

Kajian Rancangan Purwarupa Mesin CNC Milling CTU3x terhadap Kapasitas Mampu Proses Material dan Penggunaan Alat

Asep Indra Komara^{1,*}, Iman Apriana Effendi¹ dan Muhamad Aditya Royandi¹

¹Jurusan Teknik Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bandung - Bandung

*Korespondensi: asep.indra@polman-bandung.ac.id

Abstrak. Mesin CNC *milling* CTU3x merupakan mesin CNC purwarupa hasil dari retrofit mesin *drill-mill* konvensional yang dibangun oleh POLMAN Bandung. Sebelum menjadi mesin CNC *milling* CTU3x, mesin *drill-mill* telah melalui beberapa tahap proses *retrofit*, di antaranya penambahan sistem kontrol pada pergerakan *axis* dan spindel, serta penambahan konstruksi rangka untuk instalasi komponen elektrik. Tujuan pengembangan Mesin CNC *milling* CTU3x adalah untuk menyediakan sebuah mesin *CNC milling training unit* yang murah namun memiliki spesifikasi yang memadai. Peningkatan kemampuan yang harus diperbaiki adalah pada aspek kemampuan *machining* material dan penggunaan alat potong agar sesuai dengan kemampuan yang dimiliki mesin CNC *milling training unit* pada umumnya. Semula mesin ini hanya mampu memotong material kayu dan aluminium, selanjutnya perlu ditingkatkan agar mampu memotong material sekelas *mild steel*. Sehingga dengan demikian perlu dilakukan *design review* dan jika diperlukan dapat dilakukan modifikasi desain pada mesin CNC *milling* CTU3x tersebut. Proses *design review* dilakukan pada komponen-komponen penting yang erat kaitannya dengan kapasitas mampu proses material dan penggunaan alat potong. Proses ini diawali dengan melakukan pengukuran dan pemeriksaan seluruh komponen mesin, pembuatan model CAD, kontrol dan validasi perhitungan sistem transmisi, serta rekayasa ulang model CAD mesin CTU3x. Berdasarkan proses *design review* yang dilakukan, maka dapat dinyatakan bahwa mesin CNC *milling* CTU3x tidak perlu melalui proses modifikasi pada konstruksi sistem spindel, tetapi perlu mengganti komponen motor penggerak, elemen transmisi, serta penggunaan komponen *linear guideway* agar mampu memotong material *mild steel* dengan kedalaman pemakanan hingga 4,7 mm untuk alat potong HSS dan 1,2 mm untuk alat potong *carbide*. Setelah dilakukan penyesuaian desain tersebut dapat disimpulkan bahwa mesin CNC *milling* CTU3x bisa digunakan sebagai mesin CNC *training unit*.

Kata kunci: review design, CNC Milling CTU3x, training unit, kapasitas pemotongan

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

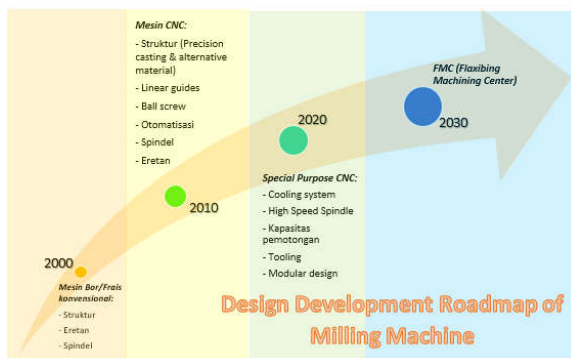
Mesin CNC telah menjadi pilihan karena mempunyai kemampuan lebih dibandingkan dengan mesin konvensional pada umumnya, seperti kemampuan proses yang cepat, memiliki keandalan (*reliable*) dan lebih efisien. Selain pilihan dalam penggunaannya, teknologi ini telah menjadi pilihan untuk dilakukan kajian lebih lanjut mengenai pengembangan-pengembangan yang bisa dilakukan terhadap performa-performa dan spesifikasinya. Sehingga dalam proses pengembangan dan penelusuran terhadap teknologi ini, terdapat beberapa pelaku industri bahkan asosiasi mesin di berbagai negara yang merencanakannya melalui penyusunan sebuah *roadmaps* (gambar 1). *Roadmaps* dibuat dengan tujuan untuk mengidentifikasi masalah-masalah dan kebutuhan-kebutuhan yang dimiliki pengguna teknologi pada masanya yang selanjutnya dapat diselesaikan dengan penambahan fitur, peningkatan performa, atau bahkan penambahan teknologi lain pada desain produknya. Salah satu aspek yang disoroti dalam pengembangannya adalah aspek fleksibilitas. Fleksibilitas merupakan

kemampuan mesin perkakas untuk memproses benda kerja pada jangkauan yang luas, seperti kemampuan mesin dalam memotong berbagai jenis material, dan kemampuan mesin dalam menggunakan jenis alat potongnya [1].

