

BAB 4

PEMBAHASAN DAN ANALISA DATA HASIL PERCOBAAN

4.1 Data Hasil Percobaan

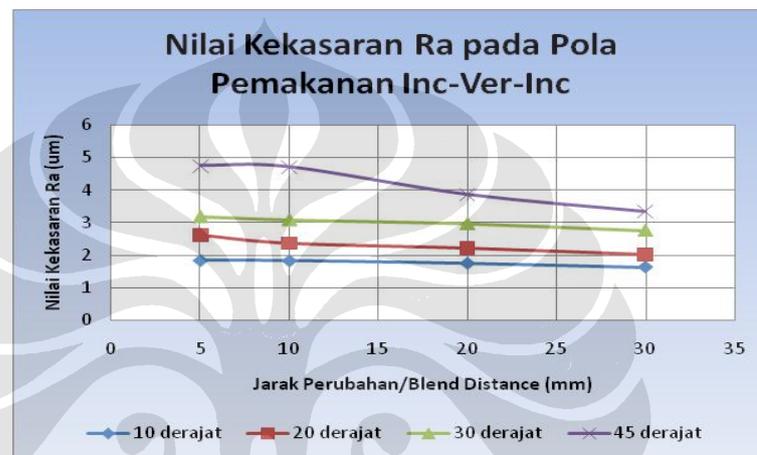
Pada bab ini akan dibahas secara sistematis parameter-parameter yang ditentukan sehingga menghasilkan data dari proses percobaan yang dapat di analisa dan akhirnya menghasilkan suatu kesimpulan yang dapat dijadikan salah satu referensi dalam percobaan lebih lanjut. Dari proses pemesinan dan pengukuran didapatkan nilai Ra dan Wa sebagai berikut.

Tabel 4.1. Data Hasil Percobaan

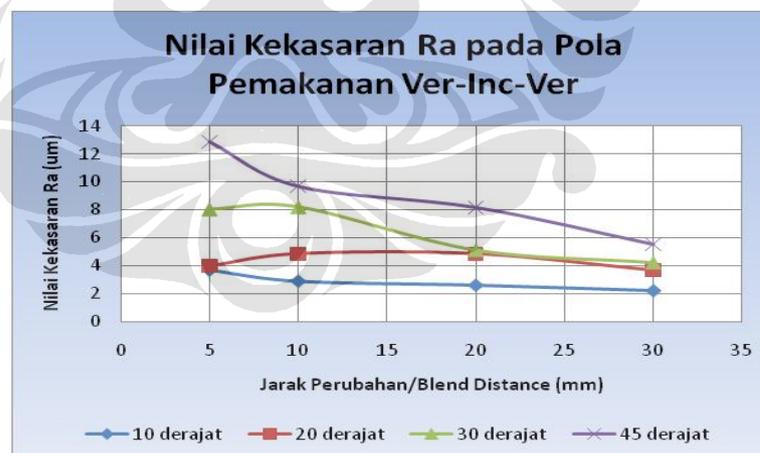
No.	Pola Pemakanan	Pergerakan Sudut ($^{\circ}$)	Jarak Perubahan Sudut (mm)	Hasil	
				Ra (μm)	Wa (μm)
1	Inklinasi – vertikal – inklinasi (INC-VER- INC)	10 – 0 – 10	30	1.637	0.450
2			20	1.753	0.481
3			10	1.831	0.572
4			5	1.842	0.432
5		20 – 0 – 20	30	2.026	0.720
6			20	2.223	0.814
7			10	2.373	1.052
8			5	2.62	0.797
9		30 – 0 – 30	30	2.761	0.745
10			20	2.972	0.967
11			10	3.09	1.372
12			5	3.186	0.827
13		45 – 0 – 45	30	3.344	1.117
14			20	3.866	1.707
15			10	4.705	1.869
16			5	4.75	1.811
17	vertikal – inklinasi – vertikal (VER-INC- VER)	0 – 10 – 0	30	2.190	0.477
18			20	2.579	0.596
19			10	2.864	0.822
20			5	3.661	1.391
21		0 – 20 – 0	30	3.676	1.382
22			20	4.859	2.236
23			10	4.856	1.909
24			5	3.988	1.522
25		0 – 30 – 0	30	4.234	1.402
26			20	5.124	1.921
27			10	8.197	4.018
28			5	8.039	3.852
29		0 – 45 – 0	30	5.536	1.821
30			20	8.170	3.369
31			10	9.676	4.012
32			5	12.859	6.275
33		Blend 20	10-0-10	20	2.071
34	20-0-20		2.956		1.059

35		30-0-30		4.372	1.923
36		45-0-45		5.540	2.149
37		V0-10-0		2.362	0.685
38		V0-20-0		3.366	1.130
39		V0-30-0		4.691	2.076
40		V0-45-0		5.563	2.159

Jika data-data hasil pengukuran tersebut diplot pada grafik sesuai dengan pola pemakanannya masing-masing, maka akan didapatkan grafik seperti di bawah ini.



(a)

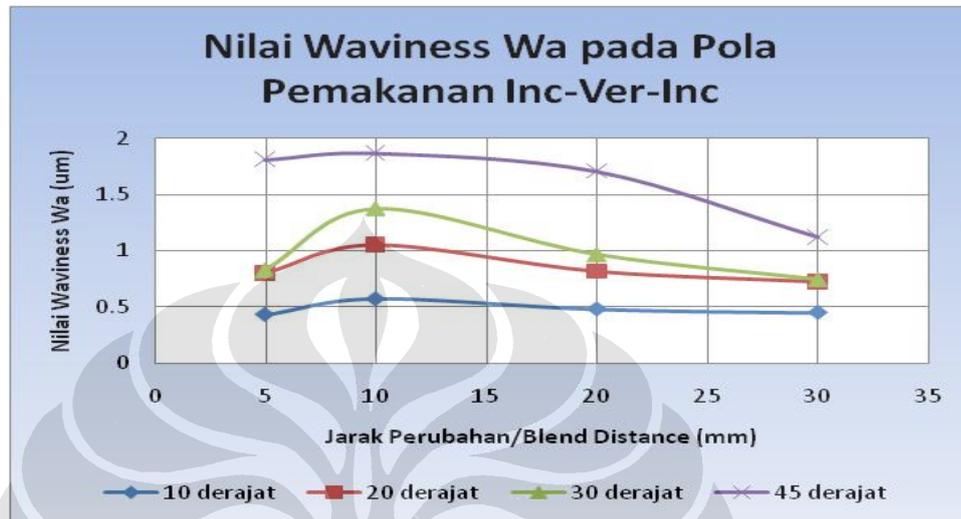


(b)

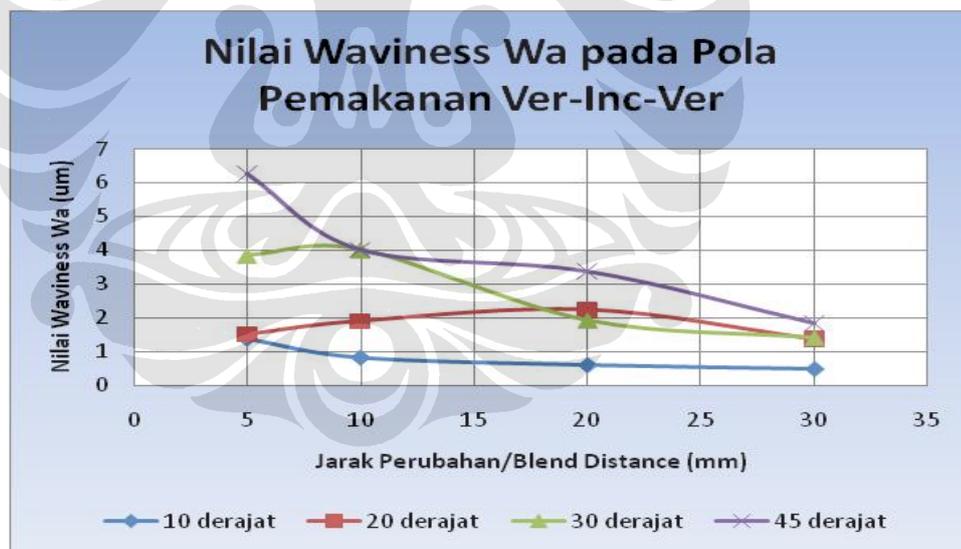
Gambar 4.1. Grafik Roughness Untuk Laju Pemakanan Gradual, a) Pola Pemakanan Inklinasi-Vertikal-Inklinasi, b) Pola Pemakanan Vertikal-Inklinasi-Vertikal

Dari grafik *roughness* di atas dapat dibuat analisis umum tentang kecenderungan yang terjadi. Terlihat pada grafik bahwa semakin besar perubahan

sudut inklinasi maka semakin besar nilai Ra. Dan jika dilihat pada jarak perubahan sudut (*Blend Distance*) maka semakin sempit (pendek) jarak untuk melakukan perubahan maka Ra juga meningkat. Kemudian untuk data *Waviness Wa* grafiknya adalah sebagai berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.2. Grafik Waviness Untuk Laju Pemakanan Gradual, a) Pola Pemakanan Inklinasi-Vertikal-Inklinasi, b) Pola Pemakanan Vertikal-Inklinasi-Vertikal

Kecenderungan yang sama terjadi juga pada grafik *waviness*, grafik *waviness* di atas menunjukkan hubungan bahwa semakin besar perubahan sudut

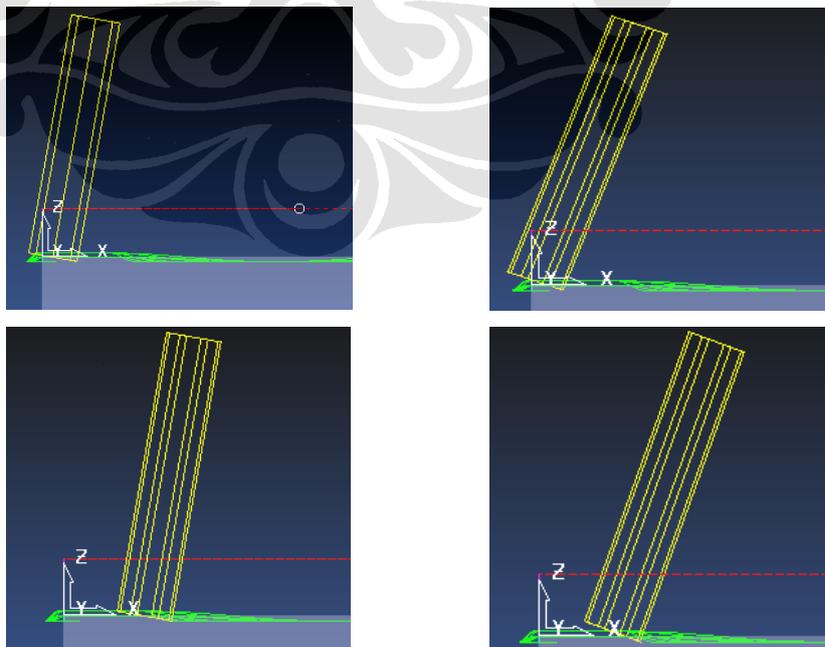
inklinasi maka semakin besar nilai W_a , dan jika dilihat pada jarak perubahan sudut, maka semakin sempit (pendek) jarak untuk melakukan perubahan maka W_a juga meningkat.

