

Jinggo: Jurnal Inovasi Teknologi Manufaktur, Energi, dan Otomotif
ISSN: 2963-8445

http: https://jurnal.poliwangi.ac.id/index.php/jinggo/
Received: 09 Juli 2026 *Revised: 27 Juli 2026* *Accepted: 31 July 2026*

ANALISIS *CHATTER* DAN KEKASARAN PERMUKAAN *STAINLESS STEEL 304* BERDASARKAN SINYAL AKSELEROMETER DENGAN VARIASI *TOOLPATH CNC MILLING*

Venusa Abriandika [1*], Ansor Salim Siregar[2], Achdri Fauzi Nugraha Oloan [3]
[1, 2] Teknologi Rekayasa Manufaktur, Politeknik Negeri Banyuwangi
[3] Teknologi Rekayasa Kapal, Politeknik Negeri Banyuwangi

E-mail koresponden: venusaabriandika@poliwangi.ac.id

Abstract

This study evaluates the influence of toolpath strategy on vibration quantity (chatter) and surface roughness (Ra) in the CNC pocket milling process of Stainless Steel 304 material. The test was conducted in an experimentally controlled manner using the End Mill Normal Helix Angle (NHA) 300 tool by comparing two main trajectory strategies: One Way and Zig-Zag. Varied machining parameters include spindle speed (2000, 2250, 2500, and 2750 RPM) as well as cutting depth (0.4 to 2.0 mm) at a constant feed rate of 80mm/min. Vibration signal measurements are carried out in real-time using an accelerometer sensor integrated with Arduino Uno and LabVIEW 2015 SP. The location of the surface roughness test sample point is precisely determined by synchronizing the highest vibration spike time on the Acceleration-Time Domain graph with 3D coordinates in the Mastercam 2018 software. The results show that the One Way strategy consistently results in a wider Chatter Free Area than the Zig-Zag strategy. Under optimal conditions (2500 RPM), the One Way trajectory minimizes acceleration spikes due to a more stable cutting force, resulting in smoother surface quality. In contrast, the worst chatter phenomenon for both strategies was detected at 2750 RPM with a cut depth of 1.6 mm.

***Keywords**: Chatter, Acceleration-Time Domain, Normal Helix Angle (NHA), Fast Fourier Transform (FFT), and Pocket Milling*.

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh strategi lintasan pemakanan (*toolpath*) terhadap kuantitas getaran (*chatter*) dan kekasaran permukaan (Ra) pada proses *CNC pocket milling* material *Stainless Steel* 304. Pengujian dilakukan secara eksperimental terkontrol menggunakan pahat *End Mill Normal Helix Angle* (NHA) 30^0 dengan membandingkan dua strategi lintasan utama: *One Way* dan *Zig-Zag*. Parameter pemesinan yang divariasikan meliputi kecepatan *spindel* (2000, 2250, 2500, dan 2750 RPM) serta kedalaman potong (0.4 hingga 2.0 mm) pada *feed rate* konstan 80mm/menit. Pengukuran sinyal getaran dilakukan secara *real-time* menggunakan sensor akselerometer yang diintegrasikan dengan *Arduino Uno* dan *LabVIEW 2015 SP*. Lokasi titik sampel pengujian kekasaran permukaan ditentukan secara presisi melalui metode sinkronisasi waktu lonjakan (*spike*) getaran tertinggi pada grafik *Acceleration-Time Domain* dengan koordinat 3D pada *software Mastercam 2018*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi *One Way* secara konsisten menghasilkan *Chatter Free* Area yang lebih luas dibandingkan strategi *Zig-Zag*. Pada kondisi optimal (2500 RPM), lintasan *One Way* meminimalkan lonjakan akselerasi akibat gaya pemotongan (*cutting force*) yang lebih stabil, sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang lebih halus. Sebaliknya, fenomena *chatter* terparah bagi kedua strategi terdeteksi pada 2750 RPM dengan kedalaman potong 1.6 mm.

Kata Kunci: Getaran, *Acceleration-Time Domain, Normal Helix Angle (NHA), Fast Fourier Transform (FFT), and Pocket Milling*.