Sebagai institusi pendidikan, POLMAN Bandung mempunyai rencana serupa dalam pengembangan yang telah dilakukan oleh beberapa pelaku industri. Namun mengacu pada pernyataan sebelumnya, bahwa pengembangan yang dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi masalah-masalah dan kebutuhan-kebutuhan yang dimiliki pengguna teknologi pada masanya, maka pengguna teknologi pada masanya tersebut direfleksikan menjadi institusi-institusi pendidikan atau pelatihan yang membutuhkan mesin untuk menjadi sarana pendidikan atau pelatihan (*teaching aids*) atau biasa dikenal dengan mesin *training unit*. Mesin *training unit* digunakan untuk sarana simulasi dalam pengoperasian mesin ataupun pengenalan konstruksi mesin.

Pada saat ini, POLMAN Bandung telah melakukan pengembangan terhadap mesin CNC CTU 3x

yang sebelumnya merupakan mesin *drill-mill* konvensional. Mesin tersebut telah melalui tahap retrofit, yang dilakukan untuk menambah ingindalian pergerakan setiap axis dan spindle. Selanjutnya POLMAN Bandung mempunyai rencana untuk menjadikan mesin yang masih dalam tahap pengembangan ini sebagai purwarupa dalam pembuatan mesin-mesin CNC *training unit* lainnya. Namun, perlu dilakukan kajian terlebih dahulu terhadap hasil rancangan purwarupa tersebut mengenai kesesuaian performa dan spesifikasinya dengan mesin CNC *training unit* yang telah digunakan oleh para pengguna. Terutama aspek fleksibilitas pada kemampuan proses material dan penggunaan alat potong tertentu. Sehingga akan dihasilkan jangkauan kemampuan mesin yang berhubungan dengan parameter-parameter tersebut.



Gambar 1. Peta jalan pengembangan mesin milling

Metodologi

Design Review merupakan salah satu tahapan review yang dilakukan pada proses pengembangan produk [2]. Pada proses tersebut rancangan melewati proses evaluasi terhadap kebutuhan produk untuk menghasilkan data verifikasi serta mengidentifikasi persoalan-persoalan yang merupakan dampak dari proses pengembangannya.

Proses *design review* dapat dilaksanakan melalui prosedur yang setiap tahapannya merupakan jenis-jenis dari kegiatan *review*, yaitu sebagai berikut:

1. Requirement Review

Review ini dilakukan untuk memastikan bahwa semua *requirements* dan *constraints* yang diharapkan, sudah jelas dan teridentifikasi secara menyeluruh. *Requirements review* sering kali dilakukan bersamaan dengan *Preliminary Design Review*. Selain itu, pada referensi lain, tujuan *review* ini adalah untuk memastikan bahwa *requirement* merupakan refleksi dari pengetahuan pelanggan dan kebutuhan pasar masa kini [3].

2. System Design Review (SDR)

SDR dilakukan dengan mengidentifikasi konsep kerja dari sebuah sistem atau keseluruhan sistem

dari produk yang akan menjadi objek *design review*. Ketika proses *review* dilakukan pada pengembangan sistem yang besar, *system design review* dapat dilakukan dengan melakukannya pada beberapa bagian-bagian kecil sistem utamanya

3. Preliminary Design Review (PDR)

Pada tahapan review ini, konsep desain dievaluasi dari segi *feasibility*, *technical adequacy* dan *general compliance* terhadap *requirement*, dan perbandingan terhadap beberapa alternatif konsep. Asumsi dan perhitungan yang mengarah pada kesimpulan, sangat diharapkan pada tahapan ini. Dan jika memungkinkan pun, berbagai macam konsep tersebut dapat ditampilkan melalui *prototype* awal, *mock-ups* atau sketsa yang dapat mengkomunikasikan berbagai macam konsep tersebut.

4. Critical Design Review (CDR)

CDR merupakan *design review* kelas menengah yang muncul setelah selesai proses *detail design* dan selanjutnya desain tersebut dapat dijadikan *prototype* atau *pre-production models*. *Review* ini dilakukan untuk mengevaluasi rancangan dari *requirements* secara merinci. CDR sendiri terbagi lagi menjadi beberapa bagian seperti *provision of assumptions* dan perhitungan rancangan, *progress project*, *risk management*, dan *assessment product*.