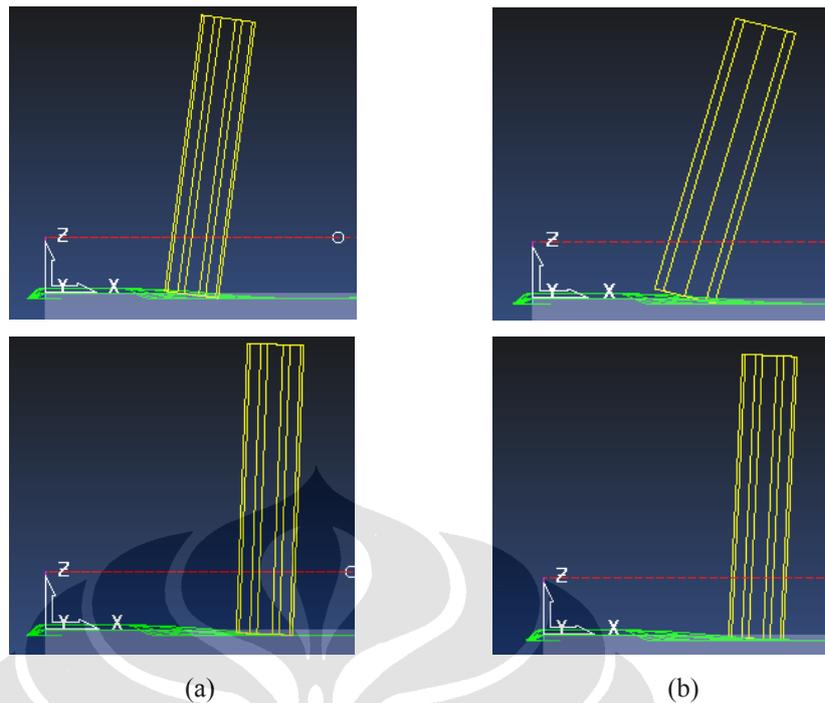
4.2 Analisis Data Hasil Percobaan

4.2.1 Pengaruh Pola Pergerakan Tool terhadap Data Hasil Percobaan

Grafik yang dihasilkan diatas menunjukkan pesebaran data hubungan nilai R_a dan W_a terhadap sudut dan juga jarak perubahan sudut. Hasilnya adalah semakin besar nilai perubahan sudut (misal dari 0° ke 45°) maka nilai R_a dan W_a akan cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan perubahan sudut yang lebih kecil (misal 0° ke 10°) dengan jarak perubahan sudut yang sama. Begitu juga dengan jarak perubahan sudutnya, jika semakin pendek maka akan semakin nilai R_a dan W_a akan cenderung lebih besar.

Data ini terjadi karena semakin cepatnya *tool* untuk bergerak melakukan perubahan sudut. Jika dengan jarak yang sama dan perubahan sudut berbeda, maka perubahan sudut yang lebih besar akan melakukan pergerakan inklinasi yang lebih cepat. Ilustrasi tentang pergerakan tool dapat dilihat pada gambar di bawah ini.





Gambar 4.3. Ilustrasi Pemodelan dengan CAM, simulasi pergerakan tool (a) 10° dan (b) 20°

Jika dihitung dari CLSF yang didapatkan dari proses *post processor* pada tahap pemesinan, maka dapat diketahui laju perubahan sudut pada tiap *path* yang dihasilkan.

Untuk toolpath 1 (sudut inklinasi 10° dan Blend Distance 30 mm)

$$\begin{aligned} \text{actual blend distance} &= 46,476 - 17,269 = 29,207 \text{ mm} \\ \text{laju perubahan sudut inklinasi} &= \frac{10^{\circ}}{29,207 \text{ mm}} = 0,342 \text{ deg/mm} \end{aligned}$$

Blend distance aktual perlu dihitung sebab pada program yang dibuat dengan blend distance yang ditentukan pasti pada saat dilakukan proses pemesinan nilai ini berubah sesuai dengan kontrol pada mesin yang digunakan. Nilai ini dapat diketahui pada CLS file dari masing-masing program yang dibuat. Nilai yang didapatkan ini sebagai acuan untuk melakukan analisa data yang dihasilkan. Untuk parameter uji lain dilakukan perhitungan yang sama seperti perhitungan diatas, maka akan dihasilkan tabel perhitungan seperti di bawah ini.

Tabel 4.2. Nilai Laju Perubahan Sudut Inklinasi Sudut 10° dan 20°

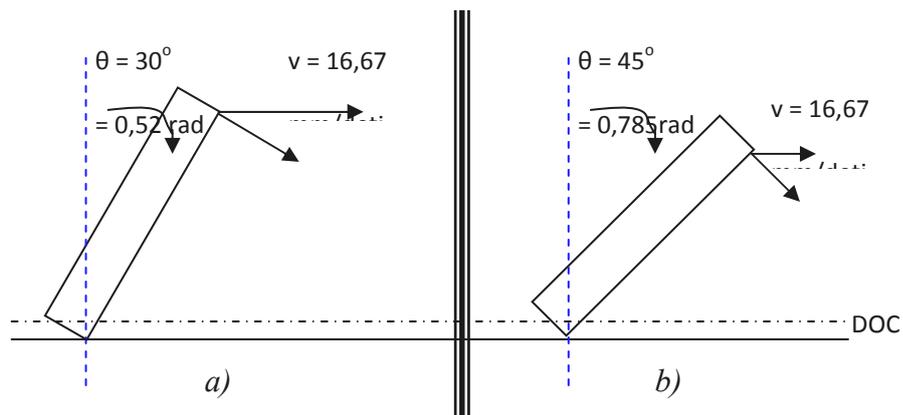
inclination	blend dist	start	end	distance	inclination change rate
deg	mm	mm	mm	mm	deg/mm
10	30	17.269	46.476	29.207	0.342383675
10	20	18.469	37.462	18.993	0.526509767
10	10	17.867	26.939	9.072	1.102292769
10	5	16.662	20.965	4.303	2.323960028
20	30	15.692	44.674	28.982	0.6900835
20	20	15.092	34.302	19.21	1.041124414
20	10	14.491	23.94	9.449	2.116626098
20	5	14.48	18.755	4.275	4.678362573

Pada tabel diatas terlihat untuk sudut yang sama, dihasilkan laju perubahan sudut yang semakin besar untuk jarak perpindahan sudut (*blend distance*) yang semakin kecil, artinya disini adalah nilai laju perubahan sudut mempengaruhi kualitas permukaan pemesinan baik nilai kekasaran maupun nilai *waviness*-nya.

4.2.2 Analisa Kekasaran Permukaan Hasil Proses Pemesinan

Dalam analisa ini akan dibandingkan dengan data percobaan sebelumnya yang sudah dilakukan (data kekasaran dengan pola pemakanan yang sama tetapi dengan feed yang konstan atau tetap selama proses pemesinan). Data tersebut kemudian menghasilkan kecenderungan yang dapat digunakan sebagai referensi pada proses pemesinan yang terkait. Pada analisa ini juga akan dibahas tentang kekasaran yang terjadi akibat pola sudut inklinasi yang berbeda.

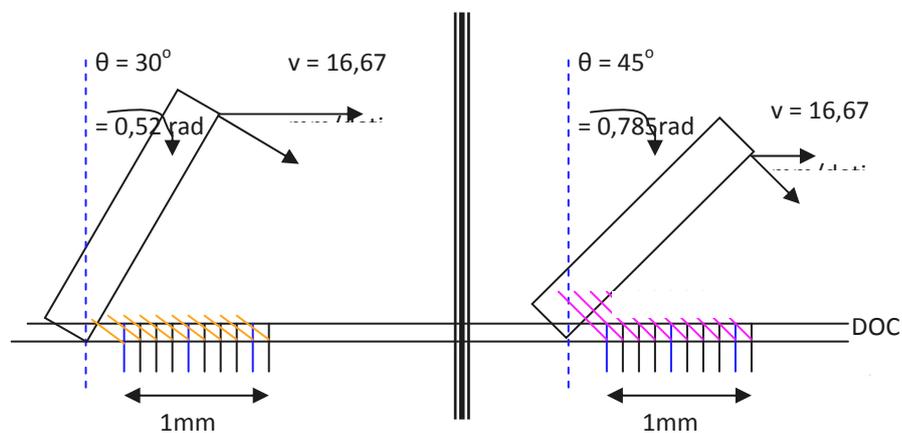
Dari analisa hasil percobaan di atas dilihat ada perbedaan kecepatan perubahan sudut untuk tiap perubahan sudut inklinasi. Kemudian bersamaan dengan perubahan sudut inklinasi tersebut terdapat pergerakan ke arah x secara konstan dan gradual. Dengan begitu maka ada 2 kecepatan yang mempengaruhi perubahan sudut inklinasi yaitu; v dan $v\theta$. Kecepatan ini kemudian dihitung laju perubahan pada setiap titik yang ditentukan dengan feed konstan dan gradual, maka akan diketahui hubungan antara kecepatan sudut ini terhadap kekasaran yang dihasilkan juga kecenderungan yang terjadi akibat laju perubahan sudut ini.



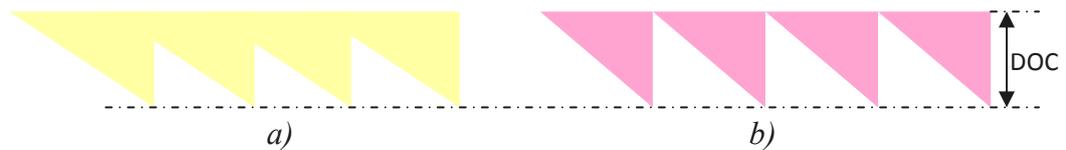
Gambar 4.4. Ilustrasi Perubahan Sudut pada Tool, a). pada perubahan 0° ke 30° , b) pada perubahan 0° ke 45°

Dari ilustrasi Gambar 4.4. diketahui bahwa semakin miring *tool* melakukan pemakanan maka area material yang terambil semakin kecil. Dengan begitu maka kekasaran pada permukaan dengan sudut inklinasi yang semakin tinggi akan meningkat. Ini berkaitan dengan kekasaran natural yang terjadi akibat laju pemakanan dan juga kecepatan putar pahat.

Dengan; kecepatan spindel (n) = 2500 rpm = 41,67 putaran/detik dan laju pemakanan (*feedrate*) = 1000 mm/menit. Maka dapat diperkirakan kekasaran natural untuk tiap panjang 1 mm adalah; $v = 16,67$ mm/detik, maka 1 mm ditempuh 0,06 detik. Dengan begitu dalam 0,06 detik *tool* berputar $\Rightarrow 41,67 \times 0,06 = 2,5$ kali. Maka untuk jumlah *flute* 4, ilustrasi dapat dilihat pada gambar 4.6 di bawah ini.



