

ANALISIS DINAMIK PERANGKAT MEKANIK AKSIS Z PADA VERTICAL MACHINING CENTER MC 07-PF

Rachmanto Hadiputranto*

Abstraksi

Analisis dinamik dalam tulisan ini merupakan sebuah penelitian yang diperlukan untuk memverifikasi tingkat keamanan struktur *vertical machining center* setelah mengalami modifikasi. Salah satu kriteria keamanannya adalah tingkat gaya gravitasi (*G Force*) yang muncul saat mesin mengalami percepatan. Secara umum kemampuan struktur mesin perkakas CNC dibatasi hanya sampai 2 kali gaya gravitasi atau 2G. *G Force* yang berlebihan akan menyebabkan vibrasi berlebihan, mempengaruhi kualitas produk dan ketahanan struktur mesin. Perangkat mekanik aksis Z menghasilkan gerakan translasi linier resiprokal. Gerakan translasi linier resiprokal yang tercepat akan muncul saat mesin melakukan gerak cepat pemosisian (*rapid traverse*). Pada siklus gerakan ini akan muncul *G Force*, dimana *G Force* yang dihasilkan harus dalam batas yang aman. Apabila *G Force* yang dihasilkan melebihi batas aman, maka perlu dipertimbangkan untuk mengganti spesifikasi motor aksis Z yang mempunyai kecepatan putar maksimum yang lebih rendah. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan observasi secara langsung pada mesin dan melakukan kajian secara analitis berdasarkan prinsip dinamika teknik dan penerapan Hukum Newton. Hasil analisis membuktikan bahwa *G Force* maksimum yang dihasilkan tidak melebihi batas aman, yaitu sebesar 1,029 G sehingga motor aksis Z tidak perlu diganti dengan tipe lain.

Kata Kunci : Analisis Dinamik, Percepatan dan *G Force*

PENDAHULUAN

Divisi Industri dan Jasa pada PT Pindad Bandung beberapa waktu yang lalu telah mengembangkan dan memodifikasi 10 unit mesin perkakas dari klasifikasi *tape drill CNC* menjadi *vertical machining center*. Ada dua tahapan yang dilakukan dalam proses modifikasi, yaitu modifikasi unit kendali dimana fungsi-fungsinya dikembangkan dan tahapan ke dua adalah modifikasi perangkat mekanik sebagai aktuatornya, meliputi optimasi komponen, penggantian komponen bila diperlukan dan analisis kekuatan. Kesemuanya ini diperlukan agar produk akhir yang dihasilkan dapat memenuhi klasifikasi sebuah *vertical machining center* yang optimal dan aman.

Machining center adalah salah satu jenis mesin perkakas CNC yang mampu melakukan berbagai proses pengerjaan hanya dalam satu kali *set up* benda kerja dan mempunyai tingkat kecepatan pemosisian yang tinggi. Sedangkan istilah vertikal menunjukkan posisi kepala spindle berada pada sumbu vertikal. Pada karya ilmiah ini khusus dibahas mengenai studi pada perangkat mekanik mesin, terutama tentang analisis dinamik perangkat mekanik aksis Z. Analisis dinamik cukup penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kelakuan sebuah mekanisme mekanik. Didalam perhitungan nantinya, hambatan yang disebabkan oleh gesekan mekanis dan fluida pelumas diabaikan.

Tujuan dari penulisan karya ilmiah ini adalah mencari sampai seberapa jauh tingkat gaya *G Force* yang muncul saat mekanisme bergerak dari kecepatan nol hingga kecepatan maksimum. *G Force* yang dihasilkan nantinya tidak boleh melebihi batas aman. Hal ini menjadi informasi yang

* Dosen Tetap Jurusan Mesin STT YBS Internasional
rachmanto_hadiputranto@yahoo.com

cukup penting untuk para teknisi yang akan melakukan modifikasi mesin, sehingga pemilihan motor aksis dan elemen mesin lainnya dapat ditentukan dengan tepat sesuai dengan kemampuan mesin.

KAJIAN PUSTAKA

Gaya gravitasi atau *G Force* menjadi pertimbangan yang cukup penting dalam konstruksi mesin perkakas CNC. *G Force* akan muncul saat suatu mekanisme mekanik yang mengalami akselerasi baik positif ataupun negatif. Dalam sisi lain *G Force* akan sangat berpengaruh terhadap ketahanan konstruksi mesin dan kualitas produk. Karena *G Force* yang berlebihan akan menimbulkan vibrasi yang tinggi. Vibrasi yang tinggi pada hakikatnya akan menimbulkan beban dinamik yang tinggi pula.