5. Test Design Review (TRR)

TRR dilakukan untuk menguji prototipe atau *pre-production* untuk memverifikasi rancangan terhadap pemenuhan *requirements*.

6. Final Design Review (FDR)

FDR dilakukan setelah prototipe atau *pre-production* telah melalui tahapan pengujian. Pada review ini dilakukan pembahasan terhadap permasalahan-permasalahan yang terjadi selama pengujian dan solusi dari permasalahan tersebut. Sehingga, semua perubahan yang diperlukan untuk produk pada performa, *cost*, *reliability* dan *manufacturing* dapat dilakukan sebelum kegiatan *mass pro* dilakukan.

7. Production Readiness Review (PRR)

Kegiatan review ini tidak terkait satu sama lain dengan kegiatan *review* lainnya. PRR memfokuskan pada *review* terhadap *high level manufacturing* dan tingkat kematangan produk yang tinggi. Sehingga mampu dilakukan kegiatan *mass pro*.

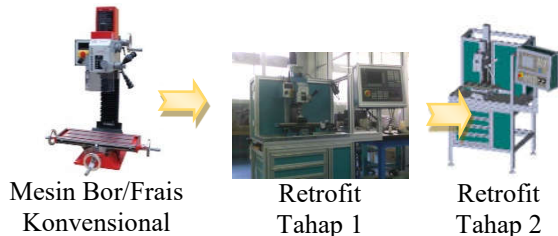
Konten yang dikaji pada *design review* di antaranya adalah:

- Current Product Development Specification*
- Engineering data* seperti perhitungan, simulasi, hasil eksperimen, dan hasil analisis lainnya
- Analisis perbandingan terhadap produk existing

- d) *Drawing*, skema, layout, *mock-up* dan *prototype*
- e) Deskripsi dari *requirements* yang tidak biasa dan elemen desain yang mempunyai risiko tinggi

Pengembangan Mesin Milling CNC

Pada gambar 2 diperlihatkan alur pengembangan mesin dari mesin *drill-mill* konvensional, hingga ke rancangan mesin saat ini.



Gambar 2. Alur Pengembangan Mesin CTU3x

Adapun penjelasan dari setiap tahapannya yang telah melalui dua kali tahapan retrofit adalah sebagai berikut.

A. Tahapan Retrofit 1

Pada retrofit tahap 1 ini dilakukan penambahan terhadap sistem pengendalian pergerakan pada setiap axis, pengendali untuk kecepatan spindle dan penambahan rangka aluminium untuk menunjang instalasi komponen-komponen elektriknya.



Gambar 3. Mesin CNC CTU3x Retrofit 1

Berikut ini merupakan perbedaan spesifikasi yang didapatkan dari mesin pada setiap tahapan pengembangan.

Tabel 1. Perbandingan spesifikasi teknis Mesin Konvensional dan Retro 1

	BF 20 V (Konv.)	CTU 3x (Retro 1)
Max. Drilling Cap.	16 mm	16 mm
Spindle nose taper	MK2 / MT2	MK2 / MT2
Spindle speed	50 – 2250 U/min	0 – 2250 U/min
Jenis motor	DC	DC
Motor Power (100%) / S6	0,5 kW / 0,75 kW	0,5 kW
Dimension	370 x 930 x 390 mm	
X-axis travel	250 mm	250 mm
Y-axis travel	120 mm	120 mm

Z-axis travel	80 mm	80 mm
Guide	Prismatic Guide	Prismatic Guide
Automation	No	Yes

Tabel 2. Aksesori Mesin yang Tersedia

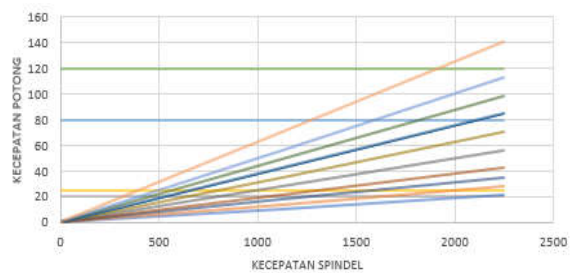
<i>Keyless chuck</i> SSBF16	1 – 16 mm
<i>End Mill</i> FFS20	2 and 4 cutter
<i>Chuck set</i> SZSMK2	3 – 20 mm

B. Tahapan Retrofit 2

Retrofit tahap 2 yang masih dalam proses design review dan proses pengerjaan ini dilakukan untuk menambah dan mengganti beberapa komponen yang masih kurang ideal.

Current Product Performance

Grafik berikut ini merupakan grafik yang menyajikan data kemampuan pemotongan material dan penggunaan alat potong, berdasarkan spesifikasi terakhir dari mesin yang telah melalui tahap retrofit 1.



