

GAYA POTONG SPESIFIK UNTUK PROSES FREIS DENGAN PAHAT BERGIGI MIRING/HELIK (HELICAL END MILLS)

Taufiq Rochim *

Abstrak

Data pemesinan banyak dimanfaatkan untuk merencanakan proses pemesinan. Data tersebut pada umumnya diperoleh dengan melakukan percobaan berbagai proses pemesinan yang melibatkan banyak jenis material benda kerja dan pahat. Khusus untuk proses Freis data yang diperoleh umumnya berasal dari percobaan freis dengan pahat muka (face milling cutter). Dengan face milling, umumnya kedalaman potong (aksial) relatif kecil bila dibandingkan dengan diameter pahat atau kedalaman potong radial. Pada kondisi ini, meskipun pahat yang bersangkutan mempunyai sudut miring (helik), pengaruh sudut miring tersebut bisa diabaikan. Lain halnya dengan pengefreisan dengan pahat end-mill yang mempunyai sudut miring yang cukup besar, maka kondisi pengefreisannya akan berbeda dengan mengefreis muka. Data pemesinan dalam hal ini tidak bisa dimanfaatkan, kecuali jika dilakukan modifikasi rumus gaya pemotonganannya. Untuk itu perlu dilakukan percobaan pengefreisan dengan end mill dimana datanya diolah dengan menggunakan rumus baru yang dikembangkan di Lab Proses Pemesinan Mesin ITB. Hasil penelitian ini cukup memberikan harapan sehingga kelak data pengefreisan yang ada bisa dimanfaatkan baik untuk proses mengefreis muka maupun mengefreis dengan end-mill.

1. Pendahuluan

Untuk menentukan gaya potong spesifik dalam proses freis dengan pahat freis muka atau pahat selubung bergigi lurus diperlukan beberapa rumus yang diturunkan sebagai berikut.

Bila gaya potong tangensial F_t didefinisikan sebagai berikut :

$$F_t = A k_s, \text{ maka}$$

$$F_{tm} = A_m k_{sm} ; N, \dots \dots (1)$$

dimana,

F_{tm} = gaya potong pergigi rata-rata; N
 A_m = penampang geram sebelum terpotong rata-rata; mm²
 k_{sm} = Gaya potong spesifik rata-rata; N/mm²

Perbedaan antara proses freis datar dan tegak (muka) terletak pada penampang geram A_m , yaitu :

$$A_m = b h_m ; \text{mm}^2, \dots \dots (2)$$

dimana (lihat gambar 1),

b = lebar geram sebelum terpotong; mm
 = w ; mengefreis datar
 = a ; mengefreis tegak
 h_m = tebal geram sebelum terpotong rata-rata ;mm
 = $f_z \sqrt{a/d}$; mengefreis datar
 = $f_z \sin \kappa_r \sin \phi_m$; mengefreis tegak.

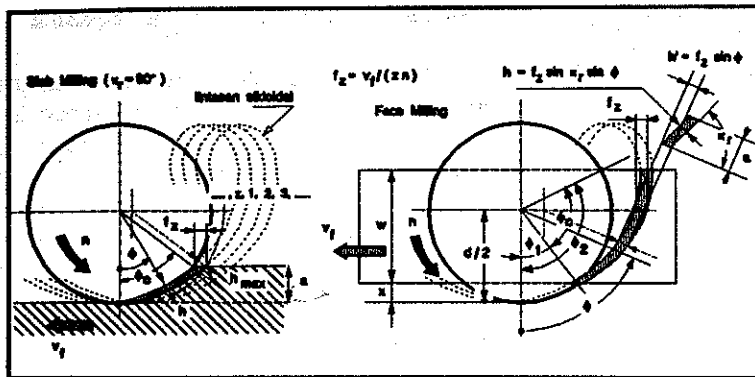
Daya potong pergigi rata-rata N_{zm} dapat dihitung dari gaya potong pergigi rata-rata dan kecepatan potong yaitu :

$$N_{zm} = \frac{F_{tm} v}{60.000} ; \text{kW}, \dots \dots (3)$$

dimana,

v = $\pi dn/1000$; m/min,
 d = diameter efektif pahat freis ; mm,
 n = putaran spindel ; r/min.