PERBESARAN PATH



Gambar 4.5. Proses Pembentukan Kekasaran Natural Untuk Sudut Inklinasi, a) 30°, b). 45°

Dari gambar di atas diketahui bahwa semakin besar (miring) sudut pemakanan yang dilakukan pahat maka kecenderungan kekasaran permukaan yang dihasilkan akan lebih kasar dibandingkan dengan sudut pemakanan yang kecil.

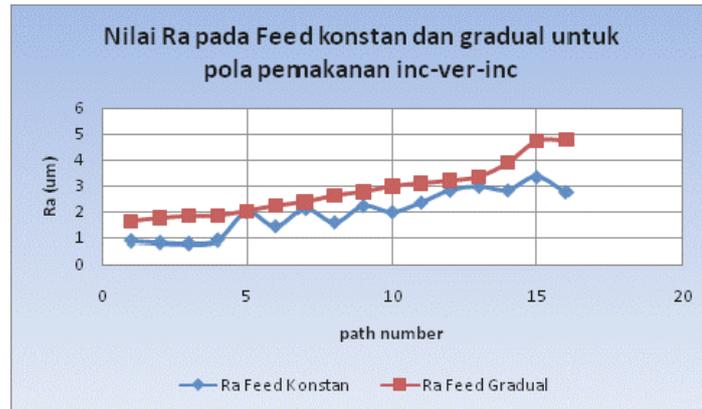
4.2.3 Analisa Hasil Kekasaran dengan Feed Konstan dan Gradual

Nilai kekasaran yang didapatkan untuk pola pemakanan dengan *feed* konstan dan gradual adalah sebagai berikut.

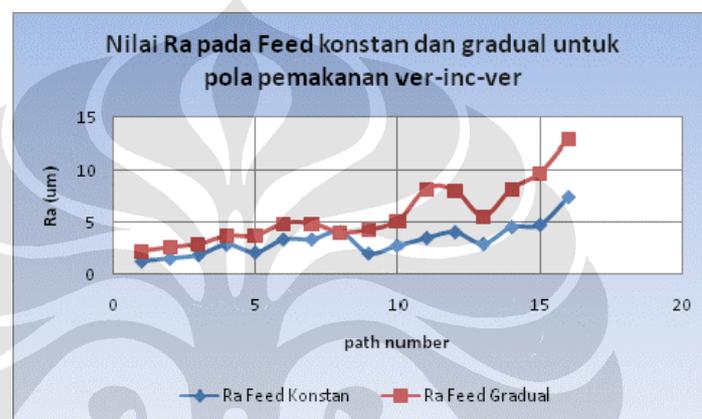
Tabel 4.3. Nilai Kekasaran pada Feed Konstan dan Gradual

No.	Pergerakan ($^{\circ}$)	Jarak Perubahan	Ra Feed=C	Ra Feed Grad.
1	10-0-10	30	0.888	1.637
2		20	0.823	1.753
3		10	0.783	1.831
4		5	0.917	1.842
5	20-0-20	30	1.982	2.026
6		20	1.429	2.223
7		10	2.098	2.373
8		5	1.58	2.62
9	30-0-30	30	2.216	2.761
10		20	1.978	2.972
11		10	2.347	3.09
12		5	2.812	3.186
13	45-0-45	30	2.965	3.344
14		20	2.821	3.866
15		10	3.337	4.705
16		5	2.747	4.75

Pada tabel 4.3. terlihat nilai kekasaran Ra pada masing-masing perlakuan feed dimana feed yang konstan memiliki kecenderungan nilai yang lebih kecil (halus) dari perlakuan dengan feed yang gradual. Jika di plot dalam grafik, hubungan ini dapat terlihat seperti gambar di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.6. Perbandingan Nilai Ra pada Perlakuan Feed Konstan dan Gradual; (a) Pola Pemakanan inc-ver-inc, dan (b) Pola Pemakanan ver-inc-ver

Nilai kekasaran yang tinggi pada perlakuan feed gradual terjadi karena beberapa hal berikut.

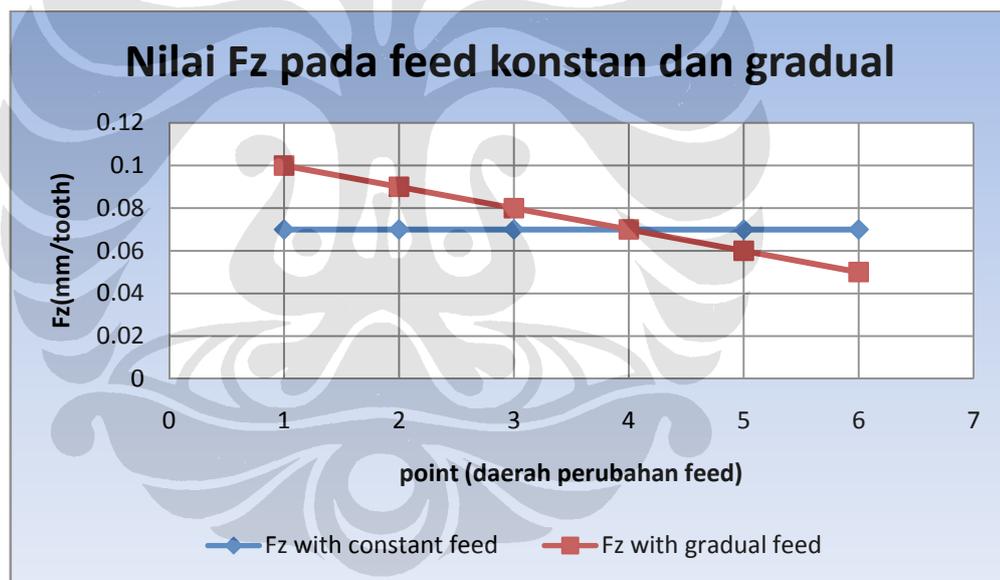
1. Pada perlakuan feed konstan digunakan feed rate 1000 mm/min dengan potensio 70% atau sekitar 100 mm/min rata-rata.
2. Pada perlakuan feed gradual daerah yang ditentukan memiliki feed gradual mengalami interpolasi yang besar. Hal ini dipenuhi oleh kontrol yang digunakan pada proses pemesinan.
3. Harga rata-rata feed per tooth lebih besar dengan feed gradual dari pada feed konstan.

Jika dihitung dengan menggunakan rumus diatas, maka nilai rata-rata feed per tooth dari perlakuan feed konstan adalah sebesar 0.07mm/min dan dengan perlakuan feed gradual adalah sebesar 0.075 mm/min. Nilai inilah yang membuat

kecenderungan nilai kekasaran permukaan benda uji lebih besar dari perlakuan dengan kondisi feed yang konstan. Tabel perhitungan dan grafiknya adalah seperti berikut.

Tabel 4.4. Nilai Feed per Tooth dengan kondisi feed konstan dan gradual

point	feed		Kondisi Pemesinan			
	konstan	gradual	spindel speed	flute	feed per tooth c	feed per tooth g
1	700	1000	2500	4	0.07	0.1
2	700	900	2500	4	0.07	0.09
3	700	800	2500	4	0.07	0.08
4	700	700	2500	4	0.07	0.07
5	700	600	2500	4	0.07	0.06
6	700	500	2500	4	0.07	0.05
				average	0.07	0.075



Gambar 4.7. Nilai Fz pada feed konstan dan gradual

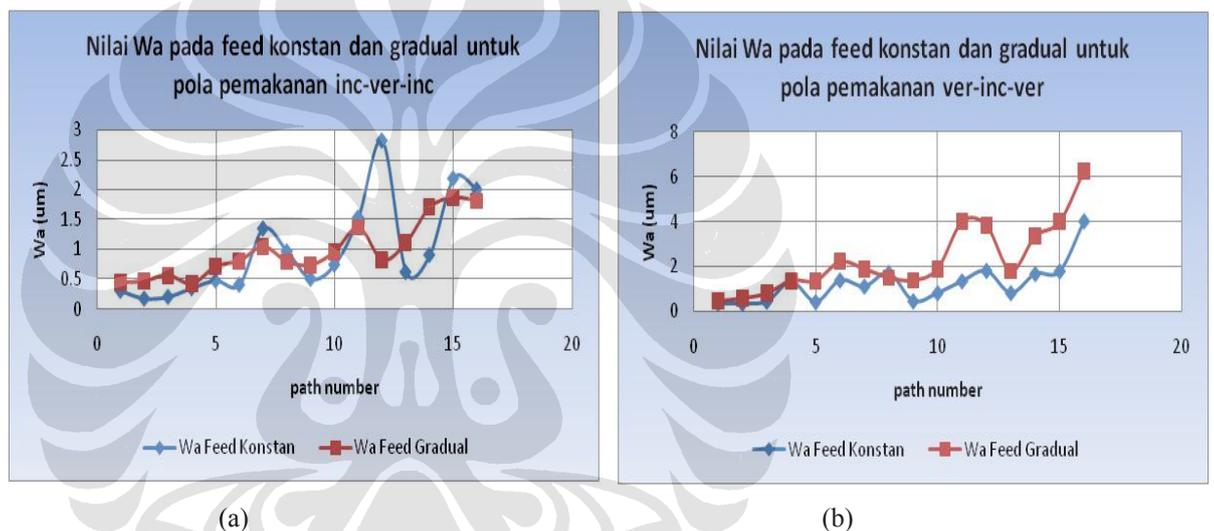
4.2.4. Analisa Gelombang (Waviness) dengan Feed Konstan dan Gradual

Nilai kekasaran yang didapatkan untuk pola pemakanan dengan *feed* konstan dan gradual adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5. Nilai Waviness pada Feed Konstan dan Gradual

No.	Pergerakan ($^{\circ}$)	Jarak Perubahan	Wa Feed=C	Wa Feed Grad.
1	10-0-10	30	0.312	0.45
2		20	0.185	0.481

3		10	0.213	0.572
4		5	0.357	0.432
5	20-0-20	30	0.483	0.72
6		20	0.415	0.814
7		10	1.35	1.052
8		5	0.969	0.797
9	30-0-30	30	0.512	0.745
10		20	0.748	0.967
11		10	1.533	1.372
12		5	2.812	0.827
13	45-0-45	30	0.626	1.117
14		20	0.91	1.707
15		10	2.182	1.869
16		5	1.999	1.811



Gambar 4.8. Perbandingan Nilai Wa pada Perlakuan Feed Konstan dan Gradual; (a) Pola Pemakanan inc-ver-inc, dan (b) Pola Pemakanan ver-inc-ver

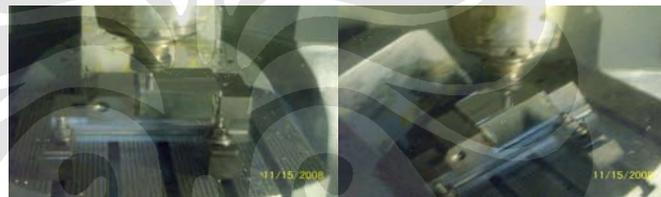
Pada Grafik Wa diatas juga dihasilkan keenderungan yang sama dengan profil kekasaran yang dihasilkan. Terlihat nilai Waviness Wa pada masing-masing perlakuan feed dimana feed yang konstan memiliki kecenderungan nilai yang lebih kecil (halus) dari perlakuan dengan feed yang gradual. Fenomena ini juga terjadi akibat hal-hal seperti yang disebutkan diatas.