Gambar 4. Hubungan kecepatan potong dan spindle

Dari grafik di atas, diperoleh data penggunaan alat potong yang dapat digunakan (berdasarkan diameter alat potong yang tersedia) pada mesin dengan kecepatan maksimum 2250 putaran/min untuk material *steel*, yaitu sebagai berikut.

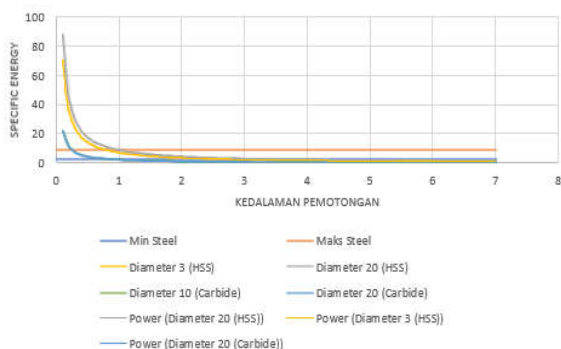
Tabel 3. Penggunaan Alat Potong dengan Performa yang Dimiliki

Diameter Cutter (mm)	HSS	Carbide
3	✓	✗
4	✓	✗
5	✓	✗
6	✓	✗
8	✓	✗
10	✓	✗
12	✓	✗
14	✓	✓
16	✓	✓
20	✓	✓

Keterangan:

- ✓ = disarankan
- ✗ = tidak disarankan

Gambar 5 menunjukkan grafik kemampuan mesin dalam melakukan pemakanan (*feeding*), ditinjau dari penggunaan *cutter* yang telah disesuaikan dengan data sebelumnya.



Gambar 5. Grafik Kemampuan Mesin Ditinjau dari Kedalaman Pemotongan dan *Specific Energy* Material

Berdasarkan hasil dari grafik pada gambar 4, dibuat grafik hubungan antara spesifik energy dengan kedalaman pemotongan. Dari grafik tersebut diperoleh data parameter kedalaman pemotongan maksimum yang disarankan. Untuk Material HSS kedalaman min. 0,75 dan maks. 3,27 serta untuk material carbide min. 0,24 mm dan maks. 0,82 mm.

Requirement Review

Daftar kebutuhan dibuat dengan mengacu pada spesifikasi mesin CNC *milling training* unit yang sudah ada di pasaran dan sudah digunakan di berbagai institusi pendidikan, dengan alasan agar spesifikasi yang dihasilkan tidak berlebihan.

Berikut ini merupakan spesifikasi mesin yang dijadikan acuan dalam kaji rancangannya.

Tabel 4. Spesifikasi Mesin Acuan

Specification	Value
Spindle nose taper (tool holder)	MK2 / MT2 SK30
Max. Spindle speed	4000 U/min
Motor Power (100%) / S6	0,55 kW / 0,75 kW
Dimension (mm)	980 x 960 x 1000
X-axis travel	190 mm
Y-axis travel	140 mm
Z-axis travel	260 mm
Rapid motion speeds in X/Y/Z	2 m/min
Work feed X/Y/Z	0-2 m/min
Max. Table load	10 kg
Jenis Guide	Prismatic Guide

Functional Requirements (what has to be done)

Functional requirements adalah tugas, aksi atau aktivitas yang diperlukan dan harus dipenuhi oleh suatu sistem. *Requirements* ini teridentifikasi melalui analisis kebutuhan yang akan digunakan sebagai

top-level function dari sistem atau mesin [4]. Adapun *functional requirement* dari mesin adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Functional requirements

Functional Requirements	Spesifikasi
Penggunaan mesin	Teaching/training unit
Range material benda kerja	Mild steel, aluminium
Jenis alat potong	HSS, Carbide

Performance Requirements

Performance requirements adalah *requirements* yang akan menunjang ketercapaian dari *functional requirements*. Secara umum *requirements* ini dapat terukur melalui nilai/kuantitas, kualitas, atau cakupan [4]. Selama proses analisis, *performance requirements* akan menjadi nilai awal dalam proses pengembangan yang akan berpengaruh terhadap seluruh fungsi atau sub fungsi.

