quad (3)$$

Keterangan:

L = Induktansi (H)

V_{in} = Tegangan *Input Buck Converter* (Volt)

V_{out} = Tegangan *Output Buck Converter* (Volt)

F = Frekuensi *Switching* (Hz)

ΔIL = *Ripple Arus Induktor* (Ampere)

- Menentukan nilai kapasitor :

$$\Delta V_o = 5\% \times V_{out} \quad (4)$$

Keterangan:

ΔV_o = *Ripple Tegangan kapasitor* (Volt)

V_{out} = Tegangan *Output Konverter* (Volt)

- Maka parameter kapasitansinya adalah sebagai berikut :

$$C = \frac{\Delta IL}{F \times \Delta V_o \times 8} \quad (5)$$

Keterangan :

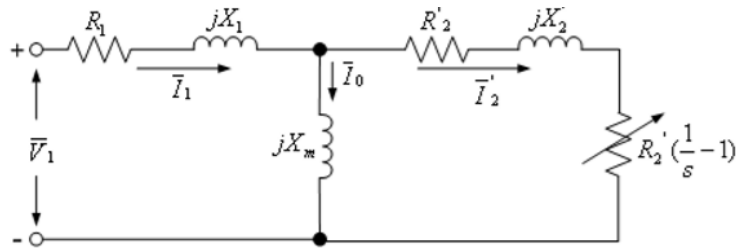
C = Kapasitansi (Farad)

ΔV_o = *Ripple Tegangan kapasitor* (Volt)

F = Frekuensi *Switching* (Hz)

2.4. Perhitungan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Rangkaian pengganti dari rangkaian ekuivalen satu fasa dari motor induksi yang dikopel dengan mesin CNC ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Ekvivalen perphasa dari Motor Induksi

Nilai parameter motor induksi sesuai dengan *name plate* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Name Plate Motor Induksi

Daya (P)	3 HP
Tegangan (Volt)	380 V
Frekuensi (f)	50 Hz
Phasa (F)	3
<i>Pole</i> (p)	4
Resistansi Rotor (R_1)	0.249 ohm
Resistansu Stator (R_2)	0.156 ohm
Induktansi Rotor (X_2)	1.39 mH
Induktansi Stator (X_1)	0.74 mH
Induktansi Gandeng (X_m)	41mH
Momen inersia (J)	0.4 kg.m ²

- Perhitungan tegangan Thevenin adalah:

$$V_{TH} = V_{\emptyset} \frac{Z_M}{Z_m + Z_1} \quad (6)$$

$$V_{TH} = V_{\emptyset} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \quad (7)$$

$$V_{TH} = V_{\emptyset} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (8)$$

Keterangan:

V_{TH} = Tegangan Thevenin (Volt)

R_1 = Resistansi Stator (Ω)

X_1 = Reaktans Stator (Ω)

X_M = Reaktans Magnetisasi (Ω)

- Perhitungan impedansi Thevenin adalah:

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 \cdot Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (9)$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (10)$$

Keterangan:

Z_{TH} = Impedansi Theveni (Ω)

R_{TH} = TahananThevenin (Ω)

X_{TH} = Reaktansi Thevenin (Ω)

R_1 = Tahanan Stator (Ω)

X_1 = Reaktansi Stator (Ω)

X_M = Reaktansi Magnetisasi (Ω)

- Perhitungan slip pada torka maksimum adalah:

$$S_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (11)$$

Keterangan:

S_{max} = Slip Maksimum (%)

R_2 = Tahanan Rotor (Ω)

R_{TH} = Resistansi Thevenin (Ω)

- Perhitungan dari kecepatan putaran sinkron adalah :

$$n_{sync} = \frac{f \times 120}{P} \quad (12)$$

Keterangan:

n_{sync} = Putaran Sinkron (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

P = Pole

- Perhitungan dari putaran sinkron adalah:

$$\omega_{sync} = n_{sync} \times \frac{2\pi rad}{1r} \times \frac{1min}{60s} \quad (13)$$

Keterangan:

ω_{sync} = Kecepatan Sudut (rad/s)

n_{sync} = Kecepatan Sinkron (rpm)

- Perhitungan dari torka *starting* motor adalah :

$$T_{Start} = \frac{3 \times V_{TH}^2 \times R_2}{\omega_{sync} \times [(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (14)$$

Keterangan:

T_{Start} = Torka *Starting* (N.m)

ω_{sync} = Kecepatan Sudut (rad/s)

V_{TH} = Tegangan Thevenin (Volt)

R_{TH} = Resistansi Thevenin (Ω)

X_{TH} = Reaktansi Thevenin (Ω)

R_2 = Tahanan Rotor (Ω)

- Perhitungan dari torka maksimum motor adalah :

$$T_{max} = \frac{3 \times V_{TH}^2}{2 \times \omega_{sync} \times [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (15)$$

Keterangan:

T_{max} = Torka Maksimum (N.m)

ω_{sync} = Kecepatan Sudut (rad/s)

V_{TH} = Tegangan Thevenin (Volt)

R_{TH} = Resistansi Thevenin (Ω)

X_{TH} = Reaktansi Thevenin (Ω)