1. PENDAHULUAN

Dalam proses manufaktur modern, pemesinan *CNC milling* memiliki peranan penting dalam menghasilkan komponen dengan presisi tinggi, terutama pada material teknik seperti *Stainless Steel 304* (SS304). Material ini banyak digunakan dalam dunia industri karena ketahanan terhadap korosi serta

mempunyai kekuatan mekaniknya yang baik. Namun, sifat ulet yang tinggi sehingga menimbulkan kecenderungan menghasilkan gaya potong besar sehingga menimbulkan permasalahan *vibrasi* selama proses produksi. Salah satu bentuk *vibrasi* yang paling merugikan adalah *regenerative chatter*, yaitu getaran regeneratif yang bersifat tidak stabil dan dapat berkembang menjadi osilasi berdampak besar terhadap kualitas hasil produksi.

Regenerative chatter dapat menurunkan kualitas permukaan, mengurangi umur pahat, menimbulkan kebisingan, dan bahkan pada situasi extrim menyebabkan kegagalan proses permesinan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasinya, mulai dari pemilihan parameter potong yang optimal, peningkatan kekakuan sistem mesin, hingga modifikasi geometri pahat. Di antara strategi tersebut, optimasi geometri pahat merupakan satu metode yang efektif dan mudah diterapkan, karena perubahan bentuk pahat dapat langsung mempengaruhi dinamika gaya potong dan energi getaran yang dihasilkan selama pemesinan. Salah satu aspek geometri pahat yang berpengaruh besar terhadap stabilitas pemotongan adalah sudut *heliks flute* (*helix angle*). Pahat dengan *Normal Helix Angle* (NHA) merupakan tipe yang umum digunakan dan memiliki sudut *heliks* konstan pada seluruh *flute*. Namun, pahat ini tidak selalu mampu meredam getaran pada kondisi pemotongan tertentu, terutama saat melakukan pemesinan material keras, ulet seperti SS 304. Oleh karena itu, diciptakanlah pahat dengan *Variable Helix Angle* (VHA) yang memiliki sudut *heliks* yang bervariasi, menghasilkan gaya pemotongan yang tidak seragam antar-*flute*. Perbedaan fase ini dapat memecah ritme gaya potong, mengurangi amplitudo getaran, dan meningkatkan area operasi stabil.

Pahat VHA telah banyak digunakan sebagai solusi untuk meningkatkan stabilitas pemotongan, eksperimental yang dapat secara langsung dibandingkan performa dibanding pahat NHA dalam pengendalian *regenerative chatter* pada pemesinan *CNC milling SS 304*. Penelitian yang terstruktur diperlukan untuk memahami sejauh mana perbedaan sudut *heliks* dapat mempengaruhi respon dinamis sistem pemotongan. Penggunaan metode analisis seperti *Fast Fourier Transform* (FFT), *Power Spectral Density* (PSD), serta penyusunan *Stability Lobe Diagram* (SLD) menjadi penting untuk mengevaluasi karakteristik getaran dan batas stabilitas masing-masing pahat. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif efektivitas pahat *Normal Helix Angle* (NHA) dengan perbedaan metode pemakanan *pocket* dalam menghadapi *regenerative chatter* pada proses *CNC milling Stainless Steel 304*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai pengaruh sudut *heliks* terhadap stabilitas pemotongan, kualitas permukaan, dan kinerja pahat, serta memberikan rekomendasi praktis bagi industri dalam pemilihan pahat yang tepat untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas proses pemesinan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fenomena *Chatter* dan Stabilitas dalam *Milling*

2.1.1. Getaran *self-excited* seperti *Regenerative chatter* adalah salah satu penyebab utama tidak stabilnya proses milling, sehingga menurunkan kualitas permukaan, presisi, dan umur pahat. [1]

2.1.2. Untuk memprediksi dan menghindari kondisi yang menyebabkan *chatter*, sering digunakan *Stability Lobe Diagram* (SLD), yang menggambarkan kombinasi parameter potong (kecepatan spindel, kedalaman potong, dsb.) di mana operasi stabil (tanpa *chatter*) dapat dilakukan [2]. Akan tetapi, keakuratan SLD klasik bisa terbatas, terutama jika dinamika struktur mesin berubah disebabkan keausan, fleksibilitas *tool-holder*, kecepatan pemotongan, dan banyak lagi. Sebuah penelitian baru menyarankan pendekatan adaptif dan kuantifikasi untuk memastikan ketidak pastian parameter selama pemotongan [3].