Tabel 6. Performance requirements

	Mesin Acuan	CTU3x
<i>Max. Spindle speed</i>	4000 U/min	2250 U/min
Spesifikasi kecepatan maksimum spindle dari mesin acuan dijadikan referensi pengembangan terhadap mesin CTU3x		
<i>Motor Power (100%) / S6</i>	0,55 kW / 0,75 kW	0,3 kW AC motor
Spesifikasi motor spindle pada mesin acuan tidak dijadikan referensi dalam pengembangan mesin CTU 3x, karena penggantian motor dilakukan dengan memanfaatkan motor yang telah tersedia.		
<i>X/Y/Z-axis travel (mm)</i>	190/140/260	250/120/80
Spesifikasi travel pada mesin acuan memang lebih unggul dari mesin yang saat ini sedang dikembangkan. Namun, proses pengembangan tidak akan dilakukan terhadap spesifikasi ini, tetapi bisa menjadi saran kajian lanjutan.		
<i>Rapid motion speeds in X/Y/Z</i>	2 m/min	15 m/min
<i>Work feed X/Y/Z</i>	0-2 m/min	-
<i>Max. Table load</i>	10 kg	-
<i>Guide</i>	<i>Prismatic Guide</i>	<i>Linear guide</i>

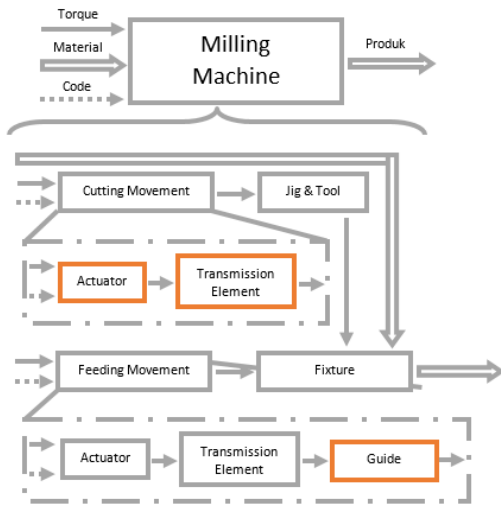
System Design Review

Gambar di bawah ini merupakan blok sistem dari mesin, serta beberapa keterangan yang menyampaikan fungsi bagian yang mengalami modifikasi atau pergantian setelah melalui tahapan *requirements review*.

Dari gambar 6 bagian-bagian yang mengalami perubahan setelah proses *requirement review* adalah sebagai berikut:

- a) Aktuator pada *cutting movement* yang diganti dengan motor yang telah tersedia, dengan spesifikasi yang telah disampaikan.

b) *Transmission Element* pada *cutting movement*, harus mengalami perubahan setelah spesifikasi kecepatan maksimum spindle bertambah. *Transportir element* mengalami perubahan menjadi menggunakan *linear guideway*.



Gambar 6. Black Box Mesin Milling

Preliminary Design Review

Cutting Movement Actuator

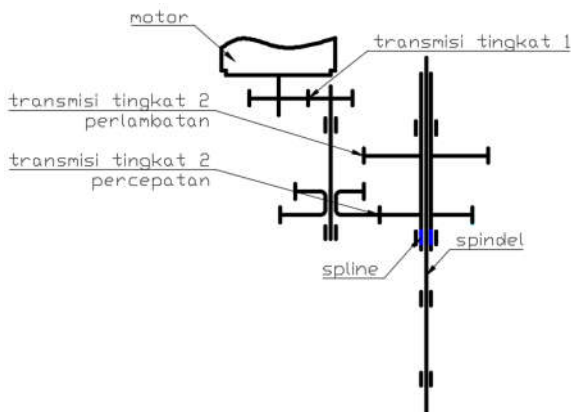
Gambar 7 menunjukkan motor yang telah tersedia, dan akan digunakan sebagai penggerak pada *cutting movement*.



Gambar 7. Motor yang Telah Tersedia

Transmission element pada spindle

Gambar berikut ini merupakan sketsa konstruksi dari sistem spindle pada mesin.



Gambar 8. Sketsa Sistem Transmisi Spindel

Dengan berdasar pada kemudahan pembuatan dan pemasangan, maka hanya cukup pada pasangan roda gigi tingkat satu saja yang akan mengalami perubahan.

Adapun nilai modul rencana minimal dari pasangan roda gigi tersebut didapatkan dari persamaan berikut ini [5].

$$m_n''' \approx 1,85 \cdot \sqrt[3]{\frac{K_A \cdot T_1 \cdot \cos^2 \beta}{z_1^2 \cdot \psi_d \cdot \sigma_{Flim}}} \tag{1}$$

dimana:

- m_n''' = besar modul rencana (*mm*)
- K_A = faktor kerja
- T_1 = torsi (*N.mm*)
- β = sudut kemiringan roda gigi ($^\circ$)
- z_1 = banyaknya gigi roda gigi penggerak
- ψ_d = faktor hubungan diameter-tebal roda gigi
- σ_{Flim} = kekuatan kaki gigi (*N/mm²*)

Besar modul rencana minimal yang diperoleh adalah sebesar 0,3 mm. Selanjutnya, untuk mendapatkan putaran spindle yang diharapkan sebesar 4000 min⁻¹, dilakukan proses perhitungan optimasi dengan berdasarkan urutan tahapan optimasi sebagai berikut.