Pada proses freis tidak seluruh gigi pahat freis melakukan pemotongan. Pada suatu saat, mungkin tidak ada atau mungkin ada satu atau beberapa buah saja gigi yang efektif bekerja, tergantung pada besarnya sudut persentuhan ϕ_c . Dengan demikian dapat didefinisikan jumlah gigi



Gambar 1 Proses mengefreis datar (selubung; slab-milling) dan mengefreis tegak (muka; face-milling).

efektif z_e yang tidak selalu merupakan bilangan bulat, yaitu :

$$z_e = \phi_c / \phi_z = \phi_c / (2\pi/z) \quad \dots (4)$$

dimana,

ϕ_c = sudut persentuhan ; rad,

ϕ_z = sudut sektor gigi = $\frac{2\pi}{z}$; rad.

Dengan menggabungkan rumus (3) dengan (4), maka akan diperoleh daya potong rata-rata, yaitu :

$$N_{cm} = N_{zm} z_e \quad ; \text{ kW}, \dots (5a)$$

atau dituliskan dalam bentuk lengkap :

$$N_{cm} = \frac{k_{sm} b h_m d n \phi_c z}{120\,000\,000} \quad ; \text{ kW}. (5b)$$

Daya potong tersebut merupakan daya potong rata-rata yang harganya dapat diketahui melalui dinamometer (bukan dari wattmeter) yaitu berdasarkan perata-rataan harga momen puntir yang berfluktuasi sebagaimana yang terekam pada alat pencatat (atau melalui oscilloscope).

$$N_{cm} = \frac{M_{tm} 2\pi n}{60\,000\,000} \quad ; \text{ kW}, \dots (6)$$

dimana,

M_{tm} = momen puntir rata-rata ; Nmm

n = putaran spindel ; r/min.

Dari penggabungan rumus (5b) dan (6) maka didapat :

$$k_{sm} = \frac{4\pi M_{tm}}{b d z h_m \phi_c} \quad \dots (7)$$

Rumus (7) dapat diselesaikan baik untuk proses freis datar maupun tegak sebagai analisis berikut :

Mengefreis Datar

$$h_m = f_z \sqrt{a/d} ; b = w$$

$$\phi_c = \arcsin(2\sqrt{a/d})$$

$$= 2\sqrt{a/d} ; \text{ untuk } a/d$$

yang kecil, maka,

$$k_{sm} = \frac{4\pi M_{tm}}{w d z f_z \sqrt{a/d} 2\sqrt{a/d}} = \frac{2\pi M_{tm}}{w f a}$$

Mengefreis Tegak

$$h_m = f_z \sin \kappa_r \sin \phi_m = f_z (\sin \kappa_r) 2w / (d \phi_c)$$

$$b = a / \sin \kappa_r$$

$$k_{sm} = \frac{4\pi M_{tm}}{a (\sin \kappa_r)^{-1} d z f_z (\sin \kappa_r) 2w (d \phi_c)^{-1}}$$

Dengan demikian gaya potong spesifik rata-rata untuk proses freis datar maupun tegak adalah:

$$k_{sm} = \frac{2\pi M_{tm}}{w a f} = \frac{2\pi n M_{tm}}{w a v_f} \quad ; \text{ N/mm}^2. (8)$$

Berdasarkan hasil percobaan untuk berbagai kondisi pemotongan dengan beberapa benda kerja, k_{sm} tersebut hanya dipengaruhi oleh tebal geram rata-rata h_m sebagaimana rumus korelasi berikut.