4.2.5 Fenomena Dinamika Munculnya Gelombang

Dilihat dari gambar grafik hasil pengukuran diketahui bahwa distribusi kekasaran akan semakin besar bila *tool* melakukan pemakanan dengan sudut

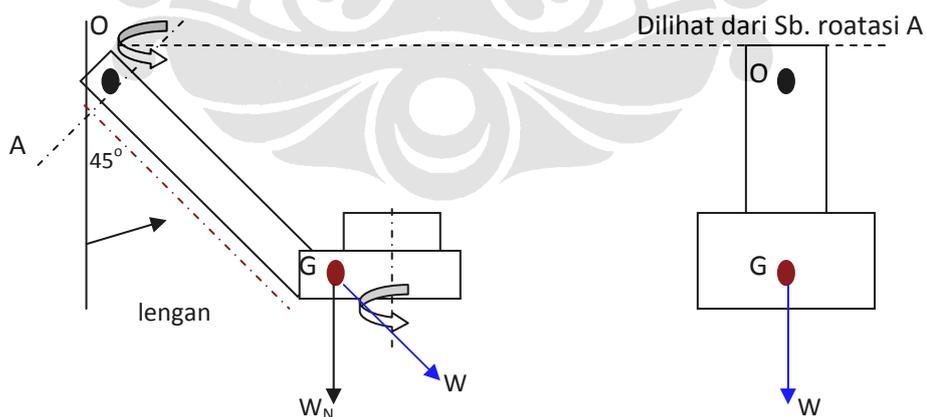
inklinasi. Hal tersebut terlihat jelas pada grafik hasil pengukuran. Sedangkan untuk gelombang (*waviness*) akan terbentuk pada saat peralihan sudut inklinasi *tool*. Besarnya *waviness* ini tergantung dari besar perubahan sudut yang terjadi dan juga jarak untuk melakukan perubahan sudut tersebut.

Semakin besar dan pendek jarak perubahan sudut maka gelombang (*waviness*) yang terbentuk akan semakin besar. Ini terjadi karena adanya efek dinamik dari mesin dalam melakukan manuver inklinasi. Saat mesin melakukan pemakanan dengan sudut yang konstan keadaan gaya – gaya yang terjadi pada mesin cenderung konstan. Tetapi pada saat mesin melakukan perubahan sudut (dalam mesin DMU 50e *bed* benda yang bergerak) maka mesin akan melakukan gerakan tertentu dan berhenti pada jarak tertentu. Proses awal dan akhir saat mesin bergerak ini yang mempunyai efek terhadap munculnya gelombang pada benda kerja.



Gambar 4.9. Perubahan Sudut Inklinasi Pada Mesin

Sketsa pergerakan *bed* mesin.

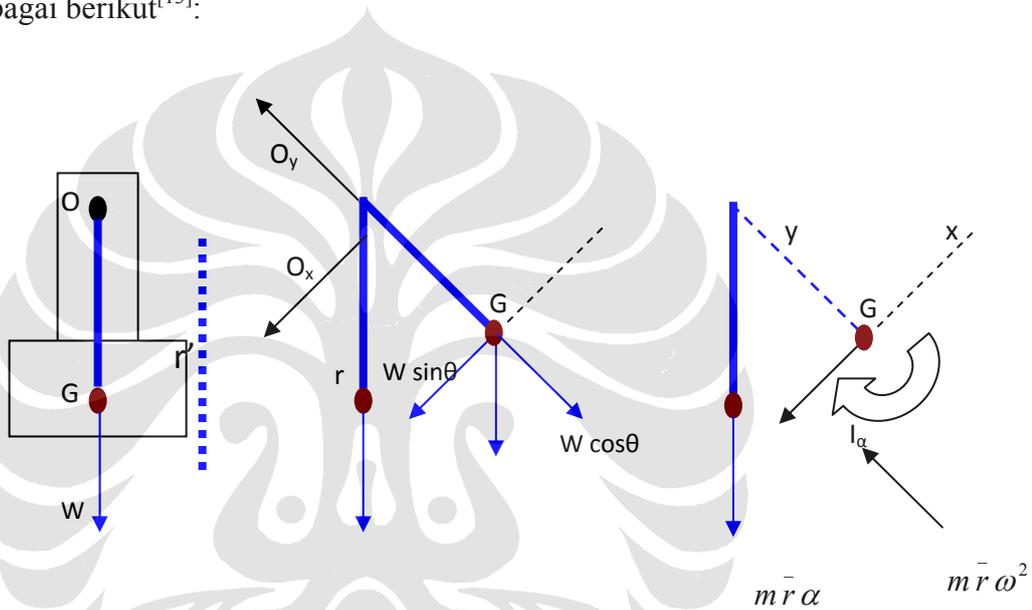


Gambar 4.10. Visualisasi Bed Dari Sumbu Rotasi Sudut 45°

Dengan asumsi massa terpusat pada G dan besarnya sekitar 100 Kg. Maka nilai W_N dan W adalah sebagai berikut:

$$W_N = m g = 100 (9,81) = 981 \text{ N} ; W = W_N \cos 45^\circ = 693,67 \text{ N}$$

Saat mesin melakukan perubahan sudut inklinasi maka *bed* tempat meletakkan *workpiece* bergerak berputar sejauh sudut inklinasi yang terjadi. Berputarnya *bed* ini mengikuti sumbu putar motor yaitu pada gambar 4.9 di atas adalah sumbu A. Dengan adanya pergerakan searah sumbu A tersebut maka motor pada sumbu A akan mengalami pembebanan gaya tertentu yang besarnya tergantung dari perubahan sudut inklinasi yang terjadi. Dengan menggunakan asumsi berat W di atas maka pergerakan *bed* saat membentuk sudut 45° adalah sebagai berikut^[13]:



Gambar 4.11. Free Body Diagram Bed Dari Sumbu Rotasi Sudut 45°

O_n merupakan normal komponen dan didapatkan dari persamaan pada arah y yang melibatkan akselerasi normal $\bar{r} \omega^2$. Kecepatan sudut ω dari *bed* dihasilkan dari integral dari percepatan angular. O_t tergantung dari percepatan tangensial (α) yang harus diketahui terlebih dahulu.

Dengan mengabaikan gesekan yang terjadi pada motor, maka persamaan moment pada O adalah:

$$\sum M_o = I_o \alpha \text{ (Meriam Kraige, Dynamics hal 460)}$$

Asumsi $W = 693,67 \text{ N}$; dan panjang lengan motor (gambar 4.9) adalah 80 cm

jarak O ke G (r) = $80 \sin 45^\circ = 56,56$ cm, dan $r' = 10 + 56,56 = 66,56$ cm

$$\sum M_o = I_o \alpha \quad (\text{Meriam Kraige, Dynamics hal 412})$$

$$m g r \cos \theta = r'^2 \alpha$$

$$9,81 (0,5656) \cos \theta = (0,6656)^2 \alpha$$

$$\alpha = 12,52 \cos \theta \text{ rad/s}^2$$

untuk $\theta = 45^\circ$;

$$\omega d\omega = \alpha d\theta$$

Maka;

$$\int_0^\omega \omega d\omega = \int_0^{45} 12,52 \cos \theta d\theta$$

$$\frac{1}{2} \omega^2 \Big|_0^\omega = 12,52 [\sin \theta] \Big|_0^{45}$$

$$\frac{1}{2} \omega^2 = 12,52 \cdot 0,7071$$

$$\omega^2 = 17,71 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)^2$$

Dengan mengetahui α dan ω maka gaya pada motor O dapat dihitung dengan sebagai berikut:

$$\sum F_y = m r \omega^2$$

$$O_y - W \sin 45 = 100 (0,5656)(17,71)$$

$$O_y - 693,67 \sin 45 = 100 (0,5656)(17,71)$$

$$O_y = 1492,18 \text{ N}$$

$$\sum F_x = m r \alpha$$

$$O_x + W \cos 45 = 100 (0,5656)(12,52) \cos 45$$

$$O_x + 693,67 \cos 45 = 100 (0,5656)(12,52) \cos 45$$

$$O_x = 10,23 \text{ N}$$

Maka total gaya yang bekerja pada motor dengan perubahan sudut 45° adalah sebagai berikut:

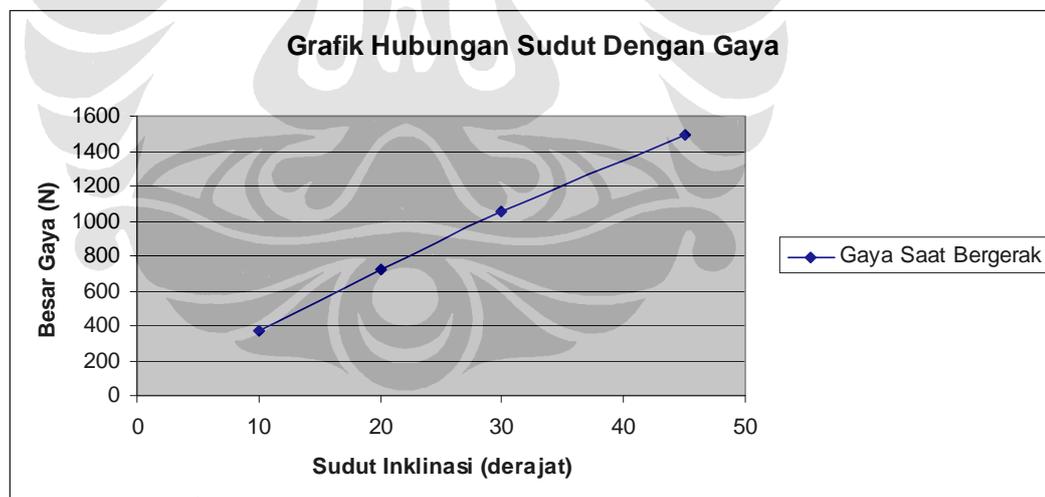
$$\begin{aligned}
 O &= \sqrt{O_y^2 + O_x^2} \\
 &= \sqrt{1492,18^2 + 10,23^2} \\
 &= 1492,22 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan gaya yang terjadi pada motor O di atas diketahui bahwa besarnya gaya pembebanan pada motor O ketika bed bergerak 45° adalah sebesar 1492,22 N. Dan untuk variasi sudut yang lain dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah ini

Tabel 4.6. Pengaruh Perubahan Sudut Terhadap Gaya Pada Motor

SUDUT ($^\circ$)	ω^2 (rad/s) ²	O_x (N)	O_y (N)
45	17.70578	10.22551	1491.933
30	12.52	12.5234	1054.966
20	8.56368	13.58919	721.5969
10	4.346944	14.24139	366.2843