1. Definisi masalah

Kondisi yang diharapkan adalah putaran akhir yang dihasilkan dari spindle adalah sebesar 4000 min⁻¹ (atau bahkan lebih), dengan besar modul yang diupayakan mempunyai nilai besar namun masih mengacu pada standar modul gigi DIN 780. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghasilkan kemampuan terhadap beban yang lebih baik.

2. Pengumpulan informasi dan data

Berikut ini merupakan standar nilai modul berdasarkan DIN 780 untuk roda gigi lurus [6].

- 0.1; 0.12; 0.16; 0.2; 0.25; 0.3; 0.4;
- 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.25; 1.5;
- 2; 2.5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20;
- 25; 32; 40; 50; 60

Beberapa persamaan berikut ini merupakan persamaan yang dijadikan dasar dalam melakukan proses optimasi.

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} \tag{2}$$

dimana:

- i = Rasio
- n_1 = Kecepatan putar penggerak ($\frac{1}{min}$)
- n_2 = Kecepatan putar pengikut ($\frac{1}{min}$)

- d_1 = diameter kerja roda gigi penggerak (mm)
- d_2 = diameter kerja roda gigi pengikut (mm)
- z_1 = Jumlah gigi roda gigi penggerak
- z_2 = Jumlah gigi roda gigi pengikut

$$a_d = \frac{d_1+d_2}{2} = \frac{m}{2} \cdot (z_1 + z_2) \quad (3)$$

Di mana:

$$a_d = \text{Kecepatan putar penggerak (mm)}$$

3. Variabel perancangan

Berikut ini merupakan variabel perancangan dalam optimasi.

z_1 = jumlah gigi roda gigi penggerak

z_2 = jumlah gigi roda gigi pengikut

m = modul (mm)

4. Kriteria optimasi

Kriteria optimasi adalah nilai modul semaksimal mungkin untuk mendapatkan kemampuan yang lebih baik.

5. Formulasi batasan

Berikut ini merupakan persamaan-persamaan yang menjadi batasan dalam optimasi.

a. Nilai modul harus lebih besar dari nilai modul minimum rencana, dan dibatasi maksimum pada 1,5 mm

$$0,3 \leq m \leq 1,5 \quad (4)$$

b. Jarak antar poros diberikan daerah batas yaitu $\pm 0,5$ mm dari jarak seharusnya yaitu 35 mm, agar hasil optimasi tidak mendapatkan jumlah gigi yang terlalu minimum, dan kecepatan yang diharapkan tidak terlalu melebihi tuntutan. Namun roda gigi nantinya harus mengalami koreksi gigi.

$$34,5 \leq \frac{m}{2} \cdot (z_1 + z_2) \leq 35,5 \quad (5)$$

c. Jumlah gigi harus lebih banyak dari jumlah gigi minimum teoritis (z_g) yaitu sebanyak 17.

$$\begin{aligned} z_1 &> 17 \\ z_2 &> 17 \end{aligned} \quad (6)$$

d. Putaran yang dihasilkan harus mencapai 4000 min⁻¹, di mana telah diketahui rasio tingkat 2 adalah $i_2 = \frac{60}{62}$, maka batasan untuk mencapainya adalah sebagai berikut.

$$n_2 \geq \frac{3000}{\frac{60}{62} z_1} \quad (7)$$

Gambar 9 menunjukkan hasil pengolahan data pada software optimasi dan menunjukkan hasil jumlah gigi yang diharapkan untuk memenuhi tuntutan.

Variabel	z_1	z_2	m			
	26	20	1,50			
Kriteria Optimasi	1,50 maks					
Batas	0	0	1	1,50	\geq	0,3 mm
	0	0	1	1,50	\leq	1,5 mm
	1	1	1	34,5	\geq	34,5 mm
	1	1	1	34,5	\leq	35,5 mm
	1	0	0	26	\geq	17
	0	1	0	20	\geq	17
	1	1	0	4030	\geq	4000 min ⁻¹

Gambar 9. Hasil Optimasi Sistem Spindel

Guide Element

Berdasarkan pertimbangan terhadap geometri komponen eretan letak *linear guide* akan dipasang, dipilih tipe MGN dari katalog *linear guideway* Hiwin, dengan spesifikasi kemampuannya untuk menahan beban adalah sebagai berikut.