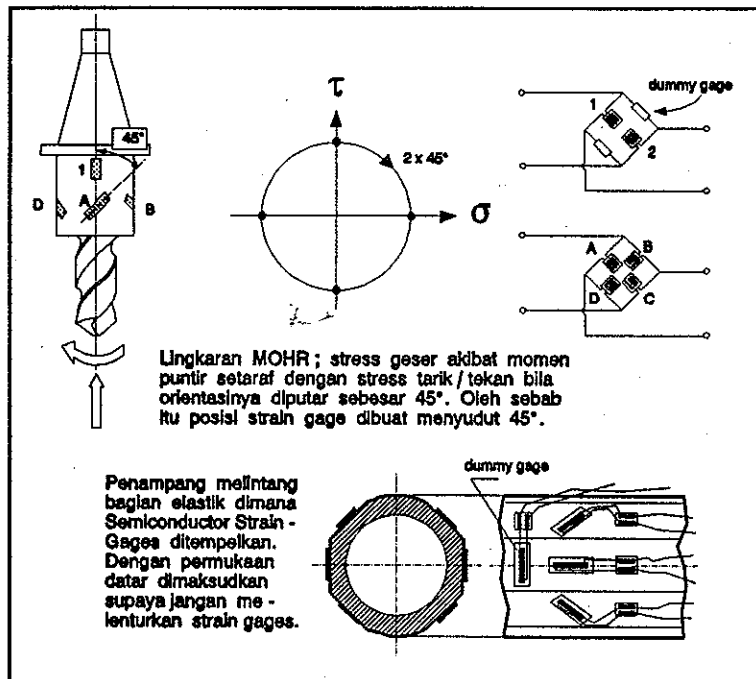
$$k_{sm} = k_{s1.1} h_m^{-p} \quad ; \text{ N/mm}^2, \dots (9)$$

dimana,

$k_{s1.1}$ = gaya potong spesifik referensi ; N/mm^2 merupakan sifat benda kerja sewaktu dipotong dengan proses freis, dipengaruhi oleh sudut geram dan kecepatan potong.

p = pangkat untuk tebal geram rata-rata, dipengaruhi oleh material benda kerja, dan kecepatan potong (rata-rata berharga 0,25).

Mesin Vol. IX No. 2



Gambar 3 Dinamometer Shank yang dipasang pada spindel mesin freis. Pemakaian Semiconductor Strain-Gages dimaksudkan untuk menjamin kekakuan pemegang pahat dan sementara itu sensitivitas dinamometer ini cukup tinggi.

Empat active gages dirangkai sehingga membentuk full-bridges, lihat gambar 3. Karena orientasi keempat strain-gages tersebut membentuk sudut 45° terhadap sumbu beranti rangkaian ini akan sensitif terhadap puntiran/torsi M_t . Sementara itu, untuk mendeteksi gaya tekan F_z hanya dua strain gages (sejajar sumbu) yang aktif. Dalam hal ini perlu digunakan dummy gages supaya dapat dibentuk full-bridges sehingga rangkaian ini akan bebas dari pengaruh perubahan temperatur.

Kedua Wheatstone Bridges tersebut diberi tegangan eksitasi input masing-masing DC 2,5 V. Dalam hal ini digunakan Amplifier 2B31 (tersedia dipasaran) sebagai pemasok tegangan input maupun penguat sinyal bridges. Outputnya kemudian diperkuat lagi dengan Amp. 747 untuk meningkatkan impedansi rangkaian elektronik secara keseluruhan. Output dinamometer ini berupa sinyal analog yang bisa direkam dengan Strip Chart Recorder atau direkam pada Casette Data Recorder. Hasil kalibrasi dinamometer ini adalah,

- Momen puntir: $0,033 \pm 0,0004 \text{ mV/N.mm}$
- Gaya aksial: $0,933 \pm 0,0078 \text{ mV/N}$
- Cross Sensitivity: kurang dari 0.02 mV/mV .