X_2 = Reaktansi Rotor (Ω)

- Perhitungan dari arus starting adalah

$$I_{start} = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (16)$$

Keterangan:

I_{start} = Arus Starting (Ampere)

V_{TH} = Tegangan Thevenin (Volt)

R_{TH} = Reaktansi Thevenin (Ω)

X_{TH} = Reaktansi Thevenin (Ω)

X_2 = Reaktansi Rotor (Ω)

R_2 = Tahanan Rotor (Ω)

2.5. Perhitungan Torka Poros Motor

Torka merupakan suatu gaya yang dibutuhkan untuk memutar sebuah benda, sehingga benda tersebut berputar pada poros (**Hariyanto, Saodah, & Robby, 2016**) (**Chapman, 1991**). Sebelum menghitung torka pada poros motor perlu diketahui perhitungan-perhitungan seperti persamaan berikut ini.

- Menghitung daya masukan motor menggunakan Persamaan (17) (**Fitzgerald, 1909**):

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (17)$$

Keterangan:

P_{in} = Daya masukan (*watt*)
 $V_{3\phi}$ = Tegangan tiga fasa (*volt*)
 I_{ϕ} = Arus (*ampere*)
 $\cos \theta$ = Faktor daya

- Berdasarkan data *name plate* motor maka nilai η sebesar 0.80 % sehingga daya keluaran motor sebagai berikut ini:

$$P_{out} = \frac{P_{in} \times \eta}{100\%} \quad (18)$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)
 P_{in} = Daya masukan (Watt)
 P_{out} = Daya keluaran (Watt)

- Untuk nilai slip pada motor, menggunakan Persamaan (19):

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \% \quad (19)$$

Keterangan :

Slip = Slip (%)
 n_s = Kecepatan sinkron (rpm)
 n_r = Kecepatan rotor (rpm)

- Untuk kecepatan poros mekanik pada rotor, menggunakan Persamaan (20) :

$$\omega_m = (1 - slip) \times \omega_{sync} \quad (20)$$

Keterangan :

ω_m = Kecepatan poros mekanik (rad/s)
 ω_{sync} = Kecepatan sinkron (rad/s)

Sedangkan, untuk torka beban yang terjadi pada motor dihitung dengan Persamaan (21):

$$T_L = \frac{P_o}{\left(\frac{2\pi}{60}\right) \cdot n_r} \quad (21)$$

Keterangan:

T_L = Torka beban motor (N.m)

Dengan asumsi $\frac{dw}{dt} = 0.1 \text{ rad/s}$, sehingga untuk menghitung torka dinamik yang terjadi pada motor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini (**Desphande, 1990**):

$$T_d = J_T \frac{dw}{dt} \quad (22)$$

Keterangan :

T_d = Torka dinamik motor (N.m)
 J_T = Momen inersia dari sistem penggerak (Kg.m²)
 ω = Kecepatan sudut dalam mekanik (rad/s)

Sehingga untuk menghitung torka motor yang dibutuhkan motor ketika diberikan beban dapat dihitung menggunakan persamaan, berikut ini :

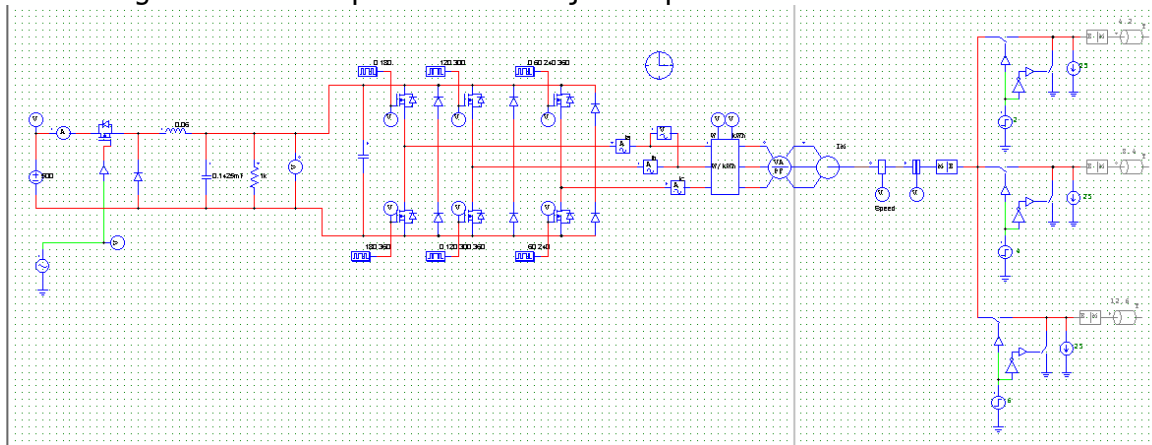
$$T_m = T_L + T_d \quad (23)$$

Keterangan:

T_m = Torka motor (N.m)

2.6. Rangkaian *Variable Speed Drive* pada PSIM

Gambar rangkaian *variable speed drive* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian *Variable Speed Drive* pada PSIM