2.2. Geometri Pahat - *Helix* dan *Pitch* Variabel sebagai Upaya Meredam *Chatter*

2.2.1. Penggunaan pahat dengan sudut *helix* dan *pitch* yang tidak sama (variabel) telah diusulkan sebagai metode untuk meningkatkan stabilitas selama produksi pada permesinan *milling*. Variasi *helix / pitch* dapat "memecah" harmonisasi *tooth-passing*, sehingga mengurangi resonansi getaran yang memicu *chatter*. [1], [2]

2.2.2. Studi simulasi menunjukkan bahwa distribusi *pitch / helix* variabel, maka stress dan deformasi pada pahat dapat dikurangi artinya, *rigidity* dan kekakuan struktural dapat dijaga lebih baik sehingga mengurangi getaran [4]. Model dinamika *milling* dengan pahat *helix / pitch* variabel memperlihatkan bahwa alat tersebut memiliki batas stabilitas (*unstable boundary*) yang lebih baik dibanding pahat dengan *helix uniform*, terutama pada kondisi *radial immersion* tertentu. [5]

2.3. Bukti Eksperimental: VHA dalam Berbagai Material & Kondisi *Milling*

2.3.1. Dalam penelitian terdahulu pada material *stainless steel* (SS-AISI 304), studi berjudul *"Effect of Variable Helix Angle of End Milling Tool on Vibration and Surface Roughness of SS-AISI 304"* diketahui bahwa pahat VHA secara signifikan dapat menurunkan amplitudo getaran dan memperbaiki kualitas permukaan dibandingkan pahat NHA. [6]

2.3.2. Pada penelitian lain dengan material aluminium sebagai material penggunaan pahat dengan *Variable Helix Angle* disandingkan dengan pahat *reguler*. Hasil pengujian didapat bahwa pahat VHA menghasilkan nilai kontrol *chatter* yang baik (area *stable* lebih luas) menurut analisis SLD. [3]

2.3.3. Pada proses permrsinan *slot-milling* dan *milling* vertikal berbasis *mikrokontroler* dengan material SS 304, telah diperoleh bahwa penggunaan pahat VHA (*helix* 35/38°, 40/42°) menghasilkan "*chatter-free region*" (bebas *chatter*) yang lebih luas dibanding pahat reguler.[7]

2.3.4. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa efek positif *helix / pitch* variabel tidak hanya pada getaran, tetapi juga pada kekasaran permukaan dan stabilitas proses dalam berbagai parameter potong. [6][1]

2.4. Metode dan Parameter Analisis: FFT, SLD, dan Teknik Modern Deteksi *Chatter*

2.4.1. Analisis *spektrum* getaran menggunakan *Fast Fourier Transform* **(**FFT) dan *Power Spectral Density* (PSD) terbukti efektif mendeteksi ukuran frekuensi *chatter* secara dominan dan dapat membedakan kondisi getaran stabil atau tidak stabil. [8]

2.4.2. Kombinasi dari analisis sinyal eksperimen untuk membuat SLD eksperimental memungkinkan verifikasi kondisi stabilitas sesuai parameter empiris hal ini penting terutama untuk sistem nyata yang kompleks. Dari studi di kampus menunjukkan bahwa SLD dengan pahat *helix variabel* memiliki perberbeda batas "*chatter-free*" dengan pahat *reguler*. [9][10]

2.4.3. Disisi metode, dari studi literatur terkini menunjukkan perkembangan: misalnya pendekatan metode berbasis data / sensor *machine learning* untuk estimasi SLD secara *real-time* dan penyesuaian parameter potong secara adaptif, dengan fungsi mendeteksi & mengendalikan *chatter* secara *real-time*. [8]

2.5. Celah Penelitian & Alasan bagi Studi Ini

2.5.1. Meskipun terdapat sejumlah studi mengenai pahat NHA pada material aluminium, baja, *stainless steel*, literatur yang khusus membandingkan kinerja pada material SS 304 dengan parameter potong variatif, analisis spektrum, SLD eksperimental, dan kualitas permukaan secara komprehensif masih terbatas.