Dalam penelitian ini selain dengan cara analog diatas juga dikembangkan perekaman data secara digital. Untuk memperkuat sinyal analog bisa digunakan Op-Amp (Operational Amplifier) sehingga cukup besar untuk bisa diubah oleh ADC (Analog to Digital Converter). Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada pemakaian ADC adalah,

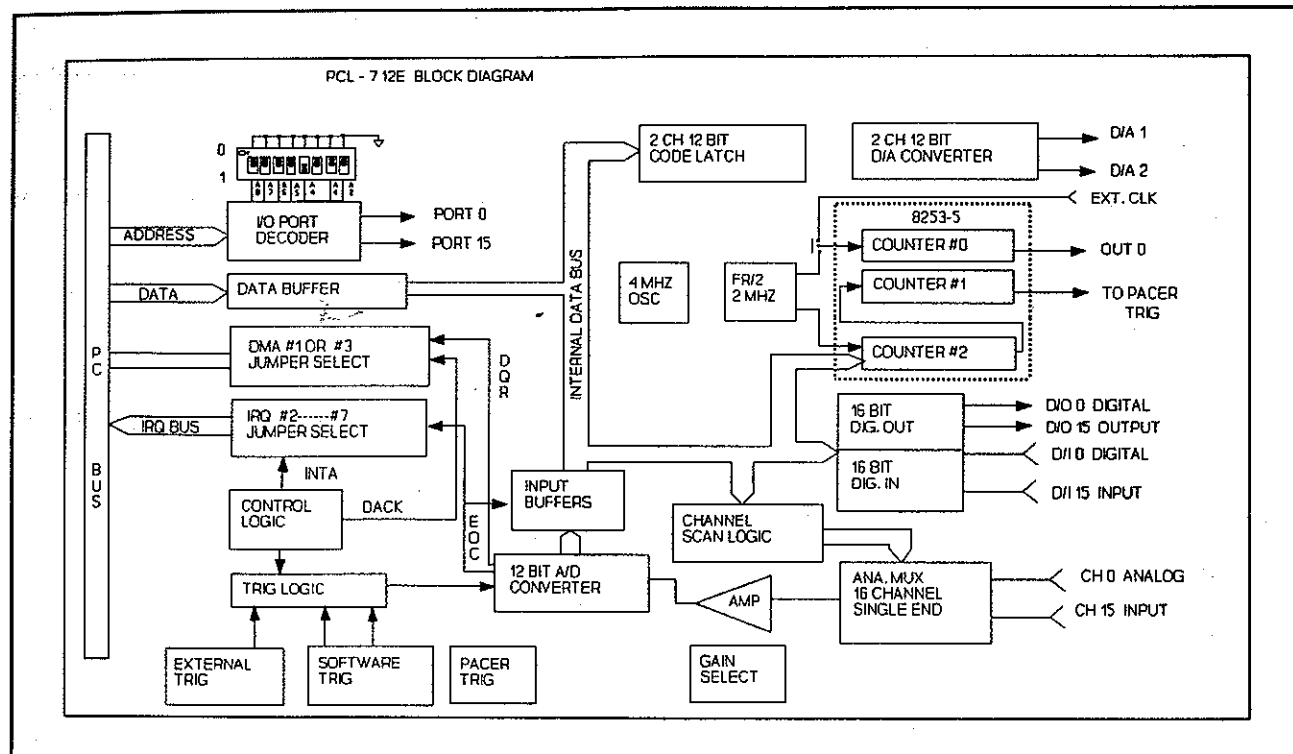
1. Pemilihan alamat (address) bagi ADC card yang dipasang pada bus komputer,
2. Jenis input port yang dipakai misalnya bipolar, dengan range: $\pm 1,2,5$ atau 10 V .
3. Direct Memory Access (DMA), level 1 atau 3,
4. Sinyal pemicu (trigger source), internal atau eksternal,
5. Counter Input Clock, internal atau eksternal,
6. Interrupt level, IRQ 2 s.d. IRQ 7, yang bisa diset melalui software.

Card ADC yang dipasarkan banyak ragamnya, salah satu jenis card ADC yang sering dipakai adalah buatan PC Laboratory dengan tipe PCL-812 (712E). Diagram Blok dari card tersebut diperlihatkan pada gambar 4.