Pada Gambar 5 rangkaian *variable speed drive* untuk mendapatkan kecepatan putaran dan torsi motor. Tegangan DC dialirkan ke *board DC Chopper Buck* dimana tegangan DC menjadi tegangan arus yang bersifat *variable*. Berdasarkan Persamaan (1) – (5) maka parameter *Chopper Buck* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter DC *Chopper Buck*

Parameter	Simbol	Nilai
Tegangan <i>Input</i>	V_{in}	500V-DC
Arus <i>Output</i>	I_{sc}	5A
Riak Arus	ΔI	5 %
Riak Tegangan	ΔV	5 %
Frekuensi <i>Switching</i>	f	20 kHz

Tegangan keluaran dari DC *Chopper Buck* merupakan tegangan masukan inverter, dimana rasio tegangan dan frekuensi harus dijaga seimbang dengan merubah *duty cycle* pada DC *Chopper Buck*. Kontrol V/f pada inverter ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kontrol V/f

Tegangan <i>Output DC Buck</i> (Volt)	<i>Duty Cycle</i> .	Frekuensi (Hz)
360	0.7	40
405	0.8	45
450	0.9	50

Setelah itu tegangan DC dicacah dan dimodulasi sehingga menjadi tegangan AC lalu dialirkan ke motor induksi tiga fasa. Motor induksi kemudian dikopel dengan mesin CNC, pada mesin CNC akan dilakukan pembebanan sebesar 30%, 60% dan 90%. Adapun nilai parameter-parameter pada rangkaian motor induksi tiga fasa sesuai dengan *name plate* dalam simulasi *software* PSIM ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Name Plate Motor Induksi pada PSIM

Daya (P)	3 HP
Tegangan (Voly)	380 V
Frekuensi (f)	50 Hz
Phasa (F)	3
<i>Pole</i> (p)	4
Resistansi Rotor (R_1)	0.249 ohm
Resisitansi Stator (R_2)	0.156 ohm
Induktansi Rotor (X_2)	1.39 mH
Induktansi Stator (X_1)	0.74 mH
Induktansi Gandeng (X_m)	41mH
Momen inersia (J)	2 kg.m ²

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Perhitungan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Tabel 5 merupakan data mengukur motor induksi pada mesin CNC.

Tabel 5. Data Pengukuran Motor Induksi pada Mesin CNC

NO	Tegangan Phasa phasa (Volt)	Frekuensi (Hz)	Arus Input (A)	Kecepatan Putar (RPM)	Efesiensi Motor (%)
1	110.75	50	15.5	510	80
2	138.58	50	17.7	750	80
3	170.53	50	18.8	980	80
4	187.62	50	19.9	1100	80
5	202.64	50	23.7	1420	80

Hasil pengukuran pada Tabel 5 maka dilakukan perhitungan matematis torca pada poros motor sesuai dengan Persamaan (17) – (23). Berikut adalah Tabel 6 data hasil perhitungan matematis torca motor induksi.

Tabel6. DataPerhitungan Matematis Torka Motor Induksi

Daya Input (Watt)	Daya Output (Watt)	Slip	Kecepatan Rotor ω_m (rad/s)	Torka Load (N.m)	Percepatan Dinamik Motor (N.m)	Torka Dinamik (N.m)	Torka Motor (N.m)
2379	1903	0.7	510	35	0.1	0.2	35.2
3399	2719	0.5	750	34	0.1	0.2	34.2
4442	3554	0.3	980	34	0.1	0.2	34.2
5173	4139	0.3	1100	35	0.1	0.2	34.2
6655	5324	0.1	1420	3.5	0.1	0.2	34.2

3.2. Perhitungan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Phasa

Perhitungan rangkaian ekuivalen motor induksi satu phasa ditunjukkan pada Tabel 7.

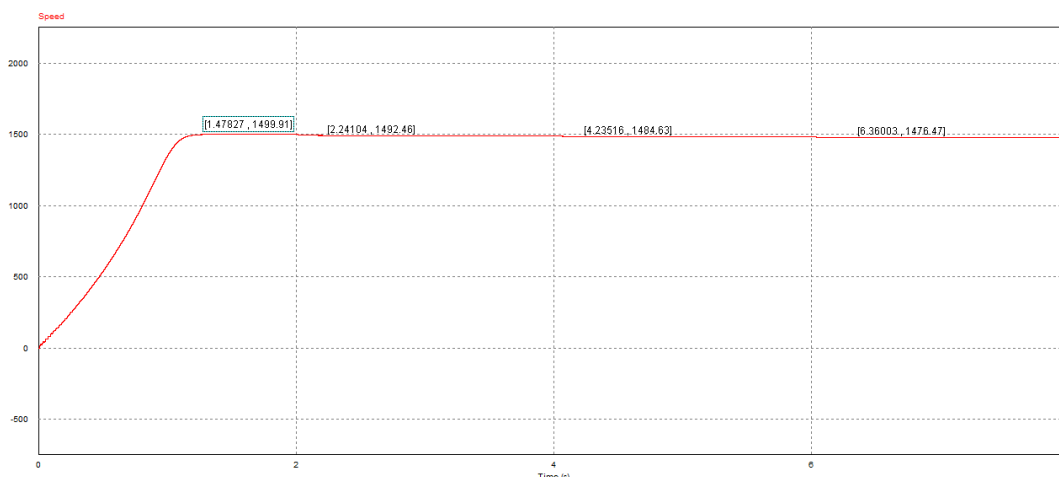
Tabel 7. Hasil Perhitungan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Fasa

