

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Pada subbab ini ditampilkan tabel berisi data *surface roughness* (Ra) dengan satuan μm . Data *surface roughness* (Ra) didapat dari lima sampel pengukuran pada setiap *slot* dengan *axial depth of cut* berbeda yang merupakan hasil proses *end milling* menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. Kolom di sebelah kanan dari kelima sampel merupakan rata-rata dari kelima sampel tersebut.

Tabel 4.1

Data *Surface Roughness* (Ra) Hasil Penelitian

No.	Depth of Cut (mm)	Surface Roughness (Ra) Variabel Helix Agle (μm)	Rata-rata Ra (μm)	Surface Roughness (Ra) Normal Helix Agle (μm)	Rata-rata Ra (μm)
1	0,6	0,337	0,390	0,946	1,150
2		0,390		1,36	
3		0,394		0,878	
4		0,379		1,179	
5		0,451		1,389	
6	1,2	0,518	0,469	1,75	1,558
7		0,487		1,633	
8		0,477		1,631	
9		0,461		1,764	
10		0,404		1,014	
11	1,8	0,549	0,543	1,493	1,633
12		0,550		1,619	
13		0,544		1,419	
14		0,533		1,388	
15		0,540		2,245	

4.2 Uji T Pengaruh Variabel *Helix Angle* terhadap *Surface Roughness* (Ra)

Uji T dilakukan untuk mengetahui pengaruh pahat variabel *helix angle* melalui perbandingan dengan pahat normal *helix angle*. Uji T dilakukan pada setiap level *axial depth of cut*. Taraf kepercayaan yang digunakan pada uji T sebesar 95%.

Pada uji T ditetapkan hipotesis H_0 dan hipotesis tandingan berupa H_1 . Penerimaan hipotesis H_0 menyatakan pahat variabel *helix angle* tidak menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang secara nyata lebih kecil dari pahat normal *helix angle*. H_0 dapat ditolak ketika nilai $T_{\text{(hitung)}}$ lebih kecil dari $-T_{\text{(alpha)}}$ dengan α sebesar 5%.

$$H_0 : \mu_{\text{Ra variabel helix angle}} = \mu_{\text{Ra normal helix angle}}$$

H_1 : μ Ra variabel *helix angle* < μ Ra normal *helix angle*

1. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 0,6 mm

Tabel 4.2

Uji T *Axial Depth of Cut* 0,6 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,390	1,15	-0,760	-7,18	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 0,6 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

2. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 1,2 mm

Tabel 4.3

Uji T *Axial Depth of Cut* 1,2 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,469	1,56	-1,09	-7,77	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 1,2 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 1,2 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

3. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 1,8 mm

Tabel 4.4

Uji T *Axial Depth of Cut* 1,8 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,543	1,63	-1,09	-6,89	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 1,8 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 1,8 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

4.3 Analisis Regresi

Analisis regresi dilakukan untuk mengetahui korelasi antara variabel bebas *axial depth of cut* dengan variabel terikat *surface roughness* (R_a) pada pahat variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. *Surface roughness* (R_a) memiliki fungsi yang dipengaruhi *axial depth of cut* (a_p), *spindle speed* (n), dan *feed rate* (v_f). Fungsi tersebut dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut.

$$R_a = C \cdot a_p^{\beta_1} \cdot n^{\beta_2} \cdot v_f^{\beta_3}$$

Dimana:

R_a = *Surface roughness*

C = Konstanta

a_p = *Axial depth of cut*

n = *Spindle speed*

v_f = *Feed rate*

$\beta_{1,2,3}$ = pangkat dari masing-masing variabel

Persamaan tersebut berhubungan non linear, sehingga dilakukan transformasi logaritma *double log*, sebagai berikut.

$$\log R_a = \log C + \beta_1 \log a_p + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f$$

Spindle speed dan *feed rate* bernilai konstan, sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\log C + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f = \text{konstan} = \alpha$$

maka

$$\log R_a = \beta_1 \log a_p + \alpha$$

Untuk mempermudah analisis regresi, persamaan tersebut diubah menjadi sebagai berikut.

$$Y = \beta_1 X + \alpha$$

Dimana :

$$Y = \log R_a$$

$$X = \log a_p$$

Setelah dilakukan analisis regresi, persamaan di atas dikembalikan ke persamaan logaritma, kemudian ke persamaan non linear.

4.3.1 Analisis Regresi Pengaruh *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness (Ra)* pada Pahat Normal *Helix Angle*

Tabel 4.5

Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Normal *Helix Angle*

Regresi linear		
r_{xy}	$Beta1$	$Alpha$
0,613	0,332	0,136

Melalui analisis regresi didapat r_{xy} yang bernilai 0,613. Nilai r_{xy} menyatakan pada penggunaan pahat normal *helix angle*, variabel bebas *axial depth of cut* berpengaruh terhadap *surface roughness (Ra)* sebesar 61,3%, sedangkan 38,7 % dipengaruhi variabel lain. Persamaan linear yang didapat melalui analisis regresi adalah:

$$Y = 0,332 X + 0,135$$

Persamaan tersebut dikembalikan ke bentuk logaritma asalnya, sehingga didapat persamaan sebagai berikut.

$$\log R_a = 0,332 \log a_p + 0,135$$

Persamaan transformasi logaritma *double log* kemudian dikembalikan ke bentuk awal persamaan non linear, sebagai berikut.

$$R_a = 1,37 \cdot a_p^{0,332}$$

Tabel 4.6

Anova Regresi Normal *Helix Angle*

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}	R^2
Regresi	0,064	1	0,064	7,817	4,67	0,376
Galat	0,107	13	0,00819			
Total	0,171	14	0,0122			

Hasil anova didapat $F_{(hitung)}$ yang lebih besar dari $F_{(tabel)}$. Hal tersebut menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness (Ra)*. Nilai R^2 menyatakan kesesuaian model persamaan linear *axial depth of cut* 0,6 mm – 1,8 mm terhadap *surface roughness (Ra)* pada pahat normal *helix angle* sebesar 37,6%.