2.5.2. Banyak dari penelitian menggunakan pahat NHA namun hanya terbatas pada satu jenis parameter potong dan satu metode analisis, kurang menyediakan gambaran menyeluruh terhadap kekuatan stabilitas, dan kualitas. [11]

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai kuantitas *Chatter* yang dihasilkan dengan pahat sudut *Helix Normal* 30^0 menggunakan arah strategi pemakanan *pocket milling*. Metode yang digunakan penelitian ini yaitu eksperimental, dimana penelitian dilakukan dengan menetapkan variabel dalam kondisi yang terkontrol dan terikat (*controlled and bound conditions*) sehingga dapat diketahui pengaruh antar variabel. Variabel bebas (*Independent Variables*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 1. Metode Penelitian

Kategori	Parameter/Detail	Keterangan / Peran dalam Penelitian
Tujuan Utama	Menentukan nilai kuantitas *Chatter* (getaran)	Untuk mengidentifikasi pengaruh parameter permesinan terhadap kestabilan proses potong.
Metode Penelitian	Eksperimental	Dilakukan dalam kondisi terkontrol dan terikat (*controlled and bound*).
Material Uji	*ASTM Stainless Steel 304*	Benda kerja yang diproses.
Tools	*EndMill* dengan *Normal Helix Angle* 30^0	Perkakas yang digunakan, menjadi Variabel Kontrol.
Standar Pengujian	*ISO 1997*	Standar untuk pengujian Kekasaran Permukaan.

Proses Permesinan	*CNC Milling Pocket*	Jenis mesin dan metode pemakanan yang digunakan.
Variabel Kontrol	Kecepatan Potong (*Cutting Speed*): 80 mm/menit	Dipertahankan konstan selama pengujian.
Variabel Bebas (Input)	1. Kedalaman Potong (DoC): 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2 mm	Variabel yang diubah-ubah secara sistematis.
	2. Arah Lintasan: *Zig-Zag* dan Satu Arah (*One Way*)	Variabel yang diubah-ubah secara sistematis.
	3. Kecepatan *Spindel*: 2000, 2250, 2500, 2750 RPM	Variabel yang diubah-ubah secara sistematis.
Variabel Terikat (Output)	1. Kuantitas *Chatter* (*Amplitudo* & *Spektrum* Frekuensi Getaran)	Output utama yang diukur (melalui *Akselerometer*).
	2. Kekasaran Permukaan R_a	*Output* sekunder, diukur pada spesimen dengan *chatter* maksimum / terbaik.

Variabel terikat (*Dependent Variable*) utama adalah kuantitas *Chatter* (diukur sebagai amplitudo dan spektrum frekuensi getaran). Material uji yang digunakan adalah Baja Tahan Karat ASTM 304 (*ASTM Stainless Steel 304*). Selain itu, data nilai kekasaran permukaan (*Surface Roughness*), juga diambil dari setiap spesimen yang mengalami nilai *chatter* maksimum pada setiap variabel.

Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah: perkakas *Sudut Helix Normal* 30^0 yang digunakan untuk pengujian pemakanan, dengan kecepatan pemotongan (*cutting speed*) 80 mm/menit. Standar pengujian yang digunakan untuk pengujian kekasaran permukaan adalah ISO 1997.