No	Perhitungan	Nilai
1	V_{TH}	21,56 Volt
2	R_{TH}	0,089 Ω
3	X_{TH}	$8,87 \times 10^{-5} j \Omega$
4	Z_{TH}	$0,089 + 8,87 \times 10^{-5} j \Omega$
5	S_{Max}	10,76
6	n_{sync}	1500 Rpm
7	ω_{sync}	50 π rad/s
8	T_{start}	7,76 <i>N.m</i>
9	T_{max}	4,7 <i>N.m</i>
10	I_{start}	20,61 A

3.3. Pengujian dengan *Software* PSIM

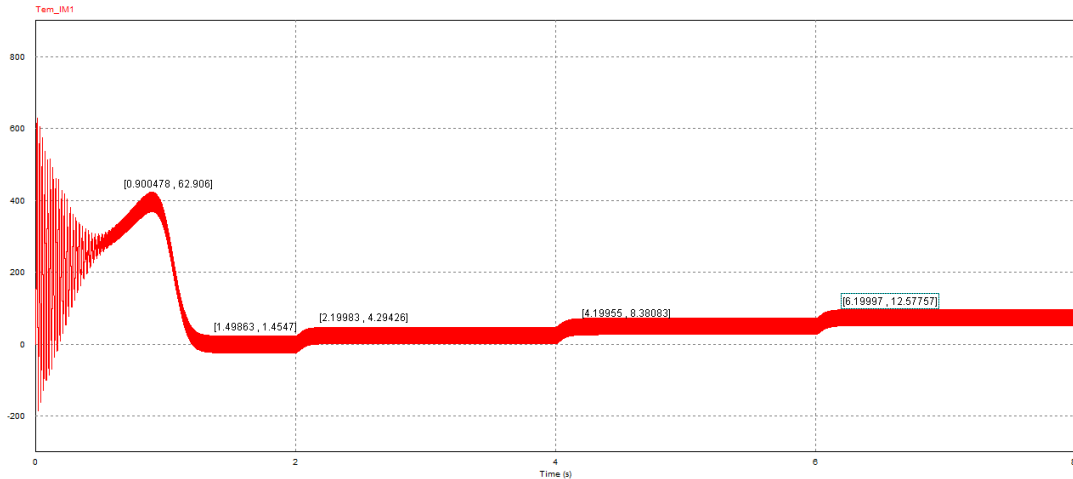
Simulasi dengan *software* PSIM berdasarkan Gambar 5 maka didapatkan hasil *output* berupa grafik karakteristik motor induksi tiga fasa yang beroperasi pada mesin CNC, hasil grafik karakteristiknya sebagai berikut:

a. Tegangan 487 Volt dan Frekuensi 50Hz



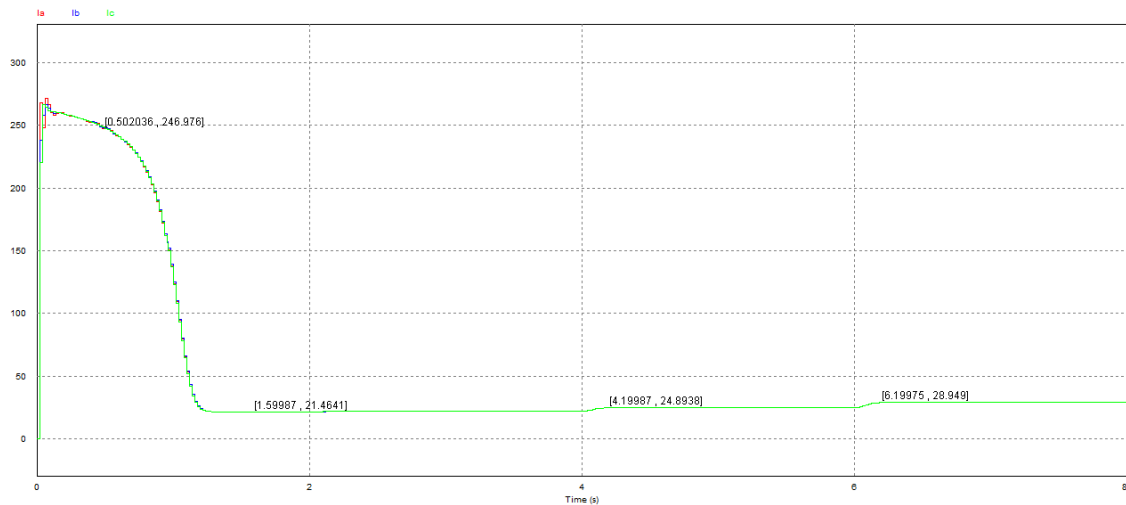
Gambar 6. Grafik Kecepatan pada Tegangan 487 V dan Frekuensi 50 Hz

Pada Gambar 6 saat motor dijalankan (*starting*) kecepatan putaran motor berubah dari nol mendekati nilai sinkronnya. Kecepatan putar bergerak dari 0 menuju 1499rpm kondisi mantap (*steady state*) pada waktu 0 sampai 2 detik dengan beban 0 %. Saat beban di naikan 30% dengan peralihan transien selama 0.2 detik kecepatan akan menurun sampai 1492 rpm. Pada waktu 4 detik beban di naikan 60% kecepatan menurun pada waktu 4.2 detik sebesar 1484 rpm. Kemudian pada waktu 6 detik beban di naikan 90% dengan peralihan transien selama 0.2 detik kecepatan akan menurun sampai 1476 rpm.