Kemampuan card ADC tipe PCL 712 ini antara lain memiliki 16 channel masukan sinyal analog tunggal (single ended). Berarti untuk satu sinyal cukup disalurkan lewat satu kabel. Sementara itu, tegangan yang harus diukur dibandingkan dengan ground umum (common ground), sehingga disebut sebagai sinyal mengambang (floating source). Hal ini mempermudah penyiapan perekaman data. Pengaturan perekaman data untuk setiap saluran masukan dilakukan dengan multiplexer.

ADC PCL 712 mempunyai 16 alamat yang berurutan pada input dan outputnya. Beberapa register yang perlu diperhatikan dalam pengubahan sinyal analog ke digital dimana BASE = &H220 adalah,

BASE +4 ; byte ini bersama-sama dengan bit 0-3 dari byte pada BASE +5 membentuk angka 12 bit sebagai hasil pengubahan A/D. Berarti angka tersebut adalah 0 s.d. 4095 ,



Gambar 4 Blok diagram dari card ADC tipe PCL 712 untuk pengubahan sinyal analog menjadi digital.

BASE +5 ; bersama-sama dengan BASE +4 telah dijelaskan diatas. Bit 4 menunjukkan status penyelesaian proses; 0=siap, 1=tidak siap.

```

READ bit 7 6 5 4 3 2 1 0
-
BASE +4 D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
BASE +5 0 0 NRDY D11 D10 D9 D8
  
```

BASE +10 ; Bit 0-3 dari register ini berfungsi untuk memilih saluran A/D yang diinginkan; bit 4-7 diabaikan.

Seperti yang disinggung didepan pen-cuplikan data bisa dilakukan melalui software pemicu yang berasal dari dalam sebagaimana contoh program BASIC berikut,

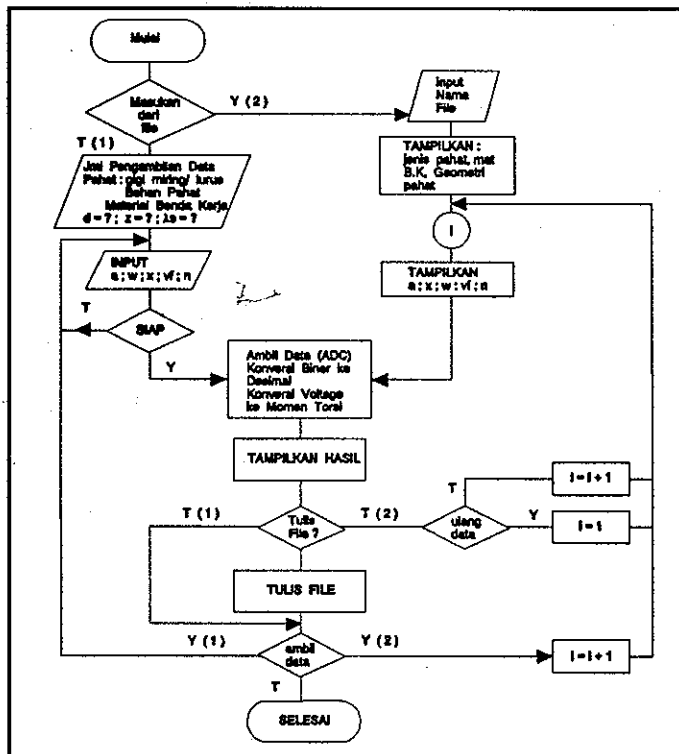
```

10 BASE%= &H220 'Base address
20 FOR CH%=0 TO 15
30 GOSUB 70
40 PRINT CH%,V 'Tulis nomor channel
   'dan harga tegangan
50 NEXT CH%
60 END
70 ***** A/D Routine *****
80 OUT BASE%+10, CH% 'Pilih channel
90 OUT BASE%+11,1 'Trigger A/D converter
  
```

```

100 ' Ulangi jika pengubahan belum lengkap
110 HI = INP ( BASE% +5)
120 IF HI >= 16 THEN 110
130 ' Baca A/D low byte
140 LO = INP ( BASE% +4)
150 'Pengubahan harga kedalam tegangan
160 'Kurangi dengan 2048, karena inputnya
170 'bipolar +1 Volt s.d. -1 Volt.
180 V = (HI * 256 + LO - 2048)* 10/4096
190 RETURN
  