Hasil plot distribusi gaya pada tabel 4.6 dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 4.12 Grafik Hubungan Sudut dengan Gaya

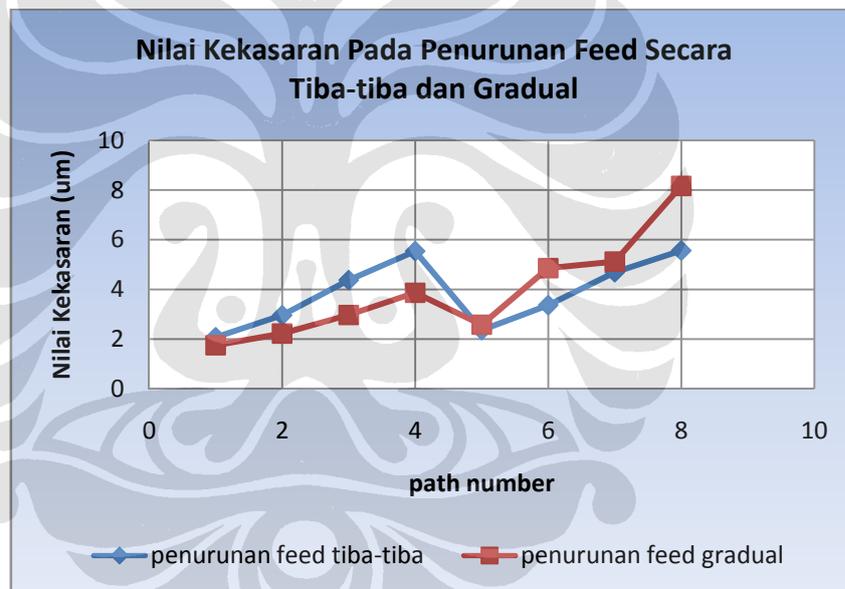
Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi sudut inklinasi yang digunakan pada pemesinan untuk jarak perubahan dan waktu konstan, maka gaya sesaat yang terjadi pada motor saat melakukan pergerakan inklinasi semakin besar. Hal ini sesuai dengan *waviness* yang dihasilkan bahwa semakin besar

perubahan sudut dengan jarak perubahan yang sama maka nilai *waviness* akan cenderung lebih besar.

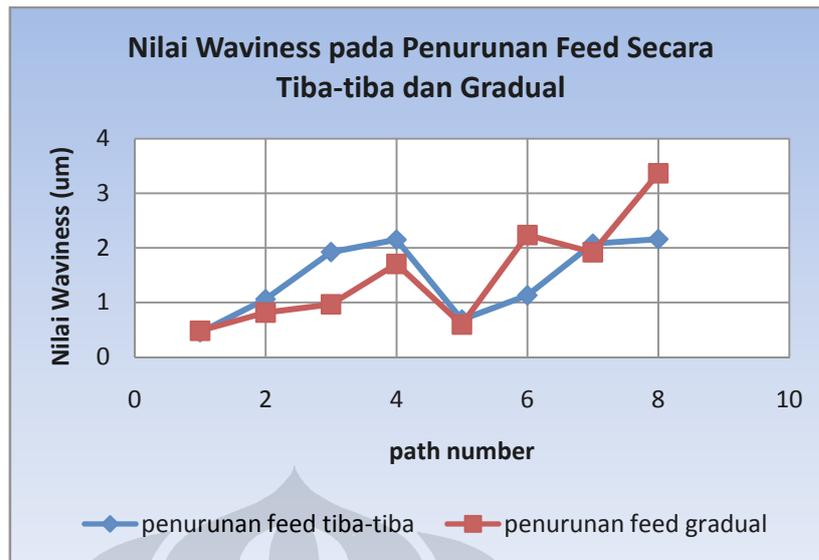
4.2.6 Analisa Hasil Permukaan dengan Perlakuan Feed Menurun

Berikut ini adalah data yang dihasilkan dengan kondisi pemesinan:

1. feed diturunkan secara gradual pada daerah perubahan sudut dari 1000 mm/min sampai 500 mm/min
 2. feed diturunkan tiba-tiba pada daerah perubahan sudut dari 1000mm/min ke 500 mm/min
 3. kondisi perubahan sudut yang dilakukan sepanjang 20 mm
- hasilnya ditampilkan dalam grafik seperti di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.13. Perbandingan Nilai Ra dan Wa pada Perlakuan Feed secara gradual dan secara tiba-tiba; (a) Ra, dan (b) Wa

Pada grafik diatas, terlihat kecenderungan nilai yang lebih besar untuk Ra dan Wa pada bagian pola pergerakan pahat inc-ver-inc untuk penurunan feed yang tiba-tiba. Kemudian untuk pola pergerakan pahat ver-inc-ver, kecenderungan feed yang gradual memiliki nilai yang lebih besar. Fenomena ini berkaitan dengan pola pergerakan tool yang mundur saat melakukan manufer mundur pada kondisi tertentu yang akan dijelaskan kemudian.

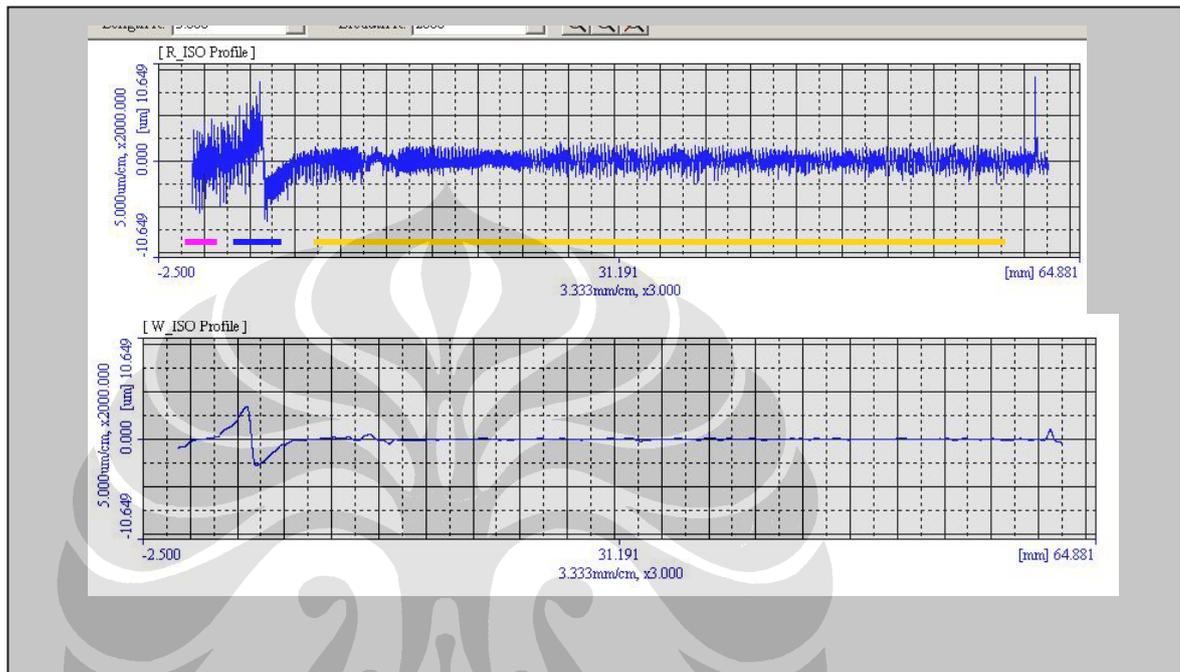
4.3 Analisa Grafik Hasil Percobaan

Dari nilai-nilai hasil percobaan pada tabel perhitungan diatas didapatkan grafik hasil pengukurannya yang mempunyai kecenderungan pola seperti grafik diatas. Kecenderungan pola ini adalah saat *tool* melakukan pemakanan dengan sudut inklinasi maka nilai kekasarannya (*roughness*) akan lebih besar dibandingkan dengan melakukan pemakaan vertikal (inklinasi 0°).

Kecenderungan yang kedua adalah saat *tool* melakukan perubahan sudut baik itu dari inklinasi ke vertikal atau sebaliknya dari vertikal ke inklinasi maka akan terbentuk gelombang pada daerah perubahan tersebut. Berikut ini adalah grafik yang terbentuk dari hasil pengukuran pada sampel jarak perubahan 10 mm.

Skala yang digunakan untuk menampilkan grafik berbeda, hal ini karena untuk menampilkan amplitudo dari kekasaran yang terjadi menjadi terlihat pada grafik.

1. pola pemakanan *milling* inklinasi – vertikal – inklinasi
 - Sudut 10° jarak perubahan sudut 10 mm



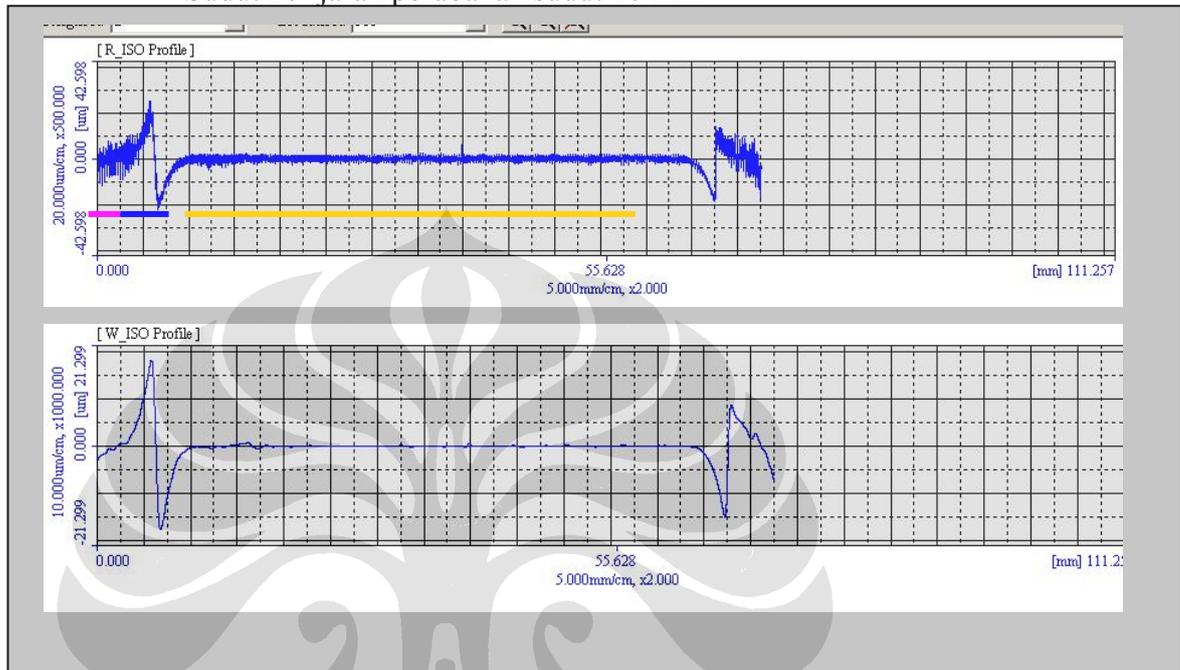
Gambar 4.14. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 10° - 0° - 10°

Pada gambar grafik 4.14 di atas menunjukkan perbedaan distribusi kekasaran pada pemakanan dengan sudut 10° dan vertikal. Dari gambar terdapat garis merah yang menandakan bahwa *tool* melakukan pemakanan dengan sudut inklinasi dan kuning berarti pemakanan tanpa sudut inklinasi. Sedangkan biru merupakan daerah peralihan pemakanan dari inklinasi ke tanpa inklinasi. Keterangan warna garis ini berlaku untuk gambar 4.14 sampai dengan 4.17.