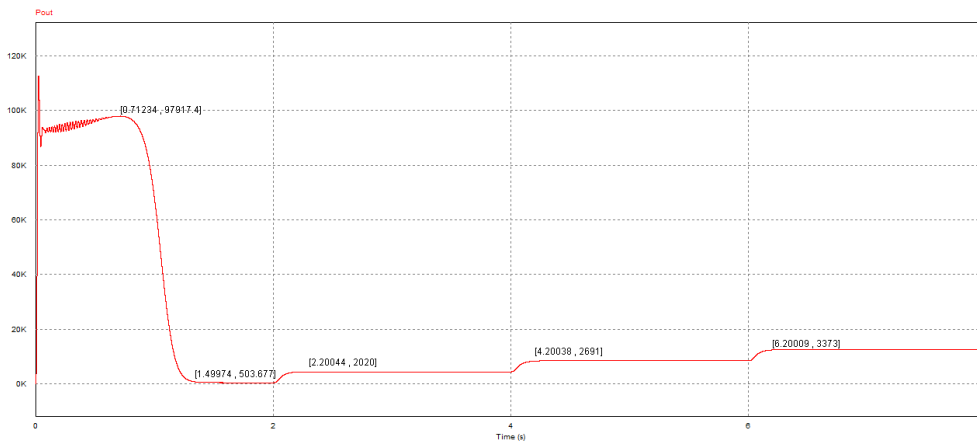
Gambar 7. Grafik Torka pada Tegangan 487 V dan Frekuensi 50 Hz

Dapat dilihat Gambar 7 saat motor dijalankan (*starting*) torka elektromagnetik mencapai 62 N.m pada waktu 0.0133 detik, pengasutan torka elektromagnetik untuk mencapai kondisi mantap (*steady state*) membutuhkan waktu 1.5 detik dengan beban 0% dengan torka sebesar 0.2 N.m. Ketika beban di naikan transien peralihan selama 0.2 detik, sehingga pada waktu 2.2 detik dengan beban 30% torka sebesar 4.2 N.m, pada waktu 4.4 detik dengan beban 60% torka sebesar 8.3 N.m dan pada waktu 6.2 detik dengan beban 90% torka sebesar 12.5 N.m.



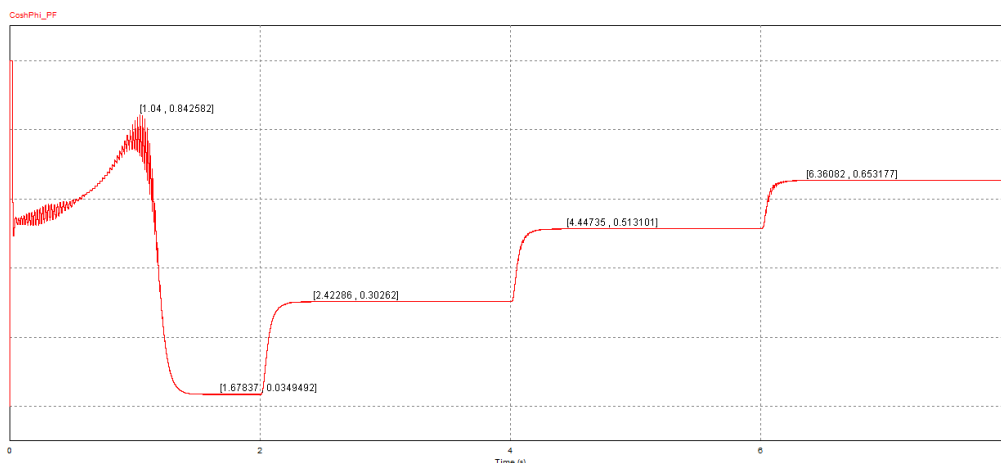
Gambar 8. Grafik Arus pada Tegangan 487 V dan Frekuensi 50 Hz

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa pada saat motor dijalankan (*starting*) nilai arus mencapai 250 A pada waktu 0.1 detik, pengasutan nilai arus hingga kondisi kondisi mantap (*steady state*) dengan beban 0% sebesar 21 A pada waktu 1.5 detik. Peralihan transien pada perubahan beban membutuhkan waktu selama 0.2 detik. Ketika beban 30% pada waktu 2.2 detik nilai arus sebesar 22 A, selanjutnya beban dinaikan 30% pada waktu 4.2 detik nilai arus sebesar 24 A dan beban 90% pada waktu 6.2 detik nilai arus sebesar 28 A.



