



Analisis Komparatif Efektivitas Pahat *Variable Helix Angle* (VHA) dan *Normal Helix Angle* (NHA) untuk Pengendalian *Regenerative Chatter* pada Pemesinan *CNC Milling Stainless Steel 304*

Venusa Abriandika^{1*}, Ansor Salim Siregar², Agung Fauzi Hanafi³ Indra Adi Saputra⁴

^{1,2} Teknik Mesin Rekayasa Manufaktur, Politeknik Negeri Banyuwangi

³ Teknik Mesin Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Banyuwangi

⁴ Teknik Mesin, Politeknik Negeri Pontianak

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

Abstract

This study compares the effectiveness of Variable Helix Angle (VHA) and Normal Helix Angle (NHA) end mills in controlling regenerative chatter during CNC milling of stainless steel 304. Experiments were conducted across a range of cutting parameters, including cutting speed, feed per tooth, and axial depth of cut, using VHA and NHA tools with identical basic geometries except for the helix angle. Measurements were obtained for vibration signals using an accelerometer, machined surface roughness (Ra), and tool wear. Signal analyses, including Fast Fourier Transform (FFT) and Power Spectral Density (PSD), experimental construction of stability lobe diagrams, and statistical evaluation using ANOVA, were employed to assess the influence of helix angle on stability limits and surface quality. The results are expected to determine whether VHA tools offer significant improvements in chatter suppression and expand the stable cutting region compared to NHA tools, as well as their implications for productivity and tool life when machining SS304. The findings provide practical recommendations for selecting cutter geometry in industrial applications where regenerative chatter poses a critical challenge.

Keywords: Chatter, Variable Helix Angle (VHA), Normal Helix Angle (NHA), fast fourier transform (FFT), and stability lobe diagram (SLD).

Abstrak

Penelitian ini membandingkan efektivitas pahat dengan *Variable Helix Angle* (VHA) dan *Normal Helix Angle* (NHA) dalam mengendalikan fenomena *regenerative chatter* pada proses pemesinan *CNC milling stainless steel 304*. Eksperimen dilakukan pada serangkaian parameter potong (kecepatan potong, feed per tooth, kedalaman pemotongan) menggunakan pahat VHA dan NHA yang setara secara geometri dasar selain sudut heliks. Pengukuran dilakukan terhadap sinyal getaran (akselerometer), permukaan hasil (Ra), dan keausan pahat. Analisis sinyal (FFT dan PSD), pembuatan *stability lobe diagram* eksperimental, serta analisis statistik (*ANOVA*) digunakan untuk menilai pengaruh *helix angle* terhadap rentang stabilitas dan kualitas permukaan. Hasil diharapkan menunjukkan apakah VHA memberikan perbaikan signifikan dalam peredaman *chatter* dan memperluas area operasi stabil dibandingkan NHA, serta implikasinya terhadap produktivitas dan umur pahat dalam pemesinan SS 304. Temuan ini memberikan rekomendasi praktis untuk pemilihan geometri pahat pada aplikasi industri yang rentan terhadap *chatter regeneratif*.

Kata Kunci: Getaran, *Variable Helix Angle* (VHA), *Normal Helix Angle* (NHA), *Fast Fourier Transform* (FFT), and *Stability Lobe Diagram* (SLD).

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 industri otomotif, alat kesehatan, energi, dan permesinan karena ketahanan korosi serta kekuatan mekaniknya yang baik. Namun, sifat *work-hardening* yang tinggi dan kecenderungan menghasilkan gaya potong besar menyebabkan SS304 sering menimbulkan permasalahan *vibrasi* selama proses pemotongan. 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 pemesinan.

Regenerative chatter dapat menurunkan kualitas permukaan, mengurangi umur pahat, meningkatkan konsumsi energi, menimbulkan kebisingan, dan bahkan menyebabkan kegagalan proses pemotongan. 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 salah satu metode yang paling efektif dan mudah diterapkan, karena perubahan bentuk pahat dapat langsung memengaruhi dinamika gaya potong dan energi getaran yang terbentuk selama pemesinan.