Tabel 7. Data Spesifikasi *Linear Guide* MGN12C

Basic dynamic load rating (C)	2.84 kN
Basic static load rating (C ₀)	3.92 kN
Rolling Moment (M _R)	25.48 Nm
Pitching Moment (M _P)	13.72 Nm
Yawing Moment (M _Y)	13.72 Nm

Tabel 8 akan digunakan sebagai data yang akan dibandingkan dengan pembebanan yang terjadi pada bagian *critical review*.

Critical Design Review

Pada sistem transmisi roda gigi, yang menjadi perhatian dalam penelusuran kekuatannya dan kontrolnya adalah kekuatan kaki gigi dengan persamaan sebagai berikut,

$$S_F = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X}{b \cdot m_n \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_e \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}} \quad (8)$$

dimana:

- S_F = root safety / safety factor tegangan kaki gigi
- σ_{Flim} = kekuatan bahan ($\frac{N}{mm^2}$)
- Y_{ST} = faktor koreksi tegangan
- Y_{NT} = faktor umur
- $Y_{\delta relT}$ = faktor konsentrasi tegangan

- Y_{RrelT} = faktor kekasaran permukaan relatif
- Y_X = faktor besar modul
- F_t = gaya tangensial (N)
- b = tebal roda gigi (mm)
- m_n = modul (mm)
- Y_{Fa} = faktor bentuk
- Y_{Sa} = faktor koreksi tegangan
- Y_ϵ = faktor rasio kontak
- Y_β = faktor sudut kemiringan
- K_A = faktor kerja
- K_V = faktor dinamis
- $K_{F\alpha}$ = faktor muka
- $K_{F\beta}$ = faktor lebar gigi

dan kekuatan permukaan kontak gigi, dengan persamaan sebagai berikut.

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X}{Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d} \cdot \frac{u+1}{u}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}}} \quad (9)$$

dimana:

- S_H = flank safety / safety factor permukaan kontak
- σ_{Hlim} = kekuatan bahan ($\frac{N}{mm^2}$)
- Z_{NT} = faktor umur
- Z_L = Faktor pelumasan
- Z_V = faktor kecepatan
- Z_R = faktor kekasaran permukaan
- Z_W = faktor kekerasan gigi
- Z_X = faktor besar modul
- Z_H = faktor zona
- Z_E = faktor elastisitas
- Z_ϵ = faktor rasio kontak
- Z_β = Faktor kemiringan gigi
- F_t = gaya tangensial (N)
- b = tebal roda gigi (mm)
- d = diameter kerja (mm)
- u = rasio kerja
- K_A = faktor kerja
- K_V = faktor dinamis
- $K_{H\alpha}$ = faktor muka
- $K_{H\beta}$ = faktor lebar gigi

Adapun hasil kalkulasi setiap pasangan roda gigi dari persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 8. Hasil perhitungan kekuatan gigi

Parameter	Penggerak	Pengikuti
Transmisi tingkat 1		
S_F	10,9	10,51
S_H	1,15	1,1
Transmisi tingkat 2 (percepatan)		
S_F	6,54	6,54

S_H	1,5	1,5
Transmisi tingkat 2 (perlambatan)		
S_F	6,3	6,26
S_H	1,14	1,18

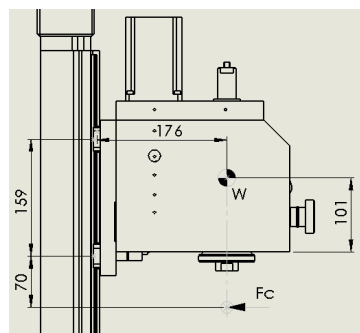
Dengan bantuan *software engineering* untuk perhitungan elemen transmisi, didapat hasil analisis setiap poros adalah sebagaimana ditunjukkan pada tabel 9.

Tabel 9. Hasil perhitungan poros

Perhitungan	Hasil
Poros 1	
σ_v (N/mm ²) Von Misses	3,27
f_{maks} (µm)	8,04
Sf (fatigue)	Not calculated
Critical Speed	Not calculated
Poros 2	
σ_v (N/mm ²) Von Misses	1,61
f_{maks} (µm)	7,68
Sf (fatigue)	Not calculated
Critical Speed	Not calculated
Poros Spindel	
σ_v (N/mm ²) Von Misses	38,77
f_{maks} (µm)	10,74
Sf (fatigue)	Not calculated
Critical Speed	Not calculated

Safety Factor dan *critical speed* tidak ditelusuri lebih lanjut, karena hasil perhitungan terhadap tegangan yang terjadi masih jauh dari batas izin materialnya.