Gambar 9. Grafik Daya pada Tegangan 487 V dan Frekuensi 50 Hz

Berdasarkan Gambar 9 nilai daya output inverter sama dengan daya input motor pada saat motor dijalankan (*starting*) nilai daya mencapai 11.264 Watt pada waktu 0.02 detik, pengasutan nilai daya hingga kondisi mantap (*steady state*) dengan beban 0% sebesar 2000 Watt pada waktu 1.5 detik. Perhatikan transien pada perubahan beban membutuhkan waktu selama 0.2 detik. Ketika beban 30% pada waktu 2.2 detik nilai daya sebesar 2020 Watt, selanjutnya beban dinaikan 30% pada waktu 4.2 detik nilai daya sebesar 2691 Watt dan beban 90% pada waktu 6.2 detik nilai daya sebesar 3373 Watt.



Gambar 10. Grafik Cosh Phi pada Tegangan 487 V dan Frekuensi 50 Hz

Pada Gambar 10 saat motor dijalankan (*starting*) nilai cosh phi mencapai 0.8 Pf pada waktu 0.01 detik, pengasutan nilai daya hingga kondisi mantap (*steady state*) dengan beban 0% sebesar 0.003 Pf pada waktu 1.5 detik. Perhatikan transien pada perubahan beban membutuhkan waktu selama 0.2 detik. Ketika beban 30% pada waktu 2.2 detik nilai daya sebesar 0.3 Pf, selanjutnya beban dinaikan 30% pada waktu 4.2 detik nilai daya sebesar 0.6 Pf dan beban 90% pada waktu 6.2 detik nilai daya sebesar 0.6 Pf.

Berdasarkan simulasi menggunakan *software* PSIM, maka data hasil simulasi beban 30% ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Simulasi Beban 30%

Vo DC Buck (Volt)	F (Hz)	VLL (Volt)	Arus (A)	Daya Input (Watt)	Kecepatan (RPM)	Cosh PHI	Torka (N.m)	Daya Output (Watt)	η (%)	Slip
450	50	380	21	2020	1492	0.3	4.2	656	0.3	0.1
405	45	342	24	1882	1342	0.3	4.2	590	0.3	0.11
360	40	306	28	1747	1192	0.3	4.2	524	0.3	0.21

Dari hasil simulasi menggunakan *software* PSIM, maka data hasil simulasi beban 60% ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Data Simulasi Beban 60%

Vo DC Buck (Volt)	F (Hz)	VLL (Volt)	Arus (A)	Daya Input (Watt)	Kecepatan (RPM)	Cosh PHI	Torka (N.m)	Daya Output (Watt)	η (%)	Slip
450	50	380	21	2691	1484	0.5	8.3	1289	0.5	0.01
405	45	342	24	2485	1334	0.5	8.3	1159	0.5	0.11
360	40	306	28	2004	1184	0.5	8.3	1029	0.5	0.21

Dari hasil simulasi menggunakan *software* PSIM, maka data hasil simulasi beban 90% ditunjukkan pada Tabel 10.