Gambar 4.14 memperlihatkan adanya gelombang untuk perubahan pola pemakanan dari dengan sudut inklinasi sampai tanpa menggunakan sudut inklinasi. Gambar tersebut juga memperlihatkan perbedaan kekasaran antara daerah pemakanan dengan sudut inklinasi dan juga daerah pemakanan tanpa sudut inklinasi. Kecenderungan perbedaan kekasaran menggambarkan pemakanan dengan inklinasi 10° lebih kasar daripada pemakanan vertikal. Nilai kekasaran dengan pemakanan sudut 10° pada grafik sekitar 7 μm dan kekasaran untuk

pemakanan vertikal adalah sekitar 5 μm dengan skala 5 $\mu\text{m}/\text{cm}$ x 2000. Perbandingan kekasaran yang terjadi antara sudut 10° dengan vertikal adalah sekitar 2. Nilai *waviness* yang terbentuk sekitar 10 μm .

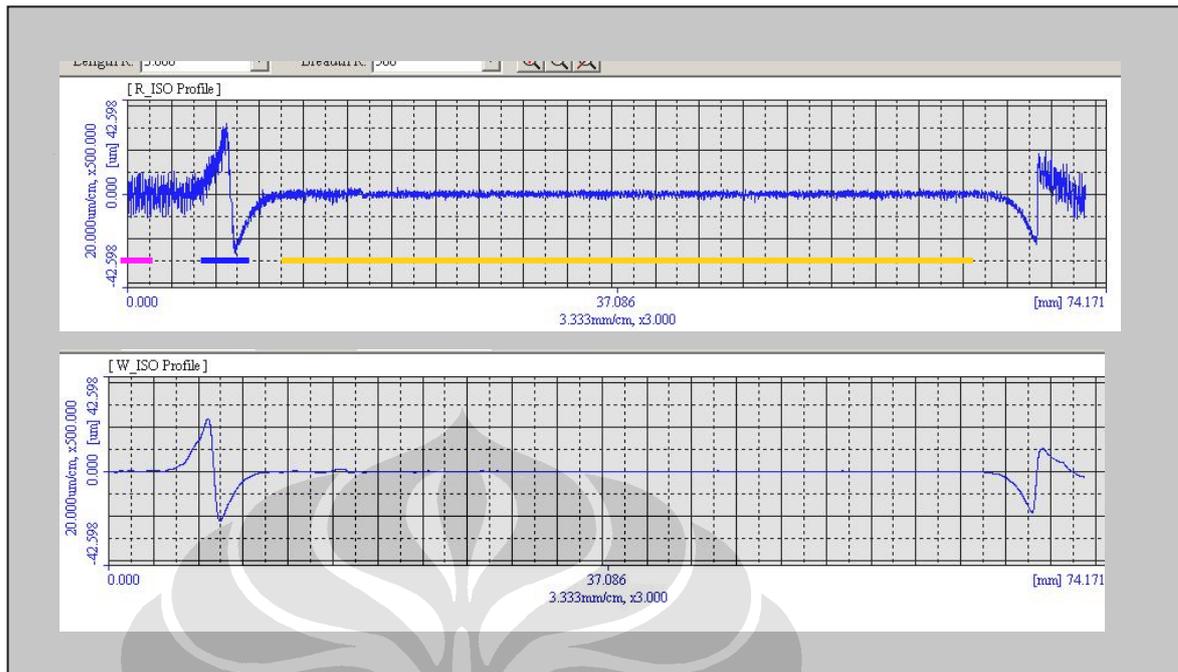
- Sudut 20° jarak perubahan sudut 10 mm



Gambar 4.15. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 20°-0°-20°

Untuk sudut inklinasi 20° dengan pola pemakanan yang sama, didapatkan kecenderungan yang sama yaitu pemakanan dengan sudut inklinasi cenderung lebih kasar daripada pemakanan vertikal. Skala pada sumbu y menunjukkan nilai 20 μm untuk tiap cm. ini berarti grafik pada gambar 4.14 mempunyai nilai yang lebih kecil untuk tiap satu cm (nilai kotak pada gambar 4.14 lebih kecil daripada nilai kotak gambar 4.15). Nilai kekasaran dengan pemakanan sudut inklinasi 20° adalah sekitar 18 dan saat vertikal nilainya adalah 7 μm dengan skala 20 $\mu\text{m}/\text{cm}$ x 500. Perbandingan kekasarannya adalah sekitar 2,25. Amplitudo *waviness* yang dihasilkan sekitar 38 μm untuk perubahan vertikal ke miring dan 28 μm untuk perubahan miring ke vertikal dengan skala 10 $\mu\text{m}/\text{cm}$ x 1000.

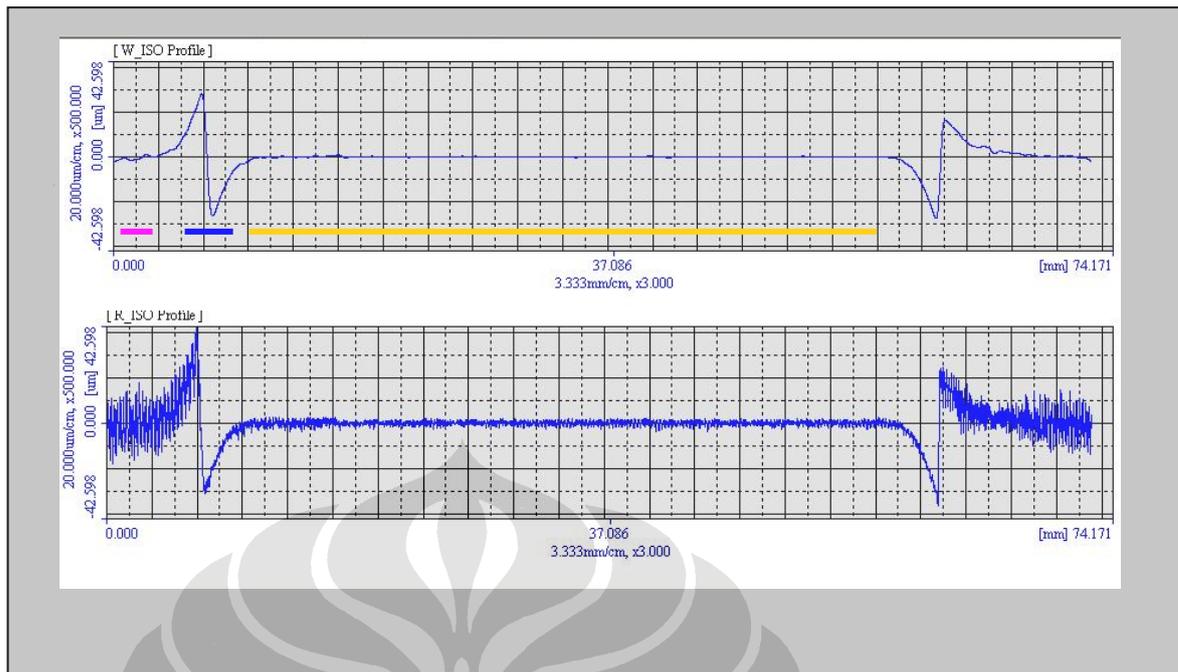
- Sudut 30° jarak perubahan sudut 10 mm



Gambar 4.16. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 30°-0°-30°

Untuk sudut 30° diketahui bahwa pemakanan dengan inklinasi 30° memiliki kekasaran yang lebih kasar daripada pemakanan vertikal. Nilai yang didapatkan dari gambar grafik adalah sebesar 20um untuk 30° dan 6um untuk vertikal dengan skala 20 um/cm x 500. Maka perbandingan kekasarannya adalah 3,33. Amplitudo *waviness* yang dihasilkan sekitar 45um untuk pola miring ke vertikal dan 30um untuk pola vertikal ke miring.

- Sudut 45° jarak perubahan sudut 10 mm



Gambar 4.17. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 45°-0°-45°

Untuk sudut 45° kekasaran yang terjadi lebih kasar lagi dari sudut – sudut sebelumnya. Nilai kekasaran berdasarkan grafik yang terbentuk adalah 28um untuk pemakanan dengan sudut inklinasi 45° dan 6um untuk vertikal dengan skala 20um/cm x 500. Maka perbandingannya adalah 4,67. Amplitudo *waviness* pada pola miring ke vertikal sekitar 56um dan 45um untuk pola vertikal ke miring.

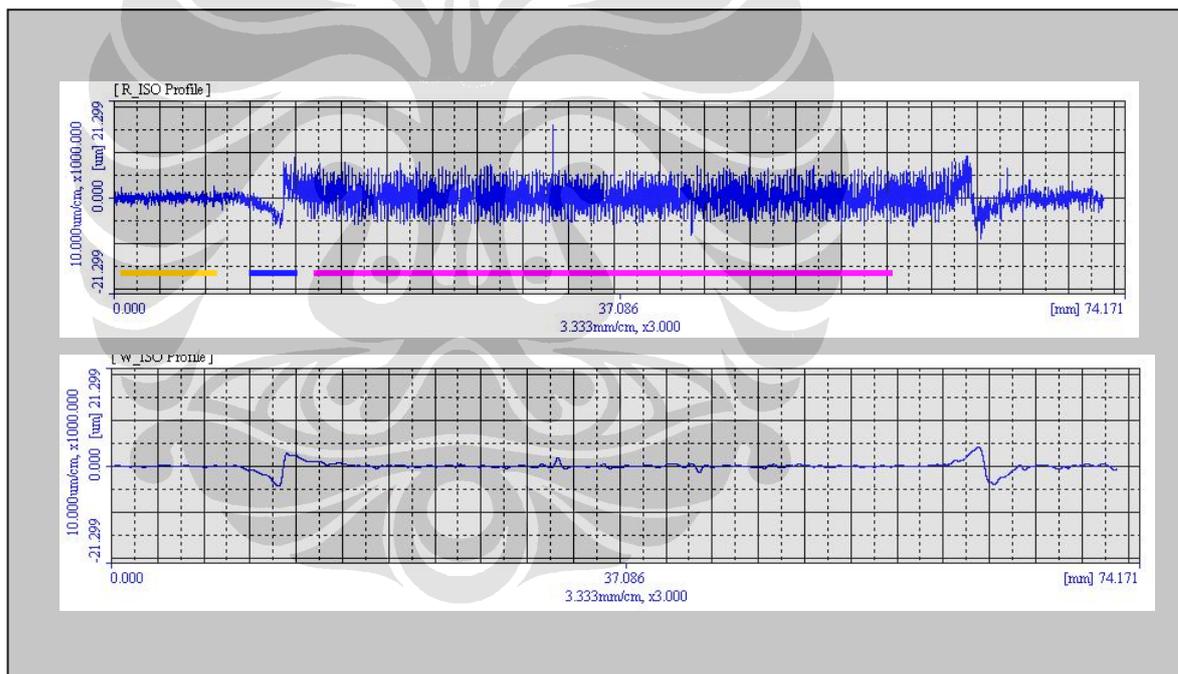
Melihat secara keseluruhan (gambar 4.13 s.d. 4.16) dengan skala yang disesuaikan maka dapat dilihat ada kecenderungan kenaikan kekasaran untuk tiap kenaikan sudut pemakanan. Pola perbandingannya pun juga cenderung naik. Bila melihat *waviness* yang terbentuk pada grafik – grafik di atas maka juga terlihat adanya kenaikan nilai *waviness* terlihat dari perbedaan tinggi *waviness* pada grafik yang terbentuk. Dengan begitu berarti perubahan sudut inklinasi menimbulkan *waviness* pada benda kerja.