Salah satu aspek geometri pahat yang berpengaruh besar terhadap stabilitas pemotongan adalah sudut heliks (*helix angle*). Pahat dengan *Normal Helix Angle* (NHA) merupakan tipe yang paling umum digunakan dan memiliki sudut heliks konstan pada seluruh *flute*. Namun, geometri ini tidak selalu mampu meredam getaran pada kondisi pemotongan tertentu, terutama saat melakukan pemesinan material keras seperti SS304. Sebaliknya, pahat dengan *Variable Helix Angle* (VHA) dirancang dengan sudut heliks yang bervariasi, sehingga menghasilkan fase pemotongan yang tidak seragam antar-*flute*. Perbedaan fase ini terbukti dapat memecah ritme gaya potong, mengurangi amplitudo getaran, dan meningkatkan area operasi stabil.

Meskipun pahat VHA telah banyak dipromosikan sebagai solusi untuk meningkatkan stabilitas pemotongan, kajian eksperimental yang secara langsung membandingkan performanya dengan pahat NHA dalam konteks pengendalian *regenerative chatter* pada pemesinan *CNC milling SS 304* masih terbatas. Penelitian yang terukur dan 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 *Variable Helix Angle* (VHA) dan *Normal Helix Angle* (NHA) dalam mengendalikan *regenerative chatter* pada proses *CNC milling Stainless Steel 304*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai pengaruh variasi 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*, 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]
- 2.1.3. Namun, keakuratan SLD klasik bisa terbatas, terutama jika dinamika struktur mesin berubah karena keausan, fleksibilitas *tool-holder*, kecepatan pemotongan, dll. Sebuah penelitian baru menyarankan pendekatan adaptif dan kuantifikasi ketidakpastian untuk parameter modal sistem 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 strategi untuk meningkatkan stabilitas *milling*. Variasi *helix/pitch* dapat “memecah” harmonisa *tooth-passing*, sehingga mengurangi resonansi yang memicu *chatter*. [1], [2]
- 2.2.2. Studi simulasi menunjukkan bahwa dengan distribusi *pitch/helix* variabel, stres dan deformasi pada pahat dapat dikurangi artinya, *rigidity* dan kekakuan struktural dapat dijaga lebih baik berpotensi mengurangi getaran. [4]
- 2.2.3. 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 vs NHA dalam Berbagai Material & Kondisi Milling
 - 2.3.1. Dalam penelitian khusus 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*” menemukan bahwa pahat VHA secara signifikan menurunkan amplitudo getaran dan memperbaiki kualitas permukaan dibandingkan pahat NHA. [6]
 - 2.3.2. Penelitian lain menggunakan aluminium sebagai material pahat dengan *Variable Helix Angle* dibandingkan dengan pahat *helix reguler*. Hasil menunjukkan bahwa alat VHA menghasilkan kontrol *chatter* yang lebih baik (area stable lebih luas) menurut analisis SLD. [3]
 - 2.3.3. Pada *slot-milling* dan *milling* vertikal berbasis mikrokontroler dengan material SS304, telah dilaporkan bahwa pahat VHA (misalnya *helix* 35/38°, 40/42°) menghasilkan “*chatter-free region*” (daerah bebas *chatter*) yang lebih besar 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 (misalnya menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Power Spectral Density* (PSD)) terbukti efektif dalam mendeteksi frekuensi *chatter* dominan dan membedakan kondisi stabil vs tidak stabil. [8]
 - 2.4.2. Kombinasi analisis sinyal eksperimen untuk membangun SLD eksperimental memungkinkan verifikasi kondisi stabilitas sesuai parameter empiris hal ini penting terutama untuk sistem nyata yang kompleks. Studi mahasiswa di kampus menunjukkan bahwa SLD dengan *helix variabel* berbeda batas “*chatter-free*” dibanding *helix reguler*. [9][10]
 - 2.4.3. Di sisi metode modern, literatur terkini menunjukkan perkembangan: misalnya pendekatan berbasis data / sensor *machine learning* untuk estimasi SLD secara online dan penyesuaian parameter potong secara adaptif, dengan tujuan mendeteksi & mengendalikan *chatter* secara *real-time*. [8]
- 2.5. Celah Penelitian & Alasan bagi Studi Ini
 - 2.5.1. Meskipun ada sejumlah studi mengenai VHA vs NHA pada berbagai material (aluminium, baja, *stainless steel*), literatur yang khusus membandingkan kinerja pada SS304 dengan parameter potong variatif, analisis spektrum, SLD eksperimental, keausan pahat, dan kualitas permukaan secara komprehensif masih relatif terbatas.
 - 2.5.2. Banyak penelitian menggunakan pahat VHA namun terbatas pada satu jenis parameter potong atau satu metode analisis (misalnya hanya *roughness*, atau hanya getaran), kurang menyediakan gambaran menyeluruh terhadap stabilitas, kualitas, dan aspek *tool-life* secara simultan.
 - 2.5.3. Sebagian besar literatur klasik mengenai SLD dan *chatter* masih memakai model linier dengan asumsi ideal sedangkan kondisi nyata (keausan pahat, dinamika mesin, variasi geometri) cenderung non-ideal. Studi modern menunjukkan bahwa pendekatan adaptif / empiris data driven diperlukan untuk meningkatkan reliabilitas prediksi. [11]

