



## Pengaruh Variasi Kecepatan Rotasi Spindle terhadap Gaya Potong dan Frekuensi Karakteristik Proses Bubut

Agus Susanto<sup>1\*</sup>, Ramadhana Eka Wicaksono<sup>2</sup>, Mohammad Erik Echsony<sup>3</sup>, Rahayu Mekar Bisono<sup>4</sup>, Putri Hana Widyaning Mudmainah<sup>5</sup>, Risma Alfiyani<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Politeknik Negeri Madiun, Madiun  
Email: agus\_eng.dept@pnm.ac.id

Received : 1 April 2024; Received in revised form : 26 April 2024; Accepted: 11 Juni 2024

### Abstract

*Cutting forces analysis of turning process are one of the mandatory lecture contents given in mechanical and manufacturing department. It is because they are related to the quality of the product produced. Therefore, being able to observe and interpret cutting forces can provide an overview of machining quality of the machine. This experimental research explored the effect of spindle rotational speed on cutting process using a full octagonal shaped rings dynamometer made in the laboratory. The results showed that increasing the spindle rotation speed affected the cutting time, whether the greater the spindle rotational speed used, the faster the turning process were completed, each of which is 312.5; 156.25; and 112 seconds. However, variational of spindle rotational speed did not affect the cutting forces of turning process even though the cutting force graph showed fluctuations. Those are due to the dynamics of the machining process. Spindle rotational speed also influenced the frequency content of the process. Various characteristic frequencies of the turning process could be observed, including the spindle rotation frequency ( $f_s$ ) and harmonic frequencies.*

**Keywords:** turning process, cutting forces, dynamometer, spindle rotational speed, frequencies

### Abstrak

Analisis gaya potong pada proses bubut merupakan salah-satu muatan perkuliahan wajib yang diberikan di jurusan teknik mesin dan manufaktur karena berhubungan dengan kualitas produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, dapat mengobservasi dan menginterpretasikan gaya potong yang sedang terjadi dapat memberikan gambaran kualitas pemesinan pemesinan. Penelitian eksperimental ini mengeksplorasi pengaruh kecepatan rotasi *spindle* terhadap proses pemotongan menggunakan dinamometer *full octagonal shaped ring* yang dibuat di laboratorium. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan rotasi *spindle* mempengaruhi waktu pemotongan dimana semakin besar nilai kecepatan rotasi *spindle* yang digunakan semakin cepat pula proses bubut selesai, yang masing-masing adalah 312,5 detik; 156,25 detik; dan 112 detik. Namun, variasi kecepatan rotasi *spindle* tidak mempengaruhi nilai gaya potong proses bubut meskipun terlihat grafik gaya potong berfluktuasi. Hal ini diakibatkan adanya dinamika proses pemesinan. Kecepatan rotasi spindle juga berpengaruh terhadap kandungan frekuensi proses bubut. Berbagai frekuensi karakteristik proses bubut dapat diobservasi, diantaranya frekuensi rotasi *spindle* ( $f_s$ ) dan frekuensi harmoniknya.

**Kata kunci:** proses bubut, gaya potong, dinamometer, kecepatan rotasi spindle, frekuensi proses bubut

## 1. PENDAHULUAN

Diantara proses pemesinan, pembubutan merupakan proses yang paling umum dan secara luas digunakan dalam berbagai industri, misalnya digunakan dalam proses pembentukan komponen otomotif dan keretaapi [1]. Oleh karenanya, proses bubut menjadi salah-satu muatan perkuliahan yang wajib diberikan pada program studi teknik mesin ataupun manufaktur [2], [3]. Dalam proses pembelajarannya, gaya potong dijelaskan setelah pembelajaran mengenal parameter-parameter proses bubut, misalnya kecepatan rotasi *spindle*, laju pemakanan, kecepatan potong, kecepatan pemakanan dan lain sebagainya. Hal ini karena gaya potong merupakan variabel utama untuk memonitoring kondisi proses bubut yang berimplikasi terhadap sukses atau tidaknya proses pembuatan produk [4], [5]. Susanto, dkk. [4] mengkaji pengaruh kecepatan rotasi spindle terhadap gaya potong pada proses frais aluminium paduan menggunakan perhitungan matematis dan kemudian korelasi dua parameter tersebut disimulasikan dalam grafik. Diartikel yang lainnya [5], Susanto, dkk. [5] mensimulasikan kuantitas dan kualitas gaya potong pada proses bubut Inconel 718 akibat kecepatan rotasi spindle tertentu menggunakan metode finite elemen (*finite element method*). Selain itu, gaya potong juga berhubungan erat dengan getaran, deformasi, dan temperatur pemotongan selama proses pemesinan yang mempengaruhi keausan pahat [6], [7]. Oleh karena itu, dapat mengobservasi dan menginterpretasikan gaya potong yang sedang terjadi dapat memberikan gambaran kualitas pemesinan pemesinan.

Gaya potong pada proses bubut umumnya diukur menggunakan dinamometer piezoelektrik yang diinstalasi pada *tool-post* ketika proses bubut sedang berlangsung [8]. Dinamometer yang digunakan secara umum adalah universal dinamometer piezoelektrik buatan Kistler Instruments (Pte) Ltd. Zheng, dkk. menggunakan dinamometer Kistler9257B untuk mengukur gaya potong pada proses bubut Titanium [8]. Fodor, dkk. mengukur gaya potong pada proses bubut pipa Aluminium paduan menggunakan Kistler dynamometer 9129AA [6]. Dinamometer Kistler 9257b juga digunakan untuk mengukur gaya potong pada proses bubut dengan benda kerja AL2024-T351 tube yang berdiameter 16-mm dengan ketebalan 1.5-mm [7].

Namun, harga dinamometer buatan Kistler Instruments (Pte) Ltd tersebut cukup mahal, yakni berkisar 860 juta rupiah [9]. Harga ini sangat mahal untuk tujuan pembelajaran atau penelitian berbasis laboratorium. Untuk mengatasi masalah harga dinamometer yang cukup mahal tersebut beberapa peneliti berusaha memproduksi dinamometer (*hand-made dynamometer*) dengan harga yang lebih terjangkau, namun tetap mempunyai akurasi dan reability yang tinggi. You, dkk. mengembangkan dinamometer berbasis *strain gauge* yang memiliki sensitivitas 0.32mV/N dan frekuensi pribadi sebesar 771 Hz untuk mengukur dan menganalisa gaya potong pada proses bubut [10]. Uquillas, dkk. mengembangkan dinamometer khusus untuk mengukur gaya potong pada proses bubut dengan teknologi *wireless transmission* [11]. M. Rizal, dkk. fokus meneliti efektifitas transduser untuk memproduksi dinamometer dengan akurasi tinggi, diantaranya menggunakan transduser berbentuk cincin octagonal [12] dan berbentuk balok silang (*cross beam*) [13].

Tujuan utama penelitian ini adalah