Disamping itu, kekasaran juga akan semakin meningkat dengan semakin miring sudut inklinasi dalam pemakanan. Pada pemakanan vertikal nilai kekasarannya relatif sama untuk tiap variasi perubahan nilai sudut inklinasi.

2. pola pemakanan *milling* vertikal – inklinasi – vertikal

Untuk pola pemakanan vertikal – inklinasi – vertikal ada 4 sudut inklinasi yang digunakan yaitu 10° , 20° , 30° , dan 45° . Untuk mempermudah penjelasan grafik dibagi menjadi 3 daerah. Yang pertama garis kuning menandakan pola pemakanan vertikal, merah pola pemakanan inklinasi, biru menandakan daerah perubahan dari vertikal ke miring. Skala yang dipakai untuk tiap grafik dapat berbeda, hal ini dikarenakan ada perbedaan nilai kekasaran. Maka untuk dapat melihat pola grafik kekasarannya digunakan skala tertentu. Berikut adalah rincian penjelasannya

- Sudut 10° jarak perubahan sudut 10 mm

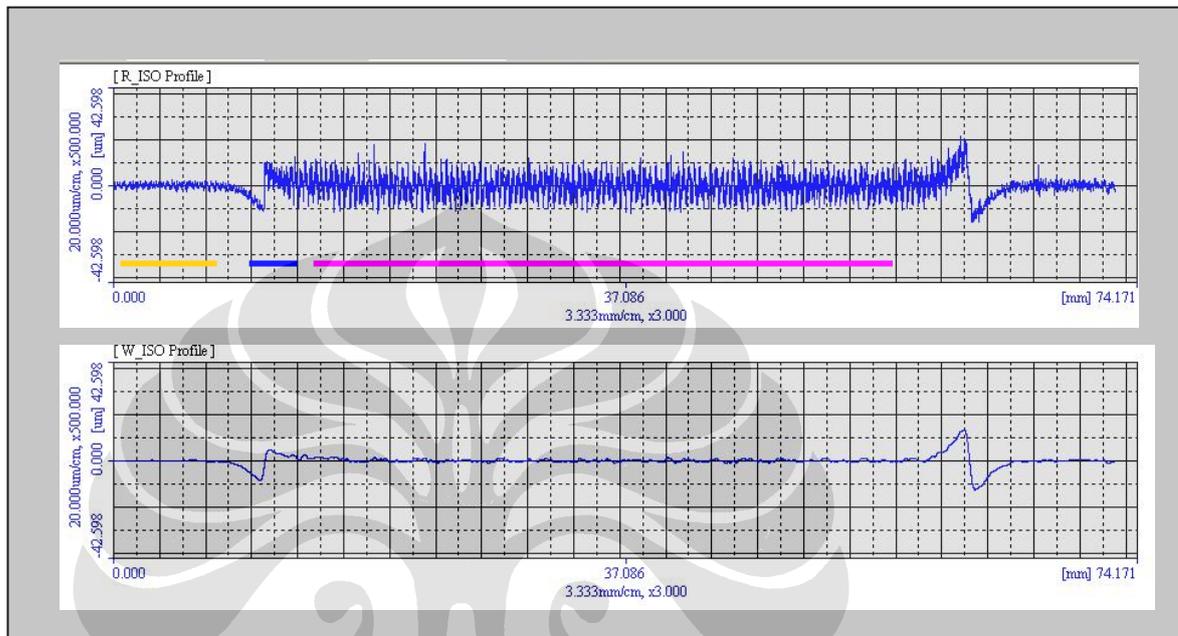


Gambar 4.18. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 0° - 10° - 0°

Perubahan pola pemakanan dari vertikal ke miring dengan sudut inklinasi 10° menghasilkan kekasaran yang berbeda untuk tiap sudut pemakanan. Dari grafik dapat dilihat pemakanan vertikal mempunyai kekasaran yang lebih kecil daripada pemakanan dengan sudut 10° . Pada daerah perubahan (biru) terjadi *waviness* dengan ketinggian sekitar 15um (puncak ke lembah).

Nilai kekasaran yang terbentuk pada pemakanan vertikal adalah sekitar 4 μ m, dan saat inklinasi 10° adalah 12 μ m. Nilai ini berdasarkan grafik 4.18 di atas dengan menggunakan skala 10 μ m/cm x 1000.

- Sudut 20° jarak perubahan sudut 10 mm



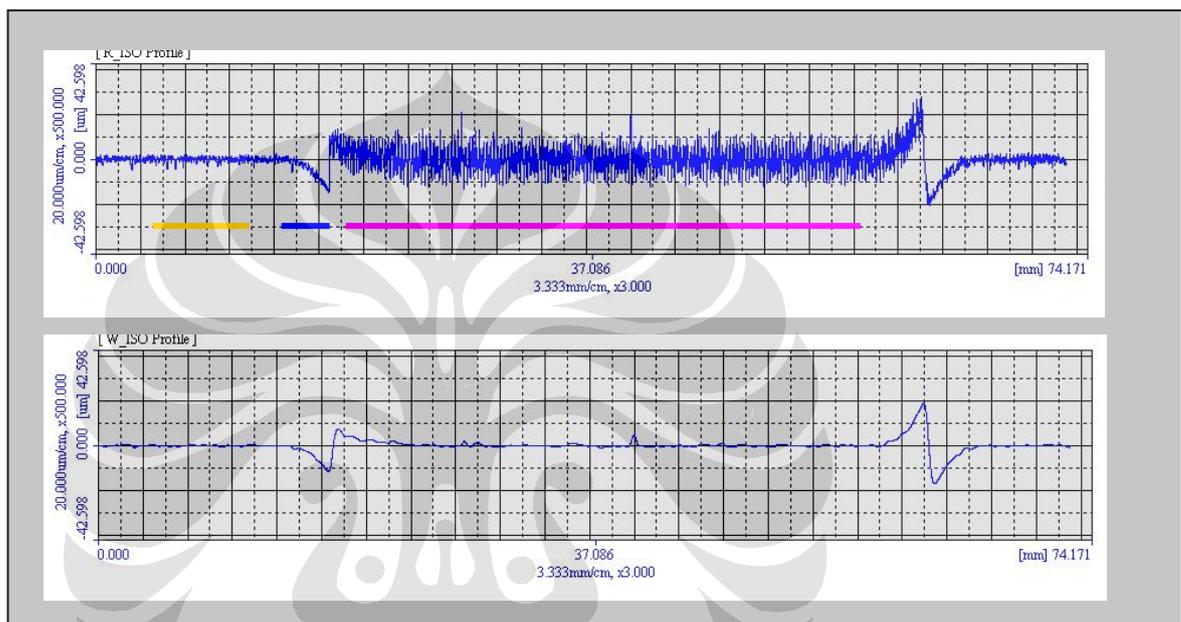
Gambar 4.19. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 0°-20°-0°

Untuk sudut 20° didapatkan tren yang sama yaitu vertikal lebih halus daripada saat inklinasi. Besar kekasaran yang terlihat pada grafik adalah sekitar 4 μ m untuk vertikal dan 20 μ m untuk pemakanan miring. Melihat pada grafik di atas maka *waviness* yang terjadi sebesar 18 μ m pada vertikal ke miring dan 27 μ m pada miring ke vertikal.

Pada daerah perubahan didapatkan *waviness* pada benda. Untuk perubahan dari miring ke vertikal mempunyai nilai *waviness* yang lebih besar ini dikarenakan adanya perbedaan pola pemakanan. Pada perubahan dari vertikal ke miring, *tool* melakukan gerak mundur sebelum melakukan inklinasi sedangkan pada perubahan miring ke vertikal *tool* langsung melakukan manuver inklinasi. Pemakanan awal pada proses perubahan vertikal ke miring dapat mengurangi *waviness* yang terjadi. Ini dikarenakan efek dari pemakanan vertikal yang mempunyai *roughness* yang cenderung kecil, dengan begitu saat melakukan gerak

mundur ada perbaikan dari kualitas permukaan. Hal seperti ini terjadi untuk tiap perubahan sudut inklinasi pada gambar grafik berikutnya. Hanya perbedaannya antara vertikal ke miring dan miring ke vertikal semakin besar perbedaan *waviness* yang terjadi. Nilai ini berdasarkan grafik di atas dengan menggunakan skala 20um/cm x 500.