```

Perekaman data digital bisa langsung dilakukan sewaktu proses pemesian berlangsung atau sinyal analog direkam dahulu pada Casette Data Recorder untuk kemudian dengan menggunakan ADC diatas sinyal tersebut diubah menjadi sinyal digital sehingga bisa diolah lebih lanjut dengan menggunakan Komputer. Untuk ini telah dipersiapkan program pengolahan Data termasuk pengarsipan data yang diperlukan (jenis pahat, benda kerja, konisi pemesian, dsb.). Program pengambilan data ini ditunjukkan dengan Diagram Alir seperti gambar 5.



Gambar 8 Diagram Alir pengambilan data analog dikonversikan ke data digital disertai dengan pengubahan besaran votase menjadi besaran gaya atau momen.

4. Analisis Data

Percobaan pengefreisan dilakukan dengan menggunakan benda kerja baja (AISI 4130 dan AISI 4340) dan Aluminium. Pahat Karbida (Face Mill, $\phi = 100$ mm, $z = 8$) digunakan untuk mengefreis baja dan pahat HSS (End Mill, $\phi = 16$ mm, $z = 4$, $\lambda_s = 30^\circ$) untuk mengefreis Aluminium. Kondisi pengefreisan (x , a , w , n , v_f) diatur/dipilih sehingga menghasilkan tebal geram rata-rata h_m dan lebar geram rata-rata b_m yang tertentu.

Untuk proses freis muka:

$$h_m = f_z \sin \kappa_r \sin \phi_m = f_z (\sin \kappa_r) 2w / (d \phi)$$

$$b = a / \sin \kappa_r$$

Untuk proses freis dengan End Mill

$$b_m = \frac{d}{2 \sin \lambda_s} \frac{\phi_\lambda \phi_c}{\phi_\lambda + \phi_c}$$

Tebal geram rata-ratanya adalah, Bagi kondisi posisi $\phi_\lambda < \phi_c$:

$$\bar{h}_m = f_z [\cos \phi_1 - \cos \phi_2 + \cos (\phi_2 - \phi_\lambda) - \cos (\phi_1 + \phi_\lambda)] / [2 \phi_\lambda]$$

Bagi kondisi posisi $\phi_\lambda \geq \phi_c$:

$$\bar{h}_m = f_z (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) / \phi_c$$

Berdasarkan Machining Data yang ada rumus Tahanan/Gaya Potong Spesifik adalah (rumus 9),

$$k_{sm} = k_{s1.1} h_m^{-p} ; N/mm^2$$

Rumus diatas tidak mengandung harga lebar geram b (atau $\bar{b}$).

Untuk membuktikan rumus diatas maka dilakukan percobaan dengan mengikut sertakan juga variabel lebar geram. Jadi bentuk rumus empiriknya menjadi,

$$k_s = k_{s1.1} h^{-p} b^{-q}$$

Jika dari data percobaan setelah dianalisis dengan *Teknik Regresi Multidimensi* ternyata pangkat lebar geram bisa dianggap sama dengan nol maka rumus pada Machining Data tersebut bisa diakui kebenarannya.

Data untuk melakukan Analisis Regresi Multidimensi berupa suatu set variabel ($y_i, x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{m,i}$), dimana,

y_i = variabel yang diamati; dalam hal ini $\log (k_{sm})$,

$x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{m,i}$ = m variabel yang ditetapkan; dalam hal ini $\log (h$ atau $h_m)$ dan $\log (b$ atau $b_m)$.

Bentuk fungsi linearnya:

$$Y = a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m$$

$$a_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 - \dots - b_m \bar{x}_m$$

Dengan analisis regresi ini dapat dicari harga-parameternya b_i (dalam hal ini p dan q) beserta harga deviasi standardnya ($s_{b1}, s_{b2}, \dots, s_{bm}$). Dengan demikian, selain dapat dicari harga batas-batas selang kepercayaannya (Confidence Interval) juga dapat dilakukan pengtesan apakah masing-masing b_i bisa dianggap nol. Jika dapat dianggap nol berarti

variabel yang bersangkutan x_μ tidak mempunyai arti dalam rumus empirik yang diajukan. Test yang dipakai adalah Student Test,

$$t = b_\mu / s_{b,\mu} \leq t_{.95}$$

dimana,

$t_{.95}$ = fraktile 95% dari Distribusi t .