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan nilai kuantitas *Chatter* (getaran) yang dihasilkan oleh perkakas dengan sudut *Helix Normal* (*Normal Helix Angle*) 30⁰ menggunakan arah lintasan pemakanan (*Toolpath Feeding Direction*) *Zig-Zag* dan Satu Arah (*One Way*). Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental, di mana penelitian dilakukan dengan menetapkan variabel tertentu 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 <i>Chatter</i> (getaran) | Untuk mengidentifikasi pengaruh parameter permesinan terhadap kestabilan proses potong. |
| Metode Penelitian | Eksperimental | Dilakukan dalam kondisi terkontrol dan terikat (<i>controlled and bound</i>). |
| Material Uji | <i>ASTM Stainless Steel 304</i> | Benda kerja yang diproses. |
| Tools | <i>EndMill</i> dengan <i>Normal Helix Angle</i> 30 ⁰ | Perkakas yang digunakan, menjadi Variabel Kontrol. |
| Standar Pengujian | <i>ISO 1997</i> | Standar untuk pengujian Kekasaran Permukaan. |
| Proses Permesinan | <i>CNC Milling</i> (Pemakanan <i>Pocket Zig-Zag</i> dan <i>One Way</i>) | Jenis mesin dan metode pemakanan yang digunakan. |
| Variabel Kontrol | Kecepatan Potong (<i>Cutting Speed</i>): 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: <i>Zig-Zag</i> dan Satu Arah (<i>One Way</i>) | Variabel yang diubah-ubah secara sistematis. |
| | 3. Kecepatan <i>Spindel</i> : 2000, 2250, 2500, 2750 RPM | Variabel yang diubah-ubah secara sistematis. |
| Variabel Terikat (Output) | 1. Kuantitas <i>Chatter</i> (<i>Amplitudo & Spektrum</i> Frekuensi Getaran) | Output utama yang diukur (melalui <i>Akselerometer</i>). |
| | 2. Kekasaran Permukaan <i>Ra</i> | Output sekunder, diukur pada spesimen dengan <i>chatter</i> 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 30⁰* yang digunakan untuk pengujian pemakanan, dengan kecepatan pemotongan (*cutting speed*) 80 mm/menit. Standar pengujian yang digunakan untuk pengujian kekasaran permukaan adalah ISO 1997.

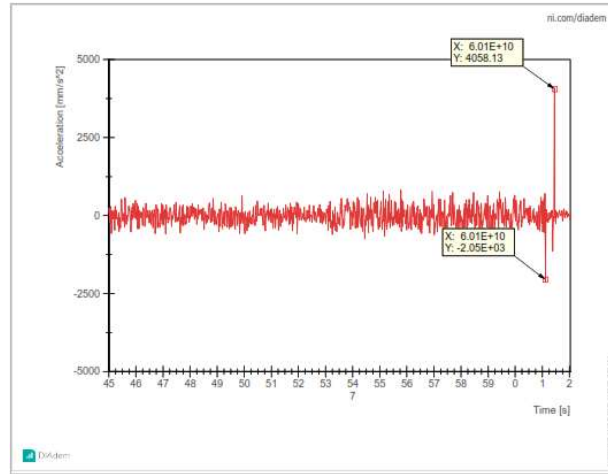
4. Peralatan dan Material Penelitian

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 30⁰* (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 (*tool 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*.