4.3.2 Analisis Regresi Pengaruh *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness (Ra)* pada Pahat Variabel *Helix Angle*

Tabel 4.7

Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Variabel *Helix Angle*

Regresi linear		
r_{xy}	$Beta1$	$Alpha$
0,882	0,301	-0,346

Melalui analisis regresi didapat r_{xy} yang bernilai 0,882. Nilai r_{xy} menyatakan pada penggunaan pahat variabel *helix angle*, variabel bebas *axial depth of cut* berpengaruh terhadap *surface roughness* (Ra) sebesar 88,2%, sedangkan 11,8% dipengaruhi variabel lain. Persamaan linear yang didapat melalui analisis regresi adalah:

$$Y = 0,301X - 0,346$$

Persamaan tersebut dikembalikan ke bentuk logaritma asalnya, sehingga didapat persamaan sebagai berikut.

$$\log R_a = 0,301 \log a_p - 0,346$$

Persamaan transformasi logaritma *double log* kemudian dikembalikan ke bentuk awal persamaan non linear, sebagai berikut.

$$R_a = 0,450 \cdot a_p^{0,301}$$

Tabel 4.8

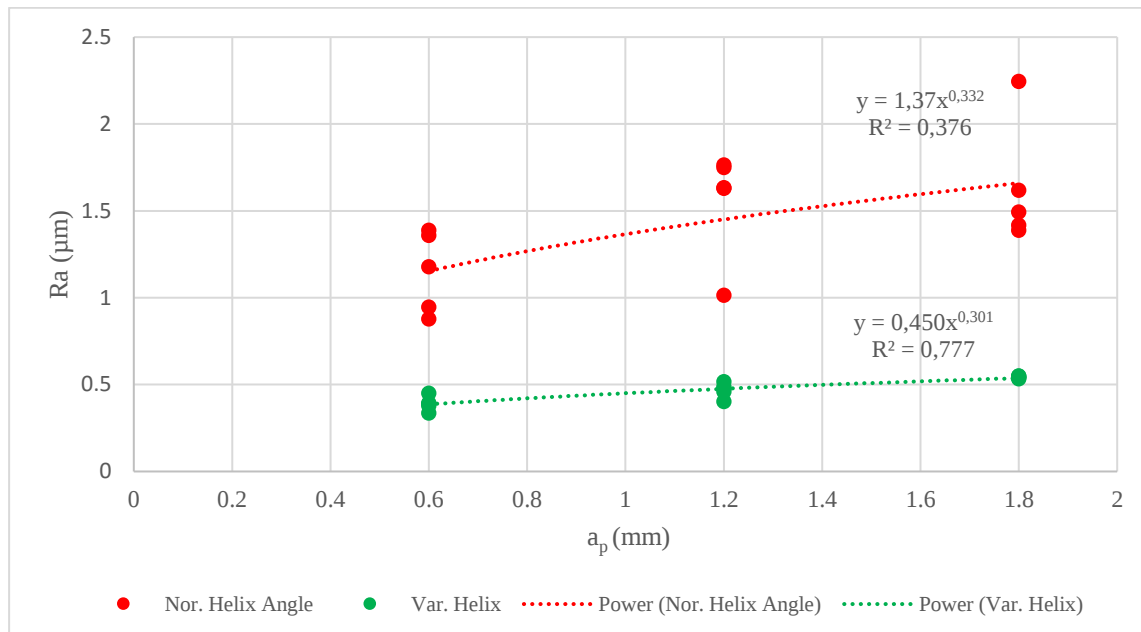
Anova Regresi Variabel *Helix Angle*

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F _{hitung}	F _{tabel}	R ²
Regresi	0,0528	1	0,0528	45,3	4,67	0,777
Galat	0,0151	13	0,00116			
Total	0,0679	14	0,00485			

Hasil anova didapat $F_{(hitung)}$ yang lebih besar dari $F_{(tabel)}$. Hal tersebut menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness* (Ra). Nilai R^2 menyatakan kesesuaian model persamaan linear *axial depth of cut* 0,6 mm – 1,8 mm terhadap *surface roughness* (Ra) pada pahat variabel *helix angle* sebesar 77,7%.

4.4 Grafik dan Pembahasan

4.4.1 Grafik dan Pembahasan Pengaruh Variabel *Helix Angle* dan *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness* (Ra)



Gambar 4.1 Grafik hasil analisis regresi pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* terhadap *surface roughness* (Ra)

Gambar 4.1 memperlihatkan hasil regresi hubungan variabel bebas *axial depth of cut* pada pemakanan menggunakan pahat variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. Pada sumbu X terdapat parameter *axial depth of cut* dengan satuan mm dan pada sumbu Y terdapat parameter *surface roughness* (Ra) dengan satuan μm . Titik berwarna merah dan garis titik berwarna merah menunjukkan data aktual sampel hasil pemakanan menggunakan normal *helix angle* dan garis persamaan non linear hasil regresi. Titik berwarna hijau dan garis titik berwarna hijau menunjukkan hasil aktual sampel pemakanan menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* dan garis persamaan non linear hasil regresi.

Pada grafik didapat informasi bahwa permesinan menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* menghasilkan produk dengan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan permesinan menggunakan pahat dengan normal *helix angle*. Meningkatnya *axial depth of cut* meningkatkan nilai *surface roughness* (Ra). Pahat dengan normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm; 1,2mm; 1,8 mm, menghasilkan rata-rata *surface roughness* 1,150 μm ; 1,558 μm ; 1,632 μm . Pahat dengan variabel *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm; 1,2mm; 1,8 mm, menghasilkan rata-rata *surface roughness* 0,390 μm ; 0,469 μm ; 0,543 μm .

Pahat dengan variabel *helix angle* menyebabkan *pitch angle* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan (persamaan (2-10)), menyebabkan perbedaan *tooth passing frequency* pada setiap mata pahat bersebelahan (persamaan (2-12) dan (2-13)), sehingga pahat variabel *helix angle* dapat mencegah terjadinya resonansi (persamaan (2-6) dan (2-8)). Proses permesinan yang terhindar dari resonansi, menyebabkan amplitudo *displacement* getaran yang lebih rendah pada saat proses pemakanan sehingga menghasilkan produk dengan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah.

Nilai *axial depth of cut* yang semakin tinggi meningkatkan *cutting force* (persamaan (2-4)). Nilai *cutting force* yang semakin tinggi meningkatkan amplitudo *displacement* getaran. *Displacement* getaran meninggalkan bekas pada permukaan benda kerja saat permesinan, sehingga pada amplitudo *displacement* yang lebih tinggi didapat *surface roughness* (Ra) yang lebih tinggi.