4. PERALATAN DAN MATERIAL PENELITIAN

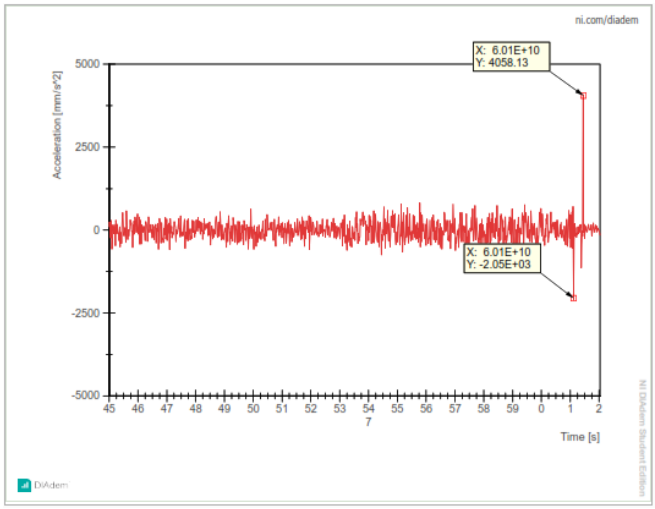
Dalam penelitian ini, benda kerja (*workpiece*) yang digunakan adalah Baja Tahan Karat 304 yang akan diproses dengan metode pemakanan *Pocket Zig-Zag* dan Satu Arah menggunakan proses permesinan *CNC Milling*.Perkakas Potong (*Cutting Tool*) yang digunakan adalah perkakas *EndMill* dengan Sudut *Helix Normal* 30^0 (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2). Prosedur Pengujian: Spesimen yang telah disiapkan dipasang pada cekam (*chuck*) mesin milling CNC. Dilanjutkan dengan penentuan metode arah pemakanan *Pocket* (*Zig-Zag* dan *One way*), variasi kecepatan *spindel*, dan kedalaman potong. Pemasangan sensor *Akselerometer* pada cekam perkakas (*tools chuck*). Sensor dihubungkan ke *mikrokontroler Arduino Uno*, yang kemudian terhubung ke komputer melalui program *Labview 2015 SP*. Data getaran diproses lebih lanjut melalui perangkat lunak *DIAdem 2020 SP*.

Tabel 2. Peralatan Dan Material

FUNGSI	ALAT	PERANGKAT LUNAK
Pengambilan Data Getaran	Sensor *Akselerometer* (dipasang pada *tool chuck*)	*Labview 2015 SP*
Mikrokontroler	*Arduino Uno*	N/A
Pemrosesan Data Getaran	N/A	*DIAdem 2020 SP*
Pengukuran Kekasaran Permukaan	*Mitutoyo-SJ-210*	N/A

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini, didapat benda kerja (*workpiece*) yang digunakan Baja Tahan Karat *Stainless Steel 304* yang akan diproses dengan metode pemakanan *Pocket Zig-Zag* dan Satu Arah menggunakan proses permesinan *CNC Milling*. Perkakas Potong (*Cutting Tool*) yang digunakan adalah perkakas *EndMill* dengan Sudut *Helix* Normal. Tahapan prosedur pengujian: Spesimen yang telah disiapkan dipasang pada cekam (*chuck*) mesin *milling CNC*. Dilanjutkan dengan penentuan metode arah pemakanan *Pocket Milling*, variasi kecepatan spindel, dan kedalaman potong. Pemasangan sensor *Akselerometer* pada cekam perkakas (*tools-chuck*).



Gambar 1. Hasil Pahat *Normal Helix Angle* (DOC 1,2 mm, *Zig-Zag*) *High chatter velue* 4058 mm/s^2

Tabel 3. Arah Pemakanan *One Way*

SPINDLE SPEED	*DEPTH OF CUT*				
	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
2000	ʌ	ʌ	ʌ	×	-
2250	ʌ	×	-	-	-
2500	ʌ	ʌ	ʌ	×	-
2750	ʌ	ʌ	ʌ	×	-

Tabel 4. Arah Pemakanan *Zig-Zag*

SPINDLE SPEED	*DEPTH OF CUT*				
	0,4	***0,8***	***1,2***	***1,6***	***2,0***
2000	ʌ	ʌ	ʌ	×	-
2250	ʌ	×	-	-	-
2500	ʌ	ʌ	×	-	-
2750	ʌ	ʌ	ʌ	×	-

5.1. Perbandingan Metode *One Way* vs *Zig-Zag*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pemakanan *One Way* (Satu Arah) memiliki performa yang lebih baik dibandingkan metode *Zig-Zag*.