Percobaan dirancang sedemikian rupa sehingga tidak ada korelasi linier antara variabel yang ditetapkan ($\log h$ bukan fungsi linier dari $\log b$) supaya ketepatan penentuan pangkatnya (p dan q) sebaik mungkin (standard deviasinya kecil). Salah satu set percobaan dengan hasil analisis regresi adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.

Dari analisis yang ditunjukkan pada tabel 2 ternyata dapat dikatakan bahwa pangkat b_m dapat diabaikan. Dalam hal ini data asli bisa dianalisis kembali dengan regresi linier biasa dengan tanpa menyertakan variabel b_m dan hasilnya adalah,

$$\ln k_{sm} = 7.254209 - 0.342691 h_m$$

Jadi $k_{s1.1} = 1414 \text{ N/mm}^2$, dan $p = 0.34$.

Dari tabel 1 bagi Baja Struktur St50 harganya adalah, $k_{s1.1} = 1990 \text{ N/mm}^2$, dan $p = 0.25$.

Hasil selengkapnya dari percobaan proses freis yang telah dilakukan di Lab. Teknik Produksi Mesin ITB adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 3 dan tabel 4.

4. Kesimpulan

Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa pada umumnya lebar geram b (atau b_m) tidak bisa diabaikan. Disamping itu, untuk proses freis dengan End Mill yang mempunyai sudut miring $\lambda_s = 30^\circ$ menunjukkan beberapa hasil yang berbeda bagi kondisi $\phi_\lambda < \phi_c$ dengan kondisi $\phi_\lambda \geq \phi_c$. Untuk proses freis dengan Face Mill menunjukkan adanya perbedaan dengan hasil End Mill, yang mana diharapkan mereka serupa hasilnya. Berarti ada suatu kesalahan pada penurunan rumus teoretik dari h_m maupun b_m . Sementara masih diusahakan untuk mencari bentuk rumus teoretik yang lebih baik maka percobaan perlu dilakukan bagi material benda kerja lain yang melibatkan berbagai macam kondisi pemesinan.

Daftar Pustaka

1. Rochim, T.; Teori dan Teknologi Proses Pemesinan; Lab. Teknik Produksi Mesin ITB, Bandung, 1991.
2. Hald, A.; Statistical Theory with Engineering Application; McGraw Hill.
3. Lumenda, R.; Penentuan Gaya Potong Spesifik Referensi Material pada Proses Freis; Jurusan Teknik Mesin FTI ITB, Bandung, 1991.
4. Ukhfi Ahmad; Gaya Potong Spesifik Material pada Proses Freis; Jurusan Teknik Mesin FTI ITB, Bandung, 1985.
5. Kronenberg, M.; Grunzuge der Zerspanungslehre, Springer Verlag, Berlin, 1963.
6. Machinability Data Center; Machining Data Handbook, Metcut Research Ass., Inc., Cincinnati, 1972.

Tabel 2

Data percobaan Freis Muka dengan hasil Analisis Regresinya.

Bahan : AISI 4130 Pahat : Face Mill, Karbida, Jumlah gigi $z = 8$, Diameter = 100 mm, Sudut Miring $\lambda_s = 0^\circ$ Putaran : 250 rpm; Tanpa Cairan Pendingin.									
No.	a	w	v_f	f_z	x	h_m	b_m	Torsi	k_{sm}
1	.5	9.6	40.	0.020000	45.2	0.00230	0.5	1290.35034	10556.65834
2	.5	9.6	31.5	0.015750	45.2	0.00181	0.5	1136.30847	11804.94876
3	.5	9.6	25.	0.012500	45.2	0.00144	0.5	1030.27979	13486.32973
4	.3	9.6	40.	0.020000	45.2	0.00230	0.3	804.21832	10965.82472
5	.3	9.6	31.5	0.015750	45.2	0.00181	0.3	694.18848	12019.71289
6	.3	9.6	25.	0.012500	45.2	0.00144	0.3	628.17053	13704.54942
7	.1	9.6	40.	0.020000	45.2	0.00230	0.1	316.08582	12929.86063
8	.1	9.6	31.5	0.015750	45.2	0.00181	0.1	238.06464	12366.10119
9	.1	9.6	25.	0.012019	45.2	0.00138	0.1	196.05322	13344.91746