Beban dinamik tinggi yang berulang-ulang yang terjadi pada komponen mekanik dapat mengakibatkan kelelahan (*fatigue*), sehingga pada akhirnya komponen mekanik tersebut akan mengalami kegagalan (*failure*). Indikator kegagalan dapat bermacam-macam, mulai dari yang ringan seperti keausan yang berlebihan, retakan mikro atau sampai pada tahap yang serius seperti perubahan bentuk yang permanen atau bahkan fraktur. Fraktur yang terjadi akibat kelelahan dapat terjadi apabila beban dinamiknya mencapai kurang lebih $1/3$ dari tegangan patahnya ($\sigma_u = \textit{ultimate strength}$ bahan) dan dilakukan secara berulang-ulang. Kondisi inilah yang disebut dengan patah lelah (Surdia, 1995).

Mesin perkakas CNC dirancang dapat melakukan pekerjaan lebih cepat bila dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional. Oleh karena itu dalam hal tertentu, kecepatan gerak baik gerak rotasi dan translasi linier jauh lebih tinggi disamping kekuatan struktur yang lebih kaku.

Gerakan translasi linier yang tercepat dihasilkan saat mesin melakukan gerak cepat pemosisian atau *rapid traverse*. Didalam pemrograman CNC dikenal dengan kode perintah G 00. Pada kondisi ini motor aksis Z akan berputar dengan kecepatan maksimum, kemudian kecepatan putar tersebut diubah menjadi gerakan translasi linier resiprokal.

Gerakan translasi linier resiprokal akan membentuk sebuah siklus kerja motor aksis. Siklus ini akan membentuk sebuah kurva yang dimulai dari kecepatan 0 menuju maksimum dan akhirnya 0 kembali. Ada variabel lain yang dapat diketahui selain kecepatan, yaitu waktu tempuh, lintasan dan tingkat percepatan positif dan negatif. Dalam kondisi ini nilai percepatan positif dan negatif dianggap sama.

Variabel tingkat percepatan menjadi hal yang utama dalam menentukan *G Force*. *G Force* akan terlihat pada area yang diarsir dalam kurva hasil perhitungan analitis. Sedangkan pada daerah yang tak berarsir tidak mengalami *G Force* karena kecepatannya konstan atau percepatan = 0.