Analisis *linear guide* hanya dilakukan pada *axis Z* saja, karena resultan beban yang terbesar terjadi pada *axis* tersebut. Kondisi pemasangan *linear guide* pada *axis Z* diperlihatkan pada gambar 10.



Gambar 10. Posisi Pembebanan *Linear Guide Axis Z*

Hasil analisis terhadap *linear guide* pada *axis Z* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 10. Hasil Perhitungan Beban Statis *Linear Guide*

Parameter	Beban	Sf
Basic static load rating (C ₀)	3,92 kN	21,23
Rolling Moment (M _R)	0,72 Nm	35,62
Pitching Moment (M _P)	11,37 Nm	1,01
Yawing Moment (M _Y)	2,63 Nm	2,85

Dari tabel 10 dapat disimpulkan bahwa terdapat hasil *safety factor* yang masih di bawah nilai 3 (untuk mesin perkakas). Sehingga tipe dari linear guide diganti menjadi MGN12H yang mempunyai spesifikasi yang serupa dengan tipe sebelumnya. Sehingga diperoleh nilai *safety factor* yang melebihi batas izinnnya.

Hasil dan Pembahasan

Gambar 11 menunjukkan model 3D hasil dari proses *review design*.



Gambar 11. Model 3D CNC Milling CTU3x

Setelah proses *design review* dilakukan, berikut ini merupakan beberapa simpulan yang menjadi data acuan dalam proses pengembangan selanjutnya pada proses retrofit 2.

- 1) Motor pengganti yang digunakan adalah AC servo motor dengan nomor katalog TSB073 01C. Dengan perubahan ini, perlu dibuat *flange* dudukan sebagai tempat instalasi motor, karena ukuran dari motor yang berbeda dengan motor sebelumnya (gambar 12).



Gambar 12. Penambahan *Flange* Sebagai Dudukan Motor Baru

- 2) Untuk mencapai kecepatan kerja yang diharapkan, dilakukan penggantian terhadap roda gigi tingkat 1 (gambar 13). Hasil analisis pun menunjukkan bahwa pasangan roda gigi tersebut berada pada batas *safety* yang diizinkan. Begitu pula dengan elemen transmisi lain seperti poros yang masih jauh dari batas kritisnya.
- 3) *Linear guide* tipe MGN12H dapat menggantikan sistem *guide prismatic* (gambar 14). Namun, penggantian komponen ini mengharuskan modifikasi terhadap beberapa komponen mesin, terutama untuk menghilangkan bentuk *prismatic guide* dari rangka pada *axis* nya.



Gambar 13. Desain Sistem Spindel



Gambar 14. Modifikasi Salah Satu Axis

Spesifikasi mesin yang mengalami perubahan adalah sebagai berikut.

Tabel 11. Spesifikasi Hasil *Design Review*

Specification	Value
Spindle nose taper (tool holder)	MK2 / MT2
Max. Spindle speed	4030 U/min
Motor Power (100%)	0,3 kW
X-axis travel	190 mm
Y-axis travel	140 mm
Z-axis travel	220 mm
Work feed X/Y/Z	0-2 m/min
Max. Table load	10 kg
Jenis Guide	Linear Guide

Dengan spesifikasi tersebut di atas, performa mesin yang dapat dicapai adalah sebagai berikut.

Tabel 12. Performa hasil *design review*

Diameter Cutter (mm)	HSS	Carbide
3	✓	✗
4	✓	✗
5	✓	✗
6	✓	✗
8	✓	✓
10	✓	✓
12	✓	✓
14	✓	✓
16	✓	✓
20	✓	✓

Keterangan:

- ✓ = disarankan
- ✗ = tidak disarankan

Dengan kedalaman pemakanan hingga 2,6 mm untuk alat potong HSS dan 1 mm untuk alat potong *carbide*.

Referensi

- [1] The Association For Manufacturing Technology, 2002. A Technology Roadmap for The

Machine Tool Industry, Technology Issues
Committee of AMT: USA.

- [2] Information on design.engineering.dal.ca/sites/default/files/studentresources/files/design_reviews.pdf (diakses pada Juli 2017).
- [3] Information on <http://www.hyperhot.com/pmdesreviews.htm> (diakses pada Juli 2017).
- [4] System Engineering Fundamentals, 2001. Department of Defense, System Management College: Fort Belvoir, Virginia.
- [5] Wittel, H. dkk., 2013. Roloff/Matek Maschinenelemente, Springer Vieweg, Germany.
- [6] Wittel, H. dkk., 2013. Roloff/Matek Maschinenelemente: Tabellenbuch, Springer Vieweg, Germany.