Setelah ditransformasikan menjadi harga logaritmiknya maka $\log k_{sm}$ sebagai variabel yang diamati dan $\log h_m$, $\log b_m$ sebagai variabel yang ditetapkan dianalisis dengan Regresi Multidimensi dengan hasil sebagai berikut.

$$\ln k_{sm} = 7.218597 - 0.337986 \ln h_m - 0.046661 \ln b_m$$

Atau:

$$k_{sm} = 1365 h_m^{-0.34} b_m^{-0.05}$$

Variasi:	SSD:	Df:	Varian:
Total:	0.068100	8	0.008513
Residu:	0.018042	6	0.003007
Diantara harga regresi:	0.050058	2	0.025029

Persamaan regresi diatas dianggap cukup representatif terhadap data yang diwakilinya karena rasio antara Variasi Diantara Harga Regresi terhadap Variasi Total adalah,

$$0.050058/0.068100 = 73.51 \%$$

Deviasi standar dari masing masing slope (kemiringan):

$$s_h = 0.09259 \quad \text{dan} \quad s_b = 0.02723$$

Pangkat variabel h_m (0.337986) tidak bisa disamakan dengan nol sebab,
 $t = 0.337986/0.09259 = 3.65 > t_{.95, Df: 6} = 1.943$

Pangkat variabel b_m (0.046661) dapat dianggap sama dengan nol karena,
 $t = 0.046661/0.02723 = 1.71 < t_{.95, Df: 6} = 1.943$

Tabel 3

Hasil analisis regresi atas data percobaan freis dengan End Mill.

No.	Benda Kerja	$k_{sl.1}$	Pangkat untuk:		Kondisi	Rasio variasi
			h_m	b_m		
1	AISI 4130	2169.905	-0.4194	-0.4156	$\phi_\lambda < \phi_c$	94.3%
2	AISI 4130	230.160	-0.4885	-0.7511	$\phi_\lambda \geq \phi_c$	98.4%
3	AISI 4340	5129.716	-0.3348	-0.8087	$\phi_\lambda < \phi_c$	96.8%
		31357.670	-	-0.8123	$\phi_\lambda < \phi_c$	*
4	AISI 4340	1241.679	-0.4451	-0.0989	$\phi_\lambda \geq \phi_c$	82.8%
		1061.912	-0.4451	-	$\phi_\lambda \geq \phi_c$	**
5	AL	487.514	-0.5143	-0.4509	$\phi_\lambda < \phi_c$	96.9%
6	AL	266.791	-0.6434	-0.2634	$\phi_\lambda \geq \phi_c$	78.1%
		175.905	-0.6434	-	$\phi_\lambda \geq \phi_c$	***

* Dengan tidak menyertakan h_m , maka garis regresi yang diperoleh mempunyai koefisien korelasi r sebesar -97%.

** Dengan tidak menyertakan b_m , maka $r = -91\%$

** Dengan tidak menyertakan b_m , maka $r = -87\%$

Tabel 4

Hasil analisis regresi atas data percobaan freis dengan Face Mill.

No.	Benda Kerja	$k_{sl.1}$	Pangkat untuk:		Kondisi	Rasio variasi
			h_m	b_m		
1	AISI 4130	1364.573	-0.3380	-0.0467		73.15%
		1414.044	-0.3420	-		*
2	AISI 4130	807.531	-0.5416	-0.1339		99%

* ; Dengan tidak menyertakan b_m maka $r = -78\%$