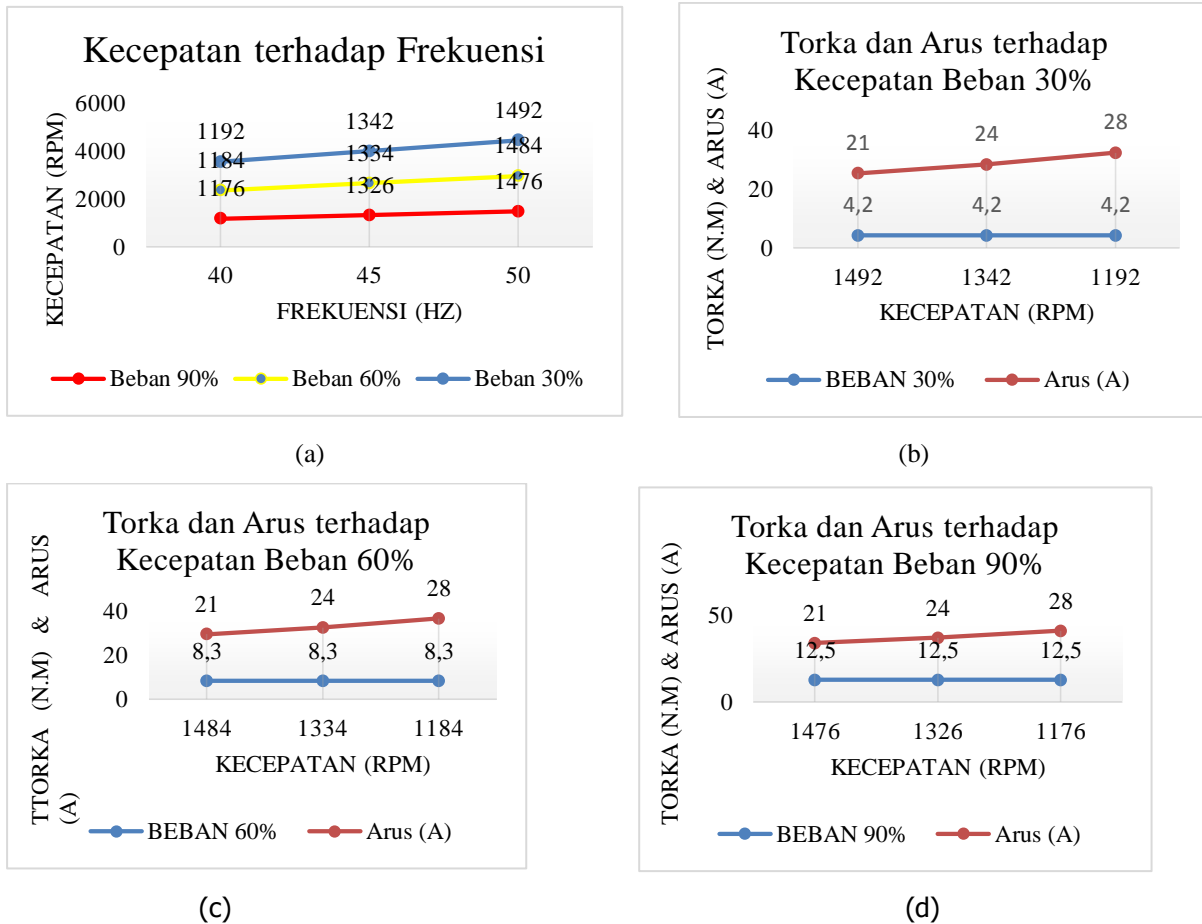
Tabel 10. Data Simulasi Beban 90%

Vo DC Buck (Volt)	F (Hz)	VLL (Volt)	Arus (A)	Daya Input (Watt)	Kecepatan (RPM)	Cosh PHI	Torka N.m	Daya Output (Watt)	η (%)	Slip
450	50	380	28	3373	1476	0.6	12.5	1931	0.6	0.02
405	45	342	28	3101	1326	0.6	12.5	1734	0.6	0.12
360	40	306	30	2519	1176	0.6	12.5	1538	0.6	0.22

3.4. Analisis

Berikut adalah analisis sesuai dengan hasil penelitian:

Pada simulasi PSIM saat motor *starting* dengan kondisi tanpa beban sampai motor beroperasi secara normal, kecepatan putaran rotor akan berubah dari nol sampai mendekati kecepatan sinkronnya. Pada frekuensi 50Hz kecepatan sinkron mencapai 1499rpm, pada frekuensi 45 Hz kecepatan sinkron sebesar 1350 rpm, sedangkan pada frekuensi minimum 40Hz kecepatan sinkron mencapai 1200rpm. Nilai frekuensi berbanding lurus dengan arus yang masuk pada kumparan sehingga fluks magnet terjadi gaya gerak listrik (GGL) maka rotor akan berputar. Perubahan pada kecepatan rotor menyebabkan terjadinya perubahan slip (S) dari satu menjadi lebih kecil dari satu. Nilai slip pada frekuensi 50Hz sebesar 0.01, pada frekuensi 45 Hz sebesar 0.1 dan pada frekuensi 40Hz sebesar 0.21. Perubahan nilai slip (S) akan menyebabkan perubahan nilai arus, torka dan kecepatan. Nilai slip (S) pada saat motor dijalankan sama dengan satu, sedangkan pada kondisi *steady state* harga slip (S) lebih kecil dari satu. Saat motor mulai dijalankan akan lebih kecil dari kondisi *steady state*, sehingga arus dan torka pada kondisi saat mulai dijalankan (*starting*) akan lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi *steady state*.



Gambar 11. (a)Kecepatan terhadap Frekuensi; (b). Torka dan Arus terhadap Kecepatan Beban 30%; (c).Torka dan Arus terhadap Kecepatan Beban 60%; (d). Torka dan Arus terhadap Kecepatan Beban 90%