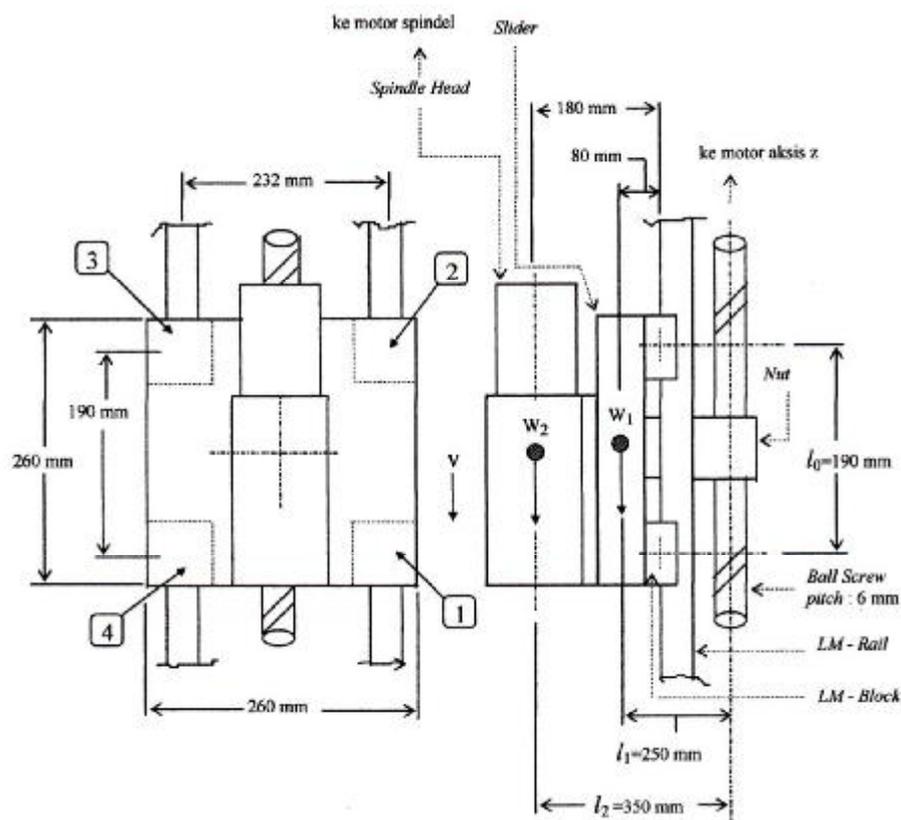
METODOLOGI

Dasar-dasar yang digunakan dalam analisis dinamik ini adalah penerapan Hukum Newton dan prinsip-prinsip dinamika teknik. Penerapan Hukum Newton yaitu tentang analisis momen inersia, meliputi momen inersia motor aksis, *ball screw* dan momen inersia mekanisme ($J = \sum m \cdot r^2$) dimana J adalah momen inersia mekanisme, $\sum m$ adalah jumlah massa total yang dapat ditumpu struktur dan r adalah radius girasi. Sedangkan analisis dinamiknya meliputi waktu, lintasan dan percepatan (Beer dan Johnston, 1988).

Didalam melakukan analisis tersebut di atas, dimasukkan faktor beban yang ditumpu oleh struktur, dimana beban-beban dari perangkat mekanik mesin telah ditimbang sebelumnya. Dalam pembahasan ini faktor gesekan mekanik dan hambatan akibat fluida pelumas diabaikan.

PEMBAHASAN

Gambar berikut adalah susunan perangkat mekanik aksis Y pada *Vertical Machining Center MC 07-PF* beserta beban yang ditumpu.



Gambar 1. Perangkat Mekanik Aksis Z

Keterangan:

W_1 = berat *slider* = 245 N (25 kg)

W_2 = berat *spindle head* = 587 N (60 kg)

g = 9,81 m/s²

1-4 = nomor tumpuan

1. Analisis Momen Inersia

a. Momen inersia mekanisme aksis Z (J_1)

Gambar 1 menjadi acuan utama untuk menghitung momen inersia mekanisme dan dapat disederhanakan sbb.:

$$v = \omega.r \quad ; \text{ sehingga } r = \frac{v}{\omega}$$

$$\omega = 2.\pi.n$$

Dari Gambar 2 berikut akan didapatkan kecepatan translasi resiprokal v , yaitu $v = p.n$. Sementara radius girasi mekanisme r adalah :

$$r = \frac{p.n}{2.p.n} = \frac{p}{2.p}$$

bila persamaan dasar momen inersia mekanisme $J_1 = m.r^2$ maka

$$J_1 = \Sigma m . \left(\frac{p}{2.p} \right)^2 \quad \dots \text{Nms}^2 \quad (1)$$

dimana

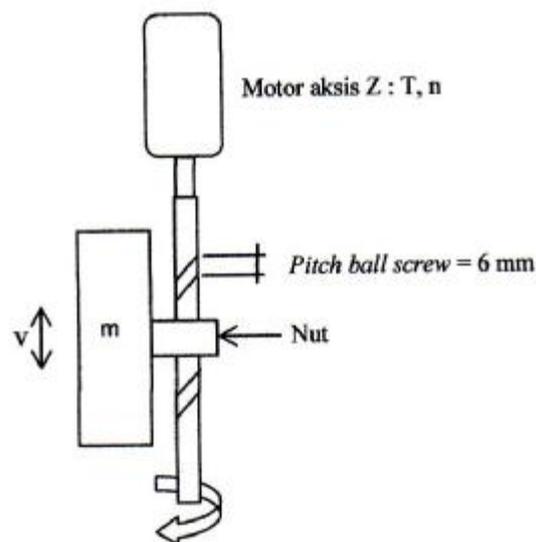
J_1 = momen inersia mekanisme (Nms²)

Σm = jumlah massa yang ditumpu (kg)

p = *pitch*/kisar *ball screw* (m)

sehingga akan didapatkan momen inersia mekanisme sebesar :

$$J_1 = (25+60) \times \left[\frac{0.006}{2.p} \right]^2 = 7,76 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2 = 7,76 \times 10^{-5} \text{ Nms}^2$$



Gambar 2 : Momen Inersia Mekanisme

b. Momen inersia *ball screw* (J_2)