Pada pahat variabel *helix angle*, koefisien determinasi sebesar 77,7% menunjukkan kesesuaian persamaan non linear hasil regresi yang tinggi. Keadaan berbeda terdapat pada pahat normal *helix angle*, dimana koefisien determinasi hanya sebesar 37,6%. Hal tersebut dikarenakan terdapat korelasi yang rendah antara *axial depth of cut* dan *surface roughness* (Ra) pada keadaan resonansi, yaitu sebesar 61,3%. Korelasi yang rendah mengindikasikan bahwa keadaan resonansi pada pahat normal *helix angle*, terdapat variabel lain yang tidak dapat dikontrol saat penelitian dan berpengaruh pada *surface roughness* (Ra). Salah satu variabel yang tidak dapat dikontrol dan berpengaruh secara signifikan pada keadaan resonansi adalah frekuensi aktual yang terjadi saat permesinan, dimana frekuensi pada aktual permesinan tidak dapat dikontrol untuk bernilai tetap dan konstan. Pembahasan lebih lanjut pengaruh variabel *helix angle* dibandingkan dengan normal *helix angle* dengan dasaran grafik data aktual berupa grafik *surface roughness* (Ra), amplitudo *displacement*, dan spektrum frekuensi pada salah satu sampel di setiap level *axial depth of cut* yang didapat dari pengukuran pada penelitian dibahas pada subbab selanjutnya.

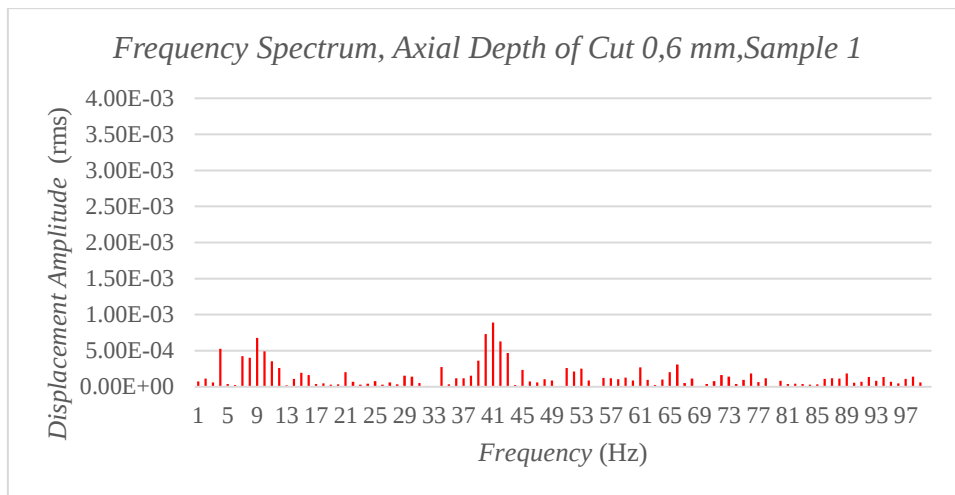
4.4.2 Grafik dan Pembahasan *Surface Roughness* (Ra), Amplitudo *Displacement*, dan Spektrum Frekuensi pada *End Milling* Menggunakan Variabel *Helix Angle* dan Normal *Helix Angle*

Pada subbab ini ditampilkan dan dibahas grafik untuk memperkuat pembahasan pada subbab sebelumnya. Pada setiap level *axial depth of cut* dan penggunaan jenis pahat berbeda ditampilkan satu sampel untuk mempermudah pembahasan, dimana masing-masing sampel tersebut terdapat tiga jenis grafik, yaitu grafik *surface roughness* (Ra), grafik amplitudo

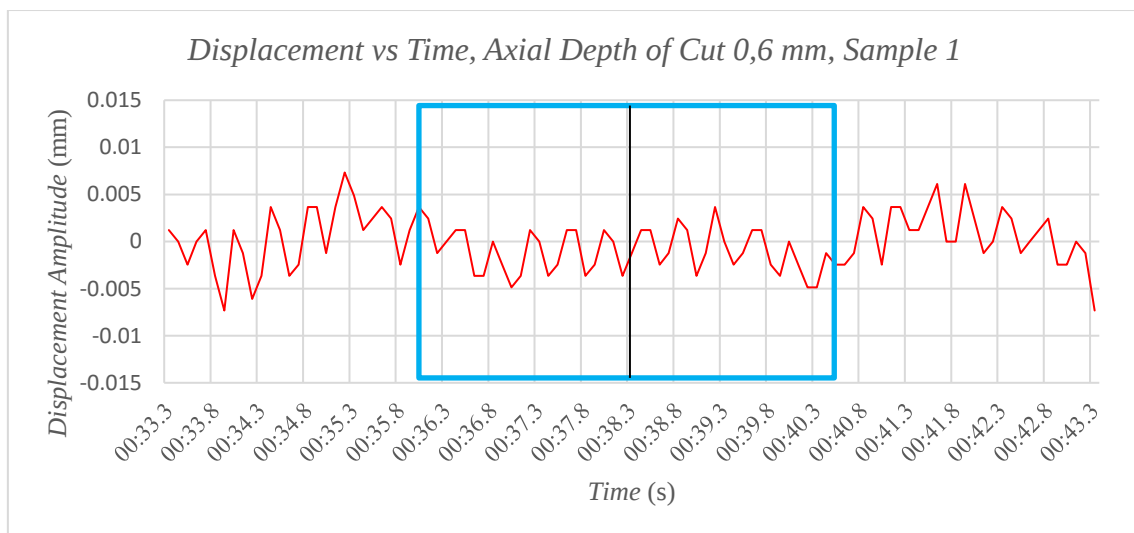
displacement, dan grafik spektrum frekuensi. Grafik *surface roughness* (Ra) (Gambar 4.4, 4.7, 4.10, 4.13, 4.16, 4.19) menunjukkan profil permukaan produk permesinan yang dihasilkan dari pengukuran *surface roughness tester*.