Saat diberi beban 30%, 60% dan 90% maka akan terjadi penurunan kecepatan putar rotor. Berdasarkan Gambar 10.(a) dapat dilihat garis berwarna biru merupakan kecepatan dengan beban 30%, pada frekuensi 40Hz kecepatan mencapai 1192 rpm, frekuensi 45Hz kecepatan mencapai 1342 rpm dan frekuensi 50Hz kecepatan mencapai 1492. Untuk garis berwarna kuning merupakan kecepatan dengan beban 60% dimana pada frekuensi 40Hz kecepatan mencapai 1184 rpm, frekuensi 40Hz kecepatan mencapai 1334 rpm dan frekuensi 50Hz kecepatan mencapai 1484 rpm. Sedangkan garis berwarna merah merupakan kecepatan dengan beban 90% dimana pada frekuensi 40Hz kecepatan mencapai 1176 rpm, frekuensi 45Hz kecepatan mencapai 1326 rpm dan frekuensi 50Hz kecepatan mencapai 1476 rpm. Nilai slip menjadi lebih besar setelah beroperasi secara normal menyebabkan Penurunan kecepatan pada kondisi berbeban. Kenaikan slip ini akan berpengaruh terhadap daya, motor membutuhkan daya yang sangat besar untuk menggerakkan motor pada saat kondisi diam dengan beban dan slip yang besar sehingga nilai cosh phi pada motor akan bertambah besar. Namun pada arus dan torka akan mengalami kenaikan, berdasarkan Gambar 10(b) sampai dengan Gambar 10 (c) nilai arus dan torka akan naik seiring bertambahnya beban. Nilai arus pada frekuensi 40Hz sebesar 21 A, pada frekuensi 45Hz sebesar 24 A dan frekuensi 50Hz sebesar 28 A. Sedangkan untuk nilai torka dengan beban 30% sebesar 4.2 N.m, dengan beban 60% sebesar 8.3 N.m dan beban 90% sebesar 12.5 N.m. Nilai torka tersebut akan selalu konstan sepanjang daerah pengaturan kecepatan motor. Nilai torka konstan terjadi karena pengaturan tegangan dan frekuensi yang seimbang pada inverter.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian dapat disimpulkan *variable speed drive dengan kendali V/f* akan mempengaruhi kinerja motor induksi. Berdasarkan persamaan 12 kecepatan motor induksi berbanding lurus dengan frekuensi sumber daya dan jumlah kutub dari motor. Pembebanan akan berpengaruh terhadap kecepatan rotor. Semakin besar beban maka nilai torka akan besar dan kecepatan akan menurun hal itu disebabkan pengaruh nilai slip. Nilai slip pada frekuensi 50Hz sebesar 0.01, pada frekuensi 45 Hz sebesar 0.1 dan pada frekuensi 40Hz sebesar 0.21. Dengan kendali V/f konstan pada inverter, tegangan dan frekuensi dijaga konstan seiring laju kecepatan putar yang diatur. maka pada pembebanan sebesar 30% menghasilkan torka konstan sebesar 4.2 N.m, sedangkan pada beban 60% menghasilkan torka konstan sebesar 8.3 N.m, dan pada beban 90% menghasilkan torka konstan sebesar 12.5 N.m. Pemodelan simulasi pada PSIM dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara hasil simulasi, perhitungan dan pengukuran untuk memperoleh torka konstan dengan pengaturan kecepatan putar pada mesin CNC yang dikendalikan oleh *variable speed drive*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT.Dirgantara Indonesia telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan penelitian serta penulis mengucapkan terimakasih kepada keluarga yang selalu memberi dukungan secara moral dan materil kepada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- Asnil. (2013). Aplikasi Perangkat Lunak Simulasi sebagai Alat Bantu untuk Mempelajari Rangkaian Konverter Daya. *Jurnal Teknologi Informasi & Pendidikan*, 6(2), 2.
- Atmam, Tanjung, A., & Zulfahri. (2018). Analisis Penggunaan Energi Listrik Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Variable Speed Drive (VSD) . *SainETIn*, (pp. 52).
- Chapman, S. J. (1991). *Electric Machinery Fundamental (Second edition)*. United States: McGraw-Hill.
- Desphande, M. V. (1990). *Electric Motor Applications and Control*. India: Wheller.
- Fitzgerald, A. K. (1909). *Electric Machinery Fifth Edition in SI units*. London: McGraw-Hill.
- Hariyanto, N., Saodah, S., & Robby, A. (2016). Analisis Karakteristik Kerja Motor Listrik Hoist di PT. Nikkatsu Electric Works. *SENTIA*, 86.
- Haryanto, H. (2011). Pembuatan Modul Inverter sebagai Kendali Kecepatan Putaran Motor Induksi. *Rekayasa*, 4(1), 9-20.
- Hushaini, M., & Hasan, H. (2019). Stabilisasi Tegangan DC Menggunakan Boost Konverter. *Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro* (p. 128). Aceh: Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala.
- Indonesia, P. D. (2016). *Buku Pedoman Pemeliharaan Mesin CNC*. Bandung: PT. Dirgantara Indonesia (Persero).
- Juarsah, M. A., Facta, M., & Nugroho, A. (2015). Perancangan DC Chopper Buck-Boost Converter Penguatan Umpan Balik IC TL 494. *Transient*, 4(3), 597.

- Jufrizaldy, M., Ilyas, & Marzuki. (2020). Rancang Bangun Mesin CNC Milling menggunakan System Kontrol GRBL untuk Pembuatan Layout PCB. *Jurnal Mesin Sains Terapan* 4(1), 37.
- Nurlana, M. E., & Murnomo, A. (2019). Pembuatan Power Supply dengan Tegangan Keluaran Variabel Menggunakan Keypad Berbasis Arduino Uno. *Edu Elekrika*, 72.
- Permana, F. Y., & Rameli, M. (2013). Pengaturan Kecepatan Spindle pada Retrofit Mesin Bubut CNC Menggunakan Kontroler PI Gain Scheduling. *Jurnal Teknik Pomits*, 1-5.
- Powersim. (2020). *PSIM User's Manual, Version 9.1*. Powersim Inc.
- Wibowo, B. A., & Facta, M. (2013). Simulasi Kinerja Inverter - Rectifier Kelas D – E Berbasis PSIM. *Transient*, 2(4). 2.