- Meskipun perbedaannya tipis (*marginally outperforms*), metode *One Way* menghasilkan area pemotongan yang lebih stabil atau disebut dengan *Chatter Free Area* yang lebih luas dibandingkan *Zig-Zag*.

5.2. Titik Terjadinya Fenomena *Chatter* Terparah

Diskusi tersebut menyoroti bahwa pada parameter tertentu, kedua metode tetap mengalami *chatter* (getaran berlebih). Fenomena ini muncul secara signifikan pada:

- *Spindle Speed*: 2750 RPM
- *Depth of Cut* (DoC): 1,6 mm, Pada titik ini, baik *Zig-Zag* maupun *One Way* sama-sama menunjukkan ketidak stabilan, namun analisis sinyal dilakukan untuk membandingkan karakteristik keduanya.

5.3. Keunggulan Parameter 2500 RPM

Data menunjukkan bahwa pada *Spindle Speed* 2500 RPM dengan kecepatan pemakanan (*feed rate*) 80 mm/menit:

- Metode *One Way* menghasilkan nilai *domain* waktu-akselerasi (*Acceleration-Time Domain*) yang lebih kecil dari pada *Zig-Zag*.
- Artinya, pada kecepatan ini, metode *One Way* jauh lebih halus dan minim getaran.

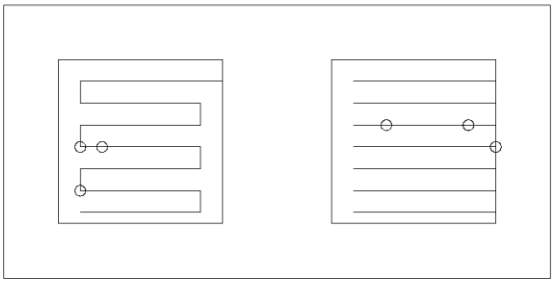
5.4. Mengapa *One Way* Lebih Stabil

Diskusi tersebut menjelaskan alasan teknis mengapa arah pemakanan memepengaruhi getaran:

- Posisi Mata Potong: Perbedaan arah gerakan memengaruhi posisi kontak mata potong dengan material.
- Variasi *Tooth Passing Frequency*: Perbedaan arah ini menyebabkan variasi pada frekuensi gigi pahat saat menyentuh benda kerja. Variasi frekuensi ini justru membantu "memutus" siklus getaran sehingga mencegah akumulasi resonansi yang menyebabkan *chatter*.
- Kestabilan Pergeseran Akselerasi: Pada metode *One Way*, pergeseran akselerasi (*acceleration shifting*) jauh lebih stabil tanpa adanya lonjakan (*spike/peaks*) yang tajam.

5.5. Pengaruh Gaya Pemotongan (*Cutting Force*)

Diskusi menyimpulkan bahwa *chatter* sangat dipengaruhi oleh Gaya Pemakanan atau *Cutting Force*. Pada metode *Zig-Zag*, sering terjadi lonjakan akselerasi yang tidak stabil saat berpindah lintasan, sedangkan pada *One Way*, gaya pemotongan cenderung lebih konsisten sehingga menghasilkan proses yang lebih stabil.