Grafik amplitudo *displacement* pada Gambar 4.3, 4.6, 4.9 4.12, 4.15, 4.18 menunjukkan *displacement* yang diterima sensor *vibration meter* yang kemudian diproses *software* LabView 2013. *Vibration meter* membaca data amplitudo *displacement* pada *spindle* mesin yang dipengaruhi oleh *displacement* pahat. Sumbu X menunjukkan parameter waktu dengan satuan detik atau sekon (s) dan sumbu Y menunjukkan parameter amplitudo *displacement* dengan satuan mm. Grafik berwarna merah merupakan permesinan dengan normal *helix angle*, sedangkan grafik berwarna hijau merupakan permesinan dengan variabel *helix angle*. Persegi panjang dengan garis keliling berwarna biru muda merupakan rentang pengukuran *surface roughness*. Garis vertikal berwarna hitam merupakan waktu pengukuran spektrum frekuensi.

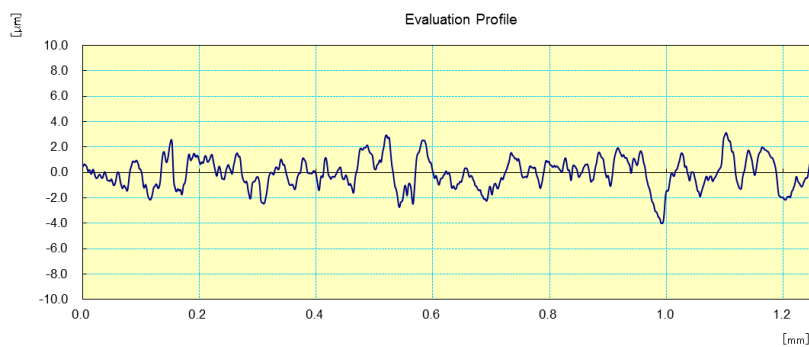
Grafik spektrum frekuensi pada Gambar 4.2, 4.5, 4.8, 4.11, 4.14, 4.17 merupakan hasil proses FFT pada *software* LabView 2013. Sumbu X pada grafik menunjukkan persebaran frekuensi dengan satuan Hz. Sumbu Y pada grafik menunjukkan nilai rms (*root mean square*) amplitudo *displacement*. Setelah enam grafik dengan nomor sampel dan *axial depth of cut* yang sama namun dengan jenis pahat berbeda ditampilkan, dilakukan pembahasan terhadap pengaruh pahat variabel *helix angle* dibandingkan normal *helix angle*. Di akhir pembahasan terdapat tabel yang berisi informasi rentang waktu pengambilan data, nilai rms amplitudo *displacement*, dan *surface roughness* (Ra) seluruh lima sampel dari masing-masing jenis pahat.



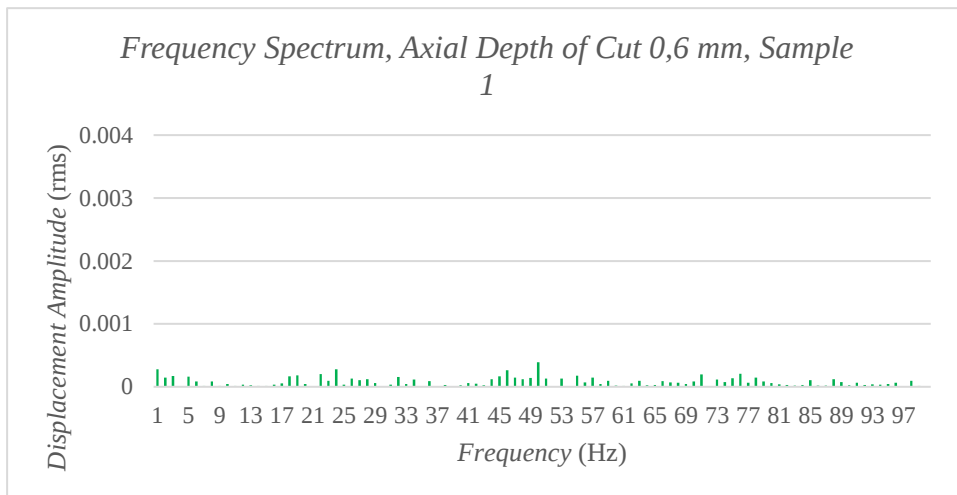
Gambar 4.2 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



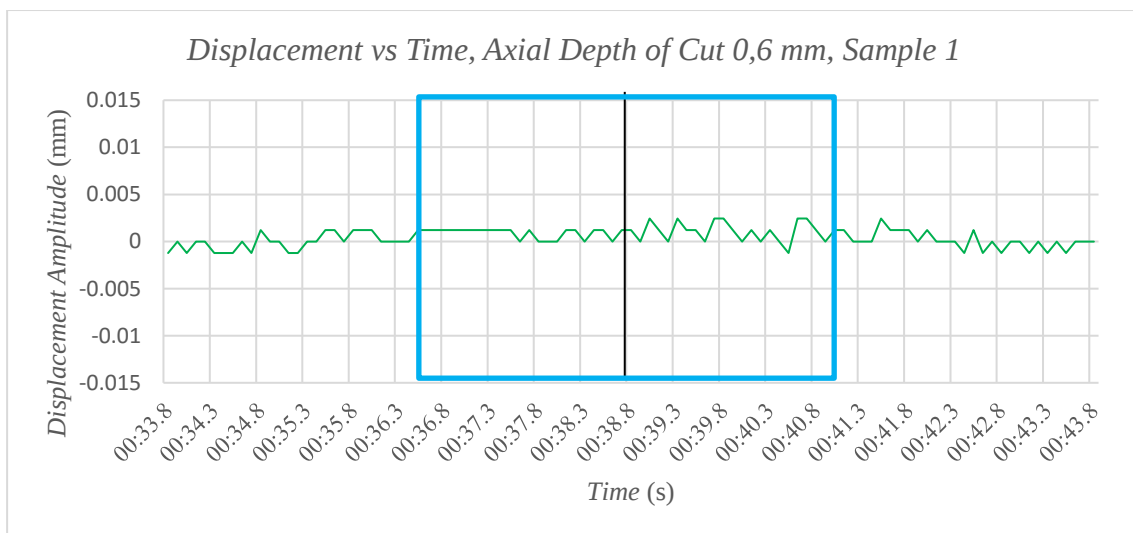
Gambar 4.3 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