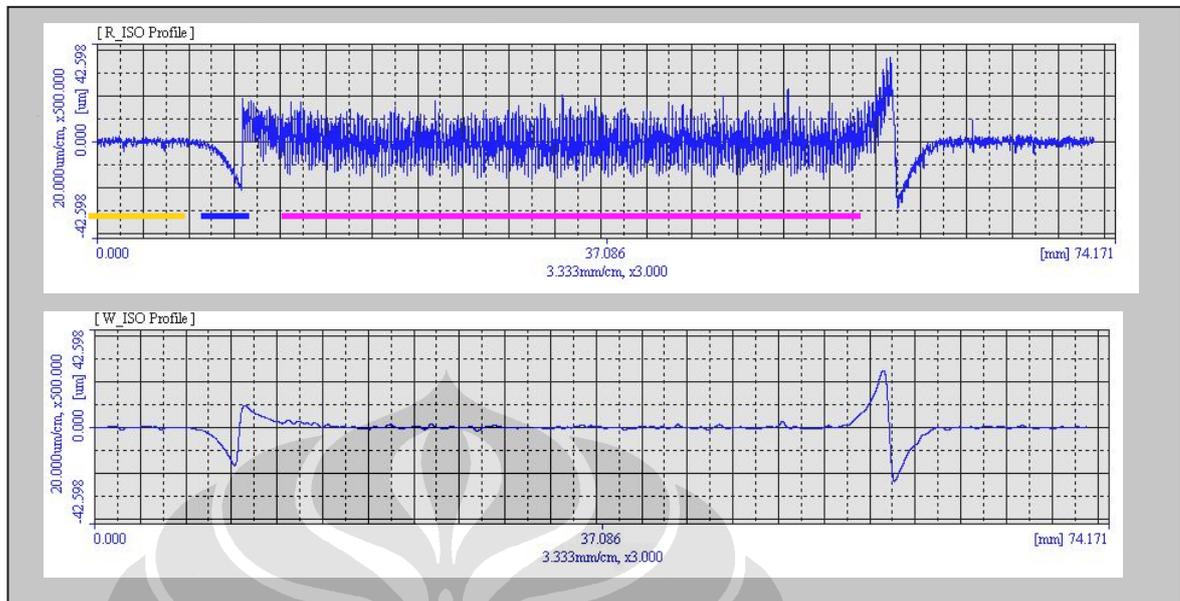
- Sudut 30° jarak perubahan sudut 10 mm



Gambar 4.20 Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 0°-30°-0°

Pada sudut 30° juga terdapat tren yang sama. Pada daerah vertikal memiliki nilai kekasaran yang lebih kecil dari pada daerah pemakanan inklinasi. Pada daerah vertikal berdasarkan grafik di atas dengan skala 20um x 500 mempunyai nilai kekasaran sekitar 5um. Sedangkan pada pemakanan dengan sudut inklinasi 30° nilai kekasarannya sekitar 23um. Sedangkan untuk gelombang (*waviness*) sekitar 20um pada perubahan vertikal ke miring dan 38um untuk perubahan miring ke vertikal.

- Sudut 45° jarak perubahan sudut 10 mm



Gambar 4.21. Grafik Roughness dan Waviness Untuk Perubahan Sudut 0°-45°-0°

Pada sudut 45° juga terjadi tren yang sama yaitu daerah vertikal memiliki nilai kekasaran yang lebih kecil dari pada daerah inklinasi. Dari grafik di atas nilai kekasaran pada daerah vertikal sekitar 5µm dan untuk daerah inklinasi sekitar 25µm. Nilai *waviness* untuk pola vertikal ke miring sekitar 28µm dan untuk pola miring ke vertikal sekitar 50µm. Nilai ini berdasarkan grafik di atas dengan menggunakan skala 20µm/cm x 500.

Secara keseluruhan data yang dihasilkan pada gambar grafik – grafik di atas adalah sebagai berikut:

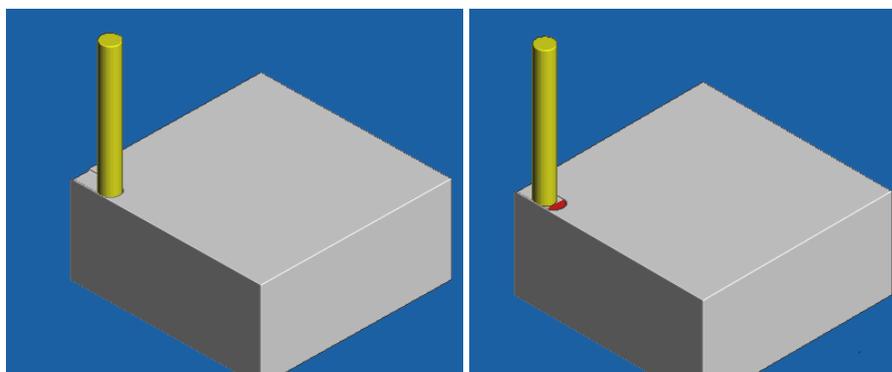
Tabel 4.7. Plot Analisa Grafik Hasil Pengukuran (dalam um berdasarkan grafik hasil pengukuran)

POLA PEMAKANAN									
Inklinasi-Vertikal-Inklinasi					Vertikal-Inklinasi-Vertikal				
sudut	roughness		waviness		sudut	roughness		waviness	
	mirin g	vertikal	Mirin g-vertikal	Vertikal-miring		vertikal	mirin g	Vertikal-miring	Mirin g-vertikal
10	7	5	10	7	10	4	12	15	15
20	18	7	38	28	20	4	20	18	27

30	20	6	45	30	30	5	23	20	38
45	28	6	56	45	45	5	25	28	50

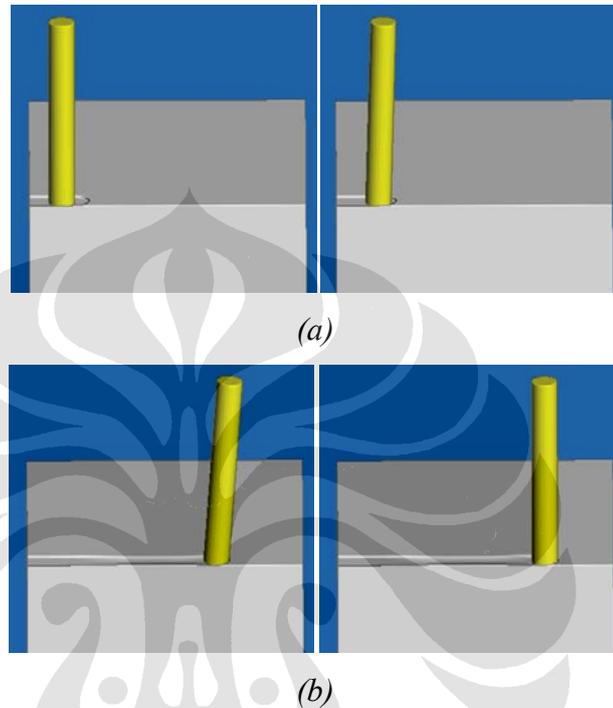
Nilai data pada tabel ini didapatkan berdasarkan gambar dari grafik pada skala yang tertentu dan tidak diolah lebih lanjut. Pengolahan data dari grafik yang didapat dilakukan oleh *software* MITUTOYO SV-C3000 (formtracepak v3.210), dan menghasilkan data Ra dan Wa pada tabel. Nilai pada tabel 4.7 ini bukan menggambarkan kekasaran rata-rata keseluruhan tetapi menggambarkan pada tiap daerah berdasarkan grafik yang terbentuk.

Dari tabel 4.7 di atas diketahui bahwa pada pemakanan vertikal mempunyai tingkat kekasaran yang sama untuk berbagai jenis pola perubahan sudut *tool*. Sesuai dengan analisa terbentuknya kekasaran bab 4.2 semakin miring sudut pemakanan maka kekasaran yang terbentuk semakin besar. Perubahan miring ke vertikal memiliki kecenderungan kekasaran yang lebih tinggi dari pada pola perubahan vertikal ke miring. Fenomena ini terjadi karena saat *tool* melakukan perubahan sudut inklinasi dari vertikal ke miring *tool* kembali bergerak mundur untuk mengambil persiapan kemiringan inklinasi. Dengan adanya gerak vertikal mundur ini maka kekasaran tiba-tiba yang dapat menyebabkan timbulnya *waviness* akan berkurang sehingga dengan begitu nilai *waviness* pada perubahan vertikal ke miring menjadi lebih kecil. Gerak mundur ini merupakan *safety* dari mesin untuk melindungi *tool* dari *colision*. Sedangkan pada perubahan miring ke vertikal *tool* langsung melakukan perubahan sudut ke vertikal. Pada gambar di bawah ini ada warna merah yang berarti telah dipotong terlebih dahulu. Dengan demikian maka *tool* melakukan gerak mundur sebelum melakukan perubahan sudut inklinasi.



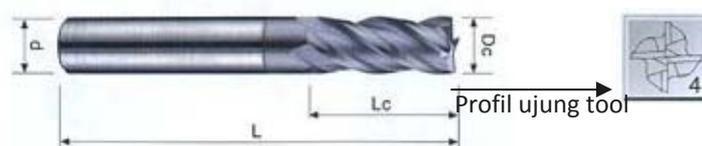
Gambar 4.22. Gerak Mundur Tool Saat Perubahan Sudut Vertikal ke Miring

Tujuan gerak mundur ini adalah menghindari gaya yang besar terhadap *tool*. Dengan adanya gerak mundur maka kontak *tool* dengan benda dapat dikurangi, dengan begitu maka kualitas *tool* akan tetap terjaga. Berikut adalah visualisasinya.



Gambar 4.23. Gerakan Tool Pada Perubahan Sudut, a) Perubahan Dari Vertikal Ke Inklinasi, b) Perubahan Dari Inklinasi Ke Vertikal

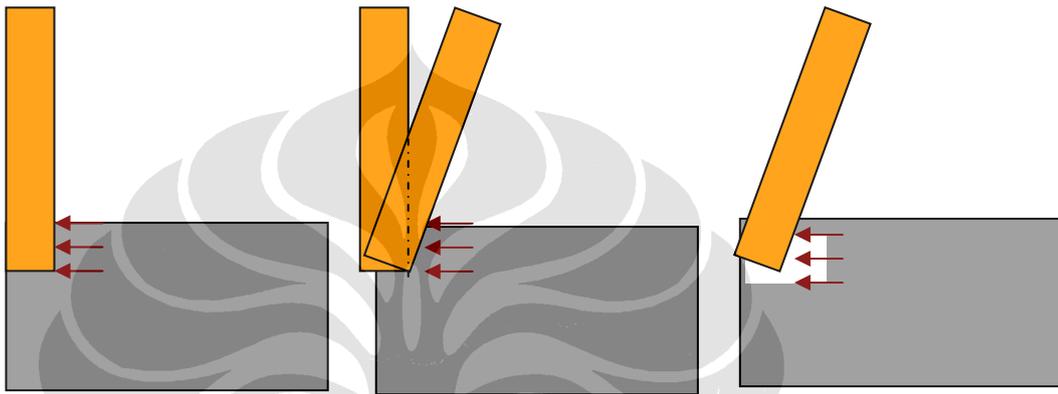
Perbedaan pola pergerakan *tool* saat melakukan perubahan vertikal ke miring dan sebaliknya dari miring ke vertikal terkait dengan *tool* yang digunakan. Untuk *tool flatend* gaya pemotongan terkecil terdapat pada ujung sudut *tool*.



Gambar 4.24. Profil Tool *Flatend*

Dari gambar di atas dapat dilihat bagian yang paling tajam dari *tool flatend* adalah bagian ujungnya. Pada pola pemakanan vertikal ujung *tool* dan seluruh L_c melakukan kontak pemotongan dengan material secara konstan. Dengan begitu

gaya yang terjadi terbagi merata disetiap daerah kontak *tool* dengan material yang dibuang. Sedangkan pada pemakanan dengan sudut inklinasi kontak terjadi pada daerah L_c . Saat *tool* melakukan perubahan dari vertikal ke miring jika tanpa melakukan gerak mundur maka hanya akan terjadi kontak dengan permukaan material pada L_c . Bagian ujung *tool* tidak bergerak transversal tetapi hanya diam sebagai pivot. Kontak seperti ini akan mempercepat keausan pada *tool*.



Gambar 4.25. Gerak Mundur Pahat Saat Manuver