Sesuai dengan spesifikasi, tipe ball screw yang digunakan adalah BNF 2806-5 THK dengan panjang efektif 102 cm dan diameter nominal 2,8 cm. Momen inersia *ball screw* dapat dihitung dengan persamaan sbb.:

$$J_2 = \frac{p \cdot g \cdot L \cdot d^4}{32 \cdot g} \quad \dots \text{ Nms}^2 \quad (2)$$

dimana:

J_2 = momen inersia *ball screw* (Nms^2)

γ = berat jenis *ball screw* (kgf/cm^3)

L = panjang efektif *ball screw* (cm)

d = diameter nominal *ball screw* (cm)

g = gravitasi 981 cm/s^2

sehingga momen inersia *ball screw* tipe BNF 2806-5 THK adalah:

$$J_2 = \frac{p \cdot (7,85 \cdot 10^{-3}) \cdot (102) \cdot (2,8^4)}{32 \cdot (981)} = 0,0049 \text{ kgf.cm.s}^2 = 0,00049 \text{ Nms}^2$$

c. Berdasarkan spesifikasi, momen inersia motor aksis Z tipe OS Fanuc adalah $J_3 = 0,0020 \text{ Nms}^2$.

Sehingga momen inersia total adalah :

$$J_{\text{total}} = J_1 + J_2 + J_3 \\ = (7,76 \times 10^{-5}) + (0,00049) + (0,0020) = 0,0025 \text{ Nms}^2$$

2. Analisis Dinamik

Beberapa data teknis berikut ini diperoleh dari spesifikasi mesin dan diperlukan untuk analisis dinamik mekanisme aksis Z.

Travel aksis Z = 200 mm

Rapid traverse aksis Z = 20 m/min ($v = 333,3 \text{ mm/s}$)

Torsi (T) motor aksis Z tipe OS = 26 Nm

a. Kecepatan sudut *ball screw* (ω)

Kecepatan sudut *ball screw* dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\omega = \frac{2 \cdot p \cdot v}{p} \quad \dots \text{ rad/s} \quad (3)$$

dimana

ω = kecepatan sudut *ball screw* (rad/s)

v = kecepatan translasi linier (mm/s)

p = pitch / kisar *ball screw* (mm)

sehingga kecepatan sudut *ball screw* tersebut adalah:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{2.w.(333,3)}{6} \\ &= 348,8 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

b. Waktu tempuh

Bila diandaikan waktu yang diperlukan saat menempuh lintasan akselerasi sama dengan waktu yang diperlukan saat menempuh lintasan deselerasi ($t_1 = t_3$), maka:

$$\begin{aligned}t_1 = t_3 &= \frac{J_{total}}{T} \cdot W \quad \dots \text{ s} \quad (4) \\ &= \frac{0,0025}{26} \cdot 348,8 \\ &= 0,033 \text{ s}\end{aligned}$$

c. Akselerasi dan deselerasi

Andaian di atas akan sebanding dengan akselerasi yang ditimbulkan, sehingga dapat disimpulkan bahwa akselerasi sama dengan deselerasi ($a_1 = a_3$), sehingga :

$$\begin{aligned}a_1 = a_3 &= \frac{v_1}{t_1} = \frac{v_3}{t_3} \quad \dots \text{ mm/s}^2 \quad (5) \\ &= \frac{333,3}{0,033} \\ &= 10.100 \text{ mm/s}^2\end{aligned}$$

d. Lintasan

Hubungan antara waktu tempuh dan akselerasi/deselerasi akan menghasilkan lintasan linier (s), sehingga lintasan (s) tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}s_1 = s_3 &= v_0 \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_1^2 \quad \dots \text{ mm} \quad (6) \\ &= 0 + \frac{1}{2} (10.100) \cdot (0,033)^2 \\ &= 5,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