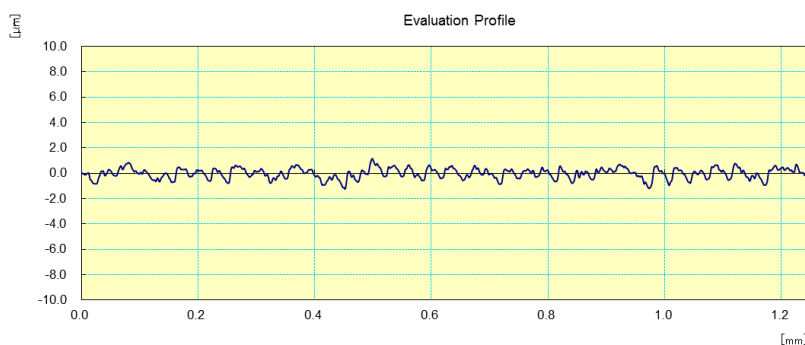
Gambar 4.4 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.5 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.6 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.7 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.4) dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo displacement yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu terdapat pada rentang 40-42 Hz. Frekuensi di sekitar 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo displacement yang cukup tinggi dikarenakan terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi di setiap mata pahat pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 pada gambar 4.4. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo displacement yang tinggi, yaitu pada frekuensi 40-42 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo displacement pada *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.6. Pengambilan data amplitudo displacement *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 diambil pada rentang waktu 00:33,3 – 00:43,3, memiliki nilai rms sebesar 0,00292 mm. Amplitudo displacement yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 0,946 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 pada Gambar 4.7 menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo displacement yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensi. Gambar 4.6 menunjukkan grafik amplitudo displacement pada *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 yang diambil pada rentang waktu 00:33,8 – 00:43,8 memiliki nilai rms amplitudo displacement yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu 0,00109 mm. Amplitudo displacement yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,337 μm , mengalami reduksi sebesar 64,38%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

Tabel 4.9

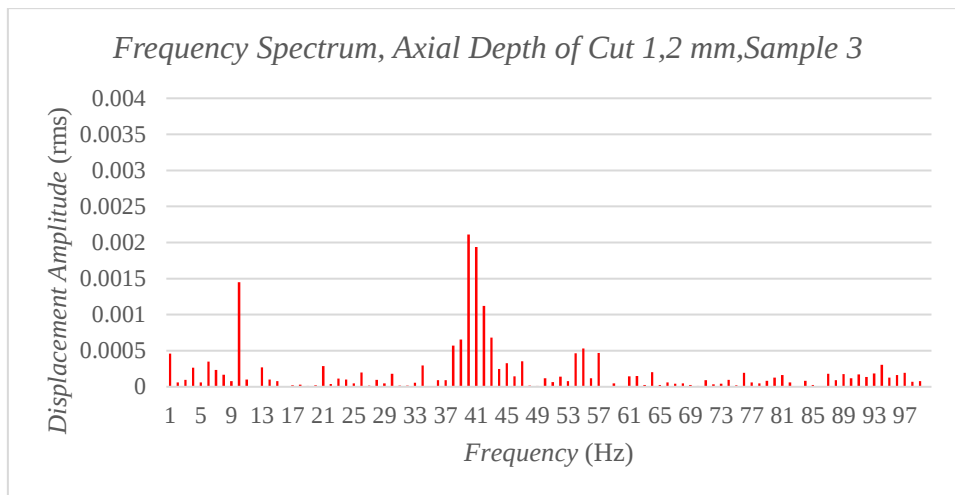
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, Axial Depth of Cut 0,6 mm, Sampel 1-5

Normal <i>Helix Angle</i> Axial Depth of Cut 0,6 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:33,3 – 00:43,3	0,00292 mm	0,946 μm
Sampel 2	01:01,4 – 01:01,4	0,00323 mm	1,36 μm
Sampel 3	01:31,8 – 01:41,8	0,00286 mm	0,878 μm
Sampel 4	01:54,8 – 02:04,8	0,00300 mm	1,179 μm
Sampel 5	02:19,9 – 02:29,9	0,00314 mm	1,389 μm
Rata-rata		0,00303 mm	1,150 μm

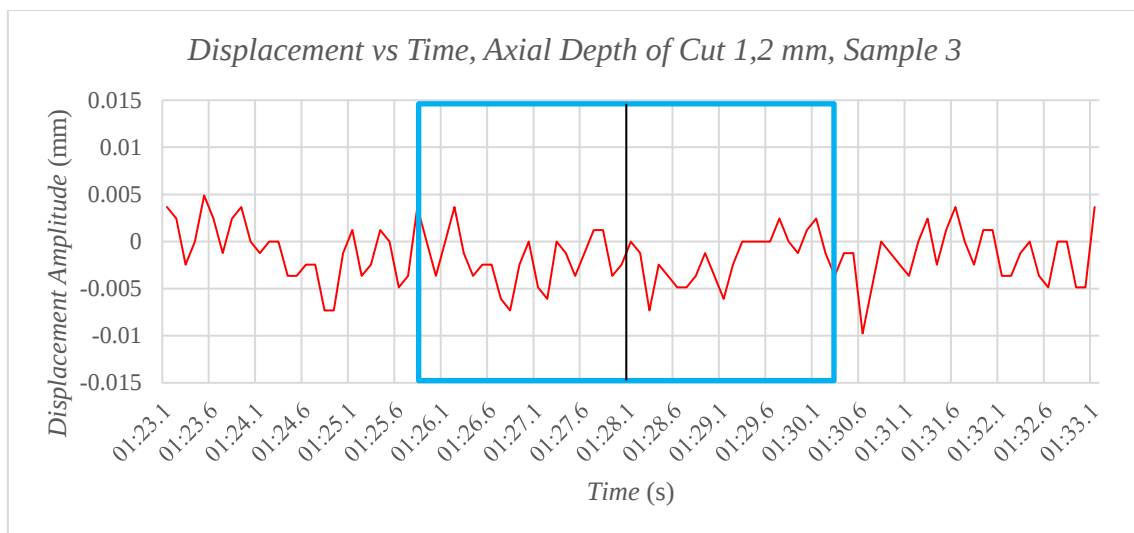
Tabel 4.10

Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, Axial Depth of Cut 0,6 mm, Sampel 1-5