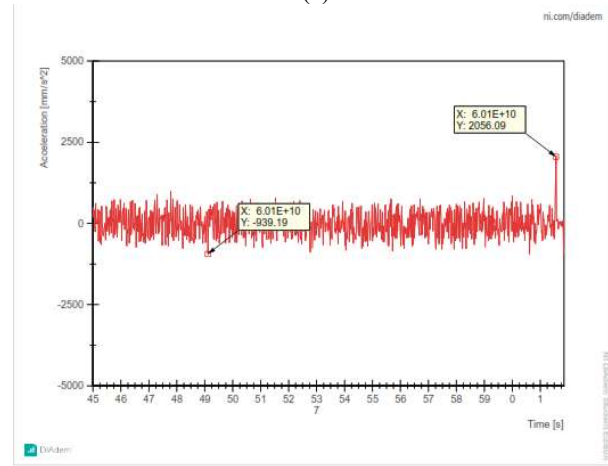
Tabel 2. Peralatan Dan Material

| FUNGSI | ALAT | PERANGKAT LUNAK |
|--------------------------------|--|------------------------|
| PENGAMBILAN DATA GETARAN | Sensor <i>Akselerometer</i> (dipasang pada <i>tool chuck</i>) | <i>Labview 2015 SP</i> |
| MIKROKONTROLER | <i>Arduino Uno</i> | N/A |
| PEMROSESAN DATA GETARAN | N/A | <i>DIAdem 2020 SP</i> |
| PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN | <i>Mitutoyo-SJ-210</i> | N/A |

5. HASIL DAN PEMBAHASAN



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Hasil Pahat Normal Helix Angle (DOC 1,2 mm, Zig-Zag) High chatter value 4058 mm/s²; (b) Hasil Pahat Variable Helix Angle (DOC 1,2 mm, Zig-Zag) High chatter value 2056 mm/s²

Tabel 3. Arah Pemakanan One Way

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

Tabel 3. Arah Pemakanan Zig-Zag

| SPINDLE SPEED | DEPTH OF CUT | | | | |
|------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| 2000 | Λ | Λ | Λ | × | - |

| | | | | | |
|------|---|---|---|---|---|
| 2250 | Λ | × | - | - | - |
| 2500 | Λ | Λ | × | - | - |
| 2750 | Λ | Λ | Λ | × | - |

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 menyoroiti 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.

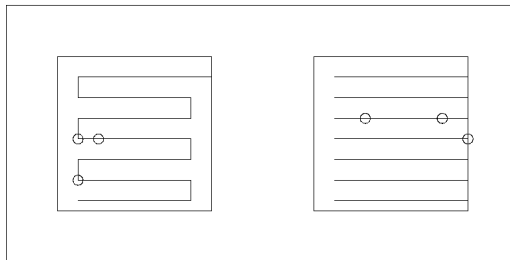
5.4. Mengapa *One Way* Lebih Stabil

Diskusi tersebut menjelaskan alasan teknis mengapa arah pemakanan memengaruhi 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 pergeseran alat potong yang besar (*Large Cutting Tool Displacement*). Semakin besar getaran/pergeseran alat potong, maka nilai kekasaran permukaannya akan semakin tinggi.

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*) akselerasi tertinggi muncul pada grafik.
- Pemetaan Koordinat: Waktu tersebut kemudian dikombinasikan dengan simulasi pada *Software Mastercam 2018 Trial 3D*.
- Hasil: Peneliti mendapatkan titik koordinat (X, Y, Z) 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.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini awalnya bertujuan membandingkan efektivitas pahat VHA dan NHA dalam mengendalikan *regenerative chatter* pada proses *CNC milling Stainless Steel 304*. Namun, sebagian besar bagian metodologi 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 (*Chatter Free Area*) yang 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 Pembina. 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.ijmactools.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.ijmactools.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.ymsp.2021.108674.