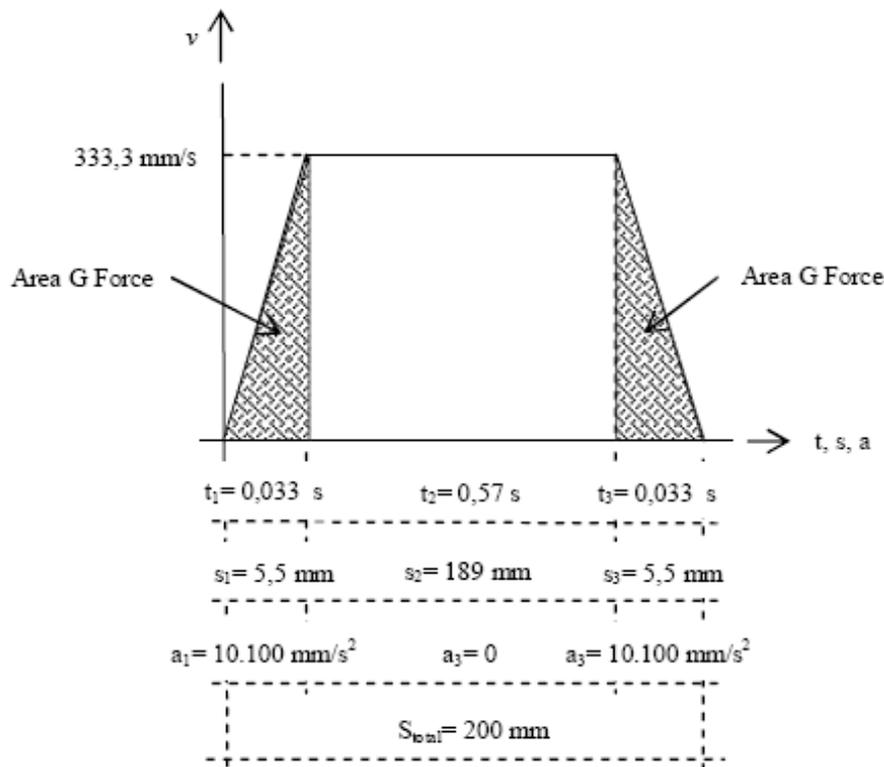
Sementara lintasan total (travel aksis Z) adalah:

$$s_{total} = s_1 + s_2 + s_3 \quad \dots \text{ mm} \quad (7)$$

sehingga dari persamaan 7 tersebut akan didapatkan waktu tempuh pada kecepatan konstan (t_2), dimana pada kondisi t_2 tidak ada akselerasi ataupun deselerasi, sehingga harga t_2 adalah:

$$\begin{aligned}s_{total} &= s_1 + (v_2 \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot a_2 \cdot t_2^2) + s_2 \\ 200 &= 5,5 + (333,3 \cdot t_2 + 0) + 5,5 \\ t_2 &= 0,57 \text{ s}\end{aligned}$$

Sehingga berdasarkan perhitungan di atas, dapat digambarkan siklus kerja motor aksis Z sbb.:



Gambar 3: Kurva Siklus Kerja Motor Aksis Z

Kurva pada Gambar 3 menunjukkan harga akselerasi dan deselerasi aktual sebesar 10.100 mm/s^2 , sehingga dapat ditentukan *G Force*-nya sebesar :

$$\begin{aligned}
 G \text{ Force} &= \frac{a_{\text{aktual}}}{\text{gravitasi}} & (8) \\
 &= \frac{10100}{9810} \\
 &= 1,029 \text{ G}
 \end{aligned}$$

Area yang diarsir pada kurva di atas adalah area dimana struktur mesin mengalami *G Force* karena adanya akselerasi dan deselerasi, sedangkan area tanpa arsir tidak mengalami *G Force* karena akselerasi = 0.

SIMPULAN

Dari pembahasan ini dapat diambil sebuah kesimpulan bahwa penggunaan motor aksis Z tipe OS Fanuc dengan berat beban maksimum $W_1+W_2 = 832 \text{ N}$, dengan kecepatan translasi vertikal sebesar $333,3 \text{ mm/s}$ akan menghasilkan $1,029 \text{ G}$. Dengan demikian penggunaan motor aksis tipe tersebut beserta komponen mekanik lainnya masih dalam kondisi aman karena tidak melebihi batas *G Force* maksimumnya, yaitu 2 G ($1,029 \text{ G} < G_{\text{maks}}$).

DAFTAR PUSTAKA

- Effendi, Muchtar dkk, 1997, **Gugus Kendali Mutu Proyek**, PT Pindad Bandung.
- Beer P, Ferdinand & Johnston Jr, E. Russell, 1988, *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, Fifth Edition, Mc Graw Hill.
- Shigley, Joseph E & Mischke, Charles R, *Mechanical Engineering Design*, Sixth Edition, Mc Graw Hill.
- Surdia,Tata & Saito, Shinroku (1995), **Pengetahuan Bahan Teknik**, cetakan ketiga, PT Pradnya Paramita.