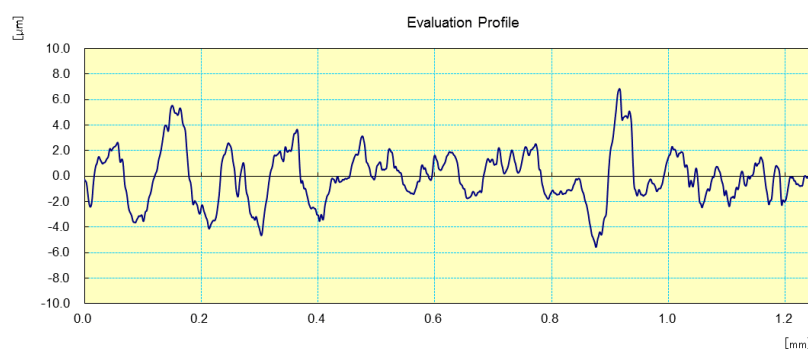
Variabel <i>Helix Angle</i> Axial Depth of Cut 0,6 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:33,8 – 00:43,8	0,00109 mm	0,337 μm
Sampel 2	00:59,2 – 01:09,2	0,00132 mm	0,390 μm
Sampel 3	01:26,1 – 01:36,1	0,00137 mm	0,394 μm
Sampel 4	01:52,5 – 02:02,5	0,00116 mm	0,379 μm
Sampel 5	02:19,0 – 02:29,0	0,00149 mm	0,451 μm
Rata-rata		0,00129 mm	0,390 μm



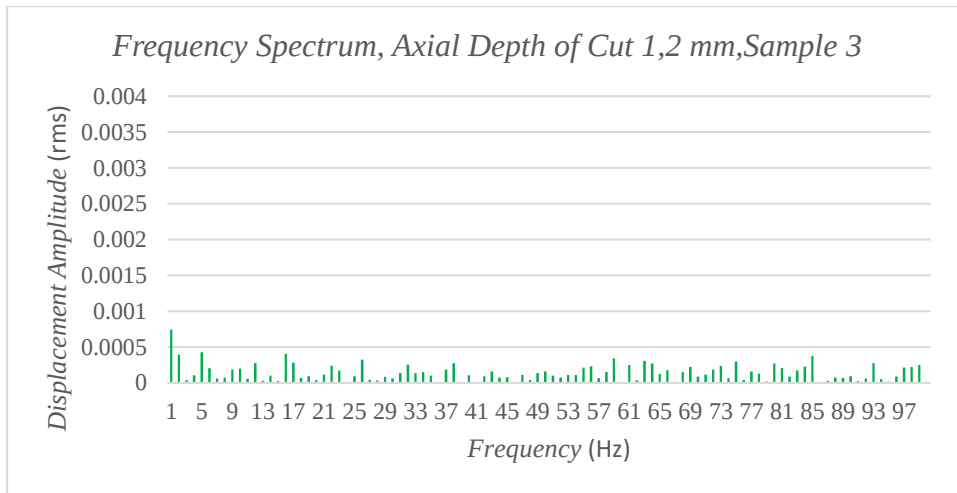
Gambar 4.8 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



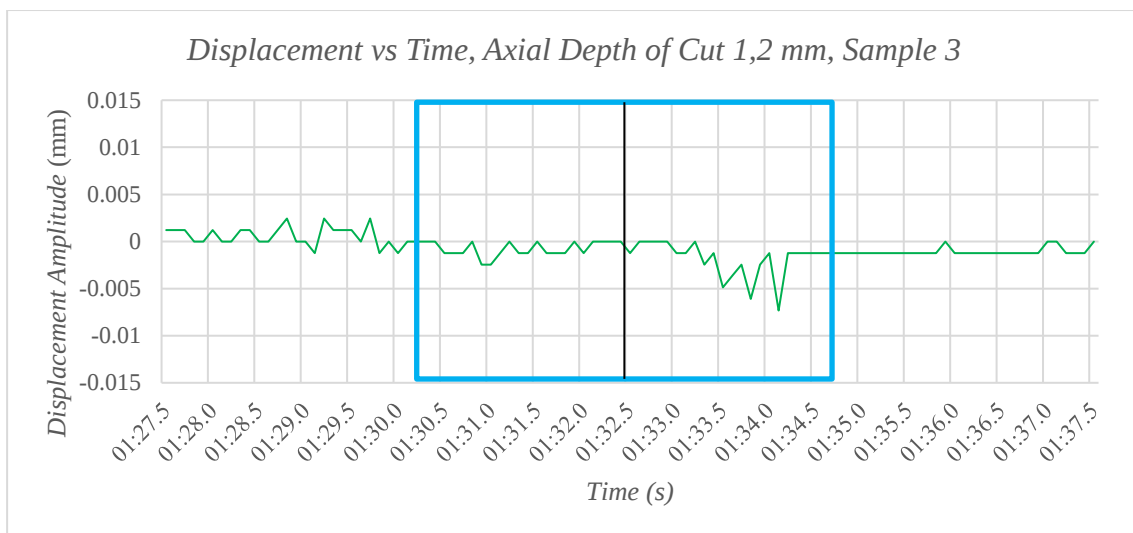
Gambar 4.9 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



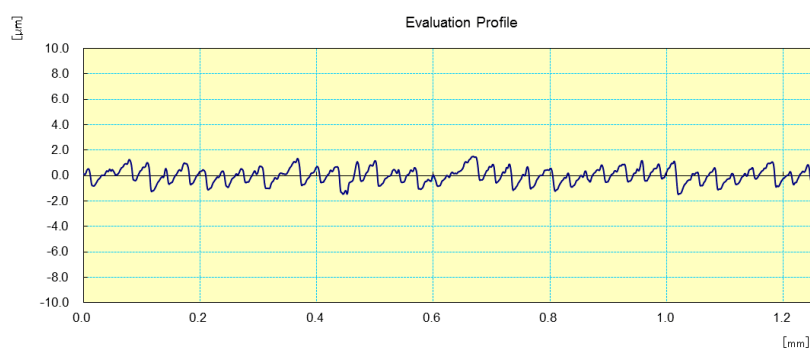
Gambar 4.10 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.11 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.12 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.13 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.10), dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu terdapat pada rentang frekuensi 40-41 Hz. Frekuensi pada 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang cukup tinggi disebabkan terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan setiap mata pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 pada gambar 4.10. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang tinggi, yaitu pada rentang frekuensi 40-41 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.9. Pengambilan data amplitudo *displacement axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 diambil pada rentang waktu 01:23,1 – 01:33,1, memiliki nilai rms sebesar 0,00327 mm. Amplitudo *displacement* yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 1,631 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 (gambar 4.13) menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensinya. Gambar 4.12 menunjukkan grafik amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 yang diambil pada rentang waktu 01:27,5 – 01:37,5 memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih rendah dari pahat *normal helix angle*, yaitu 0,00161 mm. Amplitudo *displacement* yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,477 μm , mengalami reduksi sebesar 70,75%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