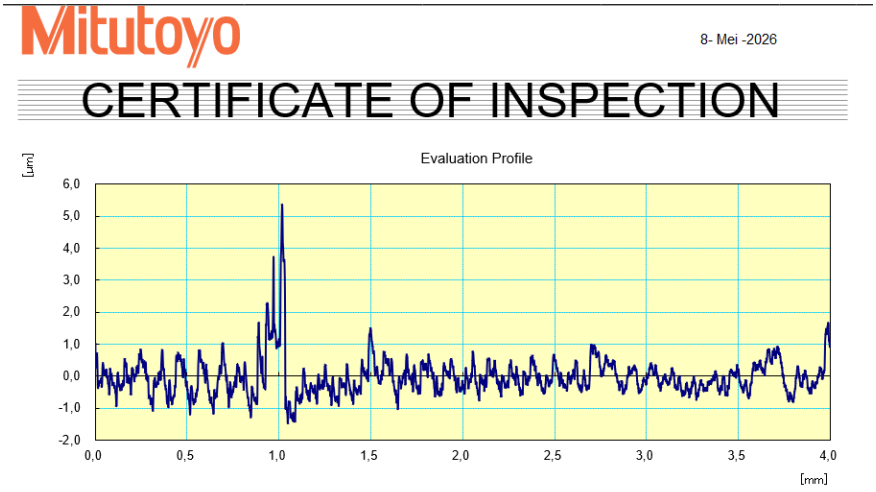


Gambar 2. Point Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

5.6. Identifikasi Area Kasar Melalui Lonjakan (*Spike*) Getaran

Hasil data menunjukkan bahwa area yang paling kasar pada benda kerja diidentifikasi melalui grafik *Acceleration-Time Domain*.

- Indikator utamanya adalah lonjakan (*spike*) tertinggi pada grafik akselerasi.
- Secara teknis, lonjakan akselerasi yang tinggi menandakan terjadinya *Large Cutting Tool Displacement*. Semakin besar getaran / pergeseran alat potong, maka nilai kekasaran permukaannya akan semakin tinggi.



Gambar 3. Point Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

5.7. Sinkronisasi Data Sinyal dengan Desain 3D

Peneliti menggunakan metode yang sangat spesifik untuk menentukan lokasi tepat di mana kekasaran tersebut terjadi:

- Menentukan Waktu: Mencatat waktu eksak saat lonjakan (*spike*) tertinggi muncul pada grafik akselerasi.

- Pemetaan Koordinat: Waktu tersebut kemudian dikombinasikan dengan simulasi pada *Software Mastercam 2018 Trial 3D*.
- Hasil: Peneliti dapat menentukan titik koordinat (X, Y) yang akurat pada benda kerja yang sesuai dengan waktu terjadinya getaran tinggi tersebut.

5.8. Penentuan Titik Sampel Pengujian

Berdasarkan analisis tersebut, ditentukanlah 3 titik utama untuk pengujian kekasaran permukaan:

- Ketiga titik ini dipilih karena memiliki nilai akselerasi tertinggi dibandingkan titik lainnya.
- Peneliti berasumsi bahwa ketiga titik koordinat inilah yang mewakili kondisi permukaan "terkasar" pada spesimen hasil permesinan.
- Posisi lokasi sampel ini dapat divalidasi dengan melihat referensi pada Gambar 2 dan untuk hasil kekasaran pada Gambar 3.

6. KESIMPULAN

Penelitian ini awalnya bertujuan membandingkan efektivitas pahat NHA dalam mengendalikan *regenerative chatter* pada proses *CNC pocket milling Stainless Steel 304*. Namun, sebagian besar bagian metode dan hasil yang disajikan dalam dokumen yang tersedia berfokus pada analisis pahat *Normal Helix Angle* (NHA) 30° dengan membandingkan dua arah pemakanan (*toolpath feeding direction*): *One Way* (Satu Arah) dan *Zig-Zag*. Perbandingan Arah Pemakanan (*Toolpath*), Keunggulan *One Way*: Metode pemakanan *One Way* menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan metode *Zig-Zag*, *Chatter Free Area*: Metode *One Way* menghasilkan area pemotongan yang lebih stabil lebih luas dibandingkan *Zig-Zag*, meskipun perbedaannya tipis (*marginally outperforms*), Analisis Getaran: Pada kecepatan *Spindle Speed* 2500 RPM, metode *One Way* menghasilkan nilai *Acceleration-Time Domain* yang lebih kecil dari pada *Zig-Zag*, mengindikasikan proses yang jauh lebih halus dan minim getaran pada kecepatan tersebut, Stabilitas Gaya Potong: Metode *One Way* lebih stabil karena menghasilkan gaya pemotongan (*cutting force*) yang cenderung lebih konsisten dan pergeseran akselerasi (*acceleration shifting*) yang lebih stabil, tanpa lonjakan tajam (*spike/peaks*) yang sering terjadi pada *Zig-Zag* saat berpindah lintasan, Titik *Chatter* Terparah: Kedua metode sama-sama menunjukkan ketidak stabilan signifikan pada parameter *Spindle Speed* 2750 RPM dan *Depth of Cut* (DoC) 1,6 mm.