Tabel 4.11

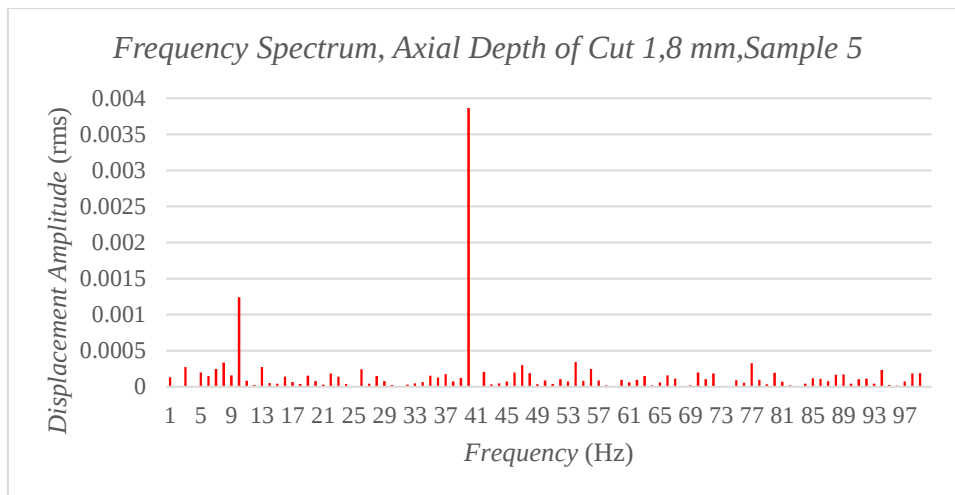
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,2 mm, Sampel 1-5

Normal <i>Helix Angle Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:31,0 – 00:40,0	0,00341 mm	1,75 μm
Sampel 2	00:56,1 – 01:06,1	0,00333 mm	1,633 μm
Sampel 3	01:23,1 – 01:33,1	0,00327 mm	1,631 μm
Sampel 4	01:47,1 – 01:57,1	0,00356 mm	1,764 μm
Sampel 5	02:13,2 – 02:23,2	0,00308 mm	1,014 μm
Rata-rata		0,00333 mm	1,558 μm

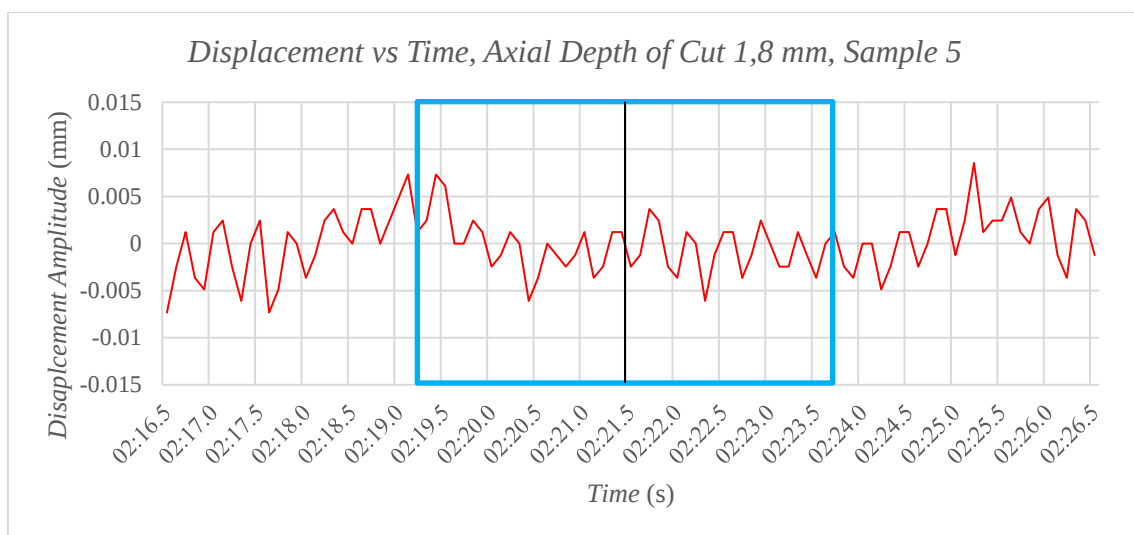
Tabel 4.12

Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,2 mm, Sampel 1-5

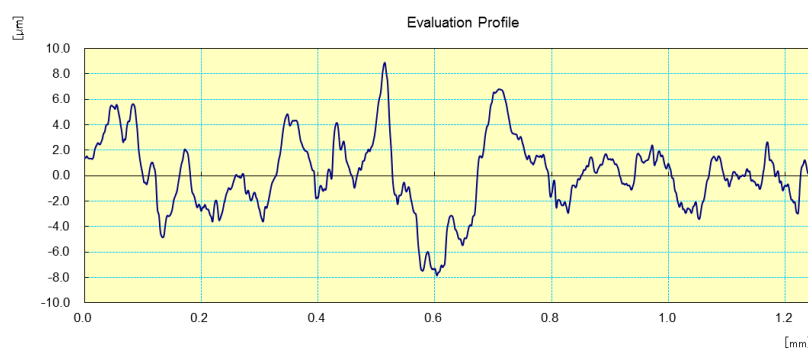
Variabel <i>Helix Angle Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:34,5 – 00:44,5	0,00179 mm	0,518 μm
Sampel 2	00:59,7 – 01:09,7	0,00168 mm	0,487 μm
Sampel 3	01:27,5 – 01:37,5	0,00161 mm	0,477 μm
Sampel 4	01:53,8 – 02:03,8	0,00153 mm	0,461 μm
Sampel 5	02:18,3 – 02:28,3	0,00136 mm	0,404 μm
Rata-rata		0,00159 mm	0,469 μm



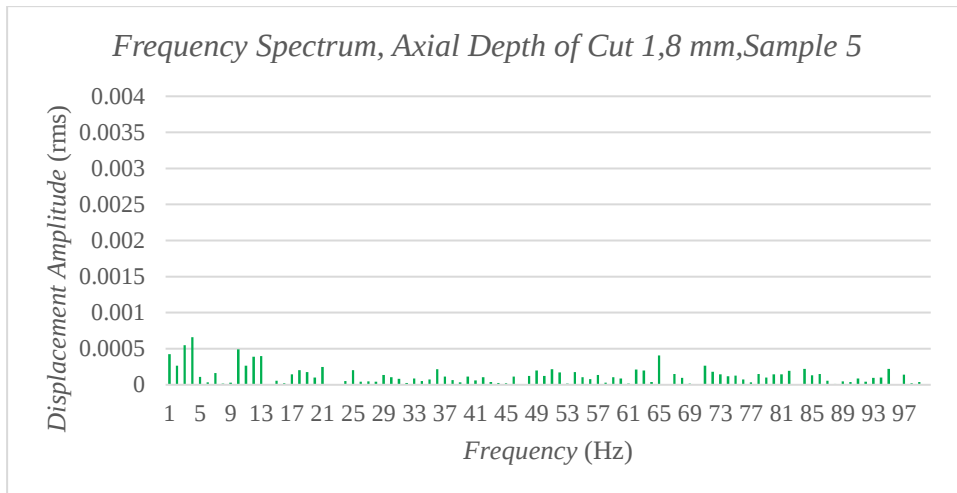
Gambar 4.14 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



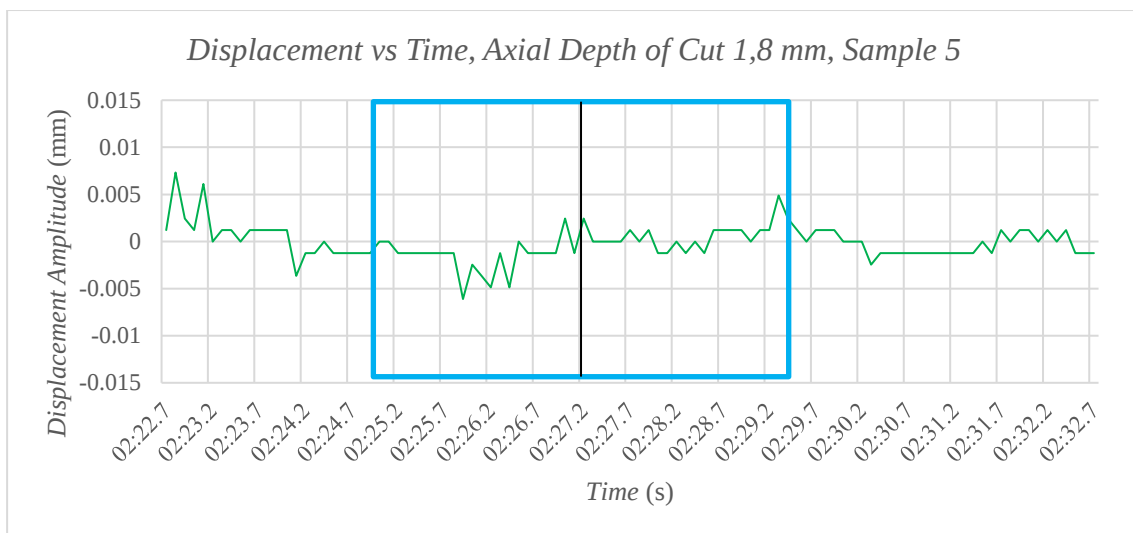
Gambar 4.15 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



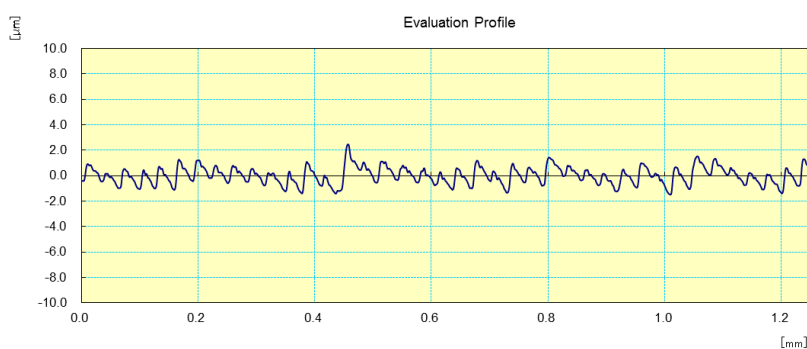
Gambar 4.16 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.17 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.18 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.19 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.16), dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu pada frekuensi 40 Hz. Frekuensi pada 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang cukup tinggi terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan setiap mata pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 pada gambar 4.16. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang tinggi, yaitu pada frekuensi 40 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.15. Pengambilan data amplitudo *displacement axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 diambil pada rentang waktu 02:16,5 – 02:26,5, memiliki nilai rms sebesar 0,00363 mm. Amplitudo *displacement* yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 2,245 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 (gambar 4.19) menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensinya. Gambar 4.18 menunjukkan grafik amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 yang diambil pada rentang waktu 02:22,7 – 02:32,7 memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu 0,00189 mm. Amplitudo *displacement* yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,543 μm , mengalami reduksi sebesar 75,8%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

Tabel 4.13

Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,8 mm, Sampel 1-5

Normal <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm			
	Selang Waktu (menit: detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface</i> <i>Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:31,9 – 00:41,9	0,00328 mm	1,493 μm
Sampel 2	00:55,7 – 01:05,7	0,00333 mm	1,619 μm
Sampel 3	01:23,1 – 01:33,1	0,00320 mm	1,419 μm
Sampel 4	01:49,1 – 01:59,1	0,00312 mm	1,388 μm
Sampel 5	02:16,5 – 02:26,5	0,00363 mm	2,245 μm
Rata-rata		0,00331 mm	1,633 μm

Tabel 4.14

Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,8 mm, Sampel 1-5

Variabel <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface</i> <i>Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:35,3 – 00:45,3	0,00192 mm	0,549 μm
Sampel 2	01:01,6 – 01:11,6	0,00197 mm	0,550 μm
Sampel 3	01:29,8 – 01:39,8	0,00190 mm	0,544 μm
Sampel 4	01:57,0 – 02:07,0	0,00180 mm	0,533 μm
Sampel 5	02:22,7 – 02:32,7	0,00189 mm	0,540 μm
Rata-rata		0,00190 mm	0,543 μm