Kualitas Permukaan (*Surface Roughness*), Indikator Kekasaran: Area yang paling kasar pada benda kerja diidentifikasi melalui lonjakan (*spike*) tertinggi pada grafik *Acceleration-Time Domain*, Korelasi Getaran dan Kekasaran: Lonjakan akselerasi yang tinggi menunjukkan terjadinya pergeseran alat potong (*Large Cutting Tool Displacement*) yang besar, yang secara langsung berkorelasi dengan nilai kekasaran permukaan yang semakin tinggi, Metode Pengukuran: Peneliti menggunakan kombinasi pencatatan waktu lonjakan akselerasi dengan simulasi *Mastercam* 2018 *Trial* 3D untuk memetakan secara akurat titik koordinat (X, Y, Z) pada benda kerja yang sesuai dengan waktu terjadinya getaran tinggi, yang kemudian dijadikan 3 titik sampel untuk pengujian kekasaran permukaan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Y. Zaira and A. Wijianto, "Analisa Getaran Mesin Milling Vertikal 1108 Terhadap Pengaruh Variasi Kedalaman Potong," *J. Politek. Caltex Riau*, vol. 6, no. 1, pp. 42–50, 2020.

[2] S. Mulyadi, "Pengaruh Kecepatan Potong, Gerak Makan Dan Ketebalan Pemotongan Terhadap Getaran Benda Kerja Pada Proses Sekrap," 2012.

[3] F. A. Hardinsi, O. Novareza, and A. A. Sonief, "Pengaruh Geometri Pahat Variabel Helix Angle Pada Parameter Mesin Cnc Milling Vertikal Berbasis Mikrokontroler Terhadap Nilai Getaran Chatter," *JAMI J. Ahli Muda Indones.*, vol. 1, no. 2, pp. 62–71, 2020, doi: 10.46510/jami.v1i2.31.

[4] Widarto, Sutopo, and Paryanto, "Teknik Permesinan," *Direktorat Pembin. Sekol. Menengah Kejuru.*, p. 620, 2008.

[5] R. M. Ratlalan, "Variasi Kecepatan Putaran Dan Kedalaman Gaya Potong Mesin Bubut Gedee Weiler LZ 330 G Terhadap Permukaan Baja Karbon ST 37," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 3, pp. 113–120, 2019.

[6] F. Tehranizadeh, K. Rahimzadeh Berenji, and E. Budak, "Dynamics and chatter stability of crest-cut end mills," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 171, no. October, p. 103813, 2021, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103813.

[7] Z. Nie, R. Lynn, T. Tucker, and T. Kurfess, "Voxel-based analysis and modeling of MRR computational accuracy in milling process," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 27, pp. 78–92, 2019, doi: 10.1016/j.cirpj.2019.07.003.

[8] V. Paliwal and N. R. Babu, "Prediction of stability boundaries in milling by considering the variation of dynamic parameters and specific cutting force coefficients," *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 183–188, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.026.

[9] P. Bari, M. Law, and P. Wahi, "Comparative analysis of cutting forces and stability of standard and nonstandard profiled serrated end mills," *Procedia CIRP*, vol. 101, pp. 114–117, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2021.02.014.

[10] G. Quintana, J. Ciurana, I. Ferrer, and C. A. Rodríguez, "Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 3–4, pp. 203–211, 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.11.008.

[11] S. Jiang, D. Zhan, Y. Liu, Y. Sun, and J. Xu, "Modeling of variable-pitch/helix milling system considering axially varying dynamics with cutter runout offset and tilt effects," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 168, no. August 2021, p. 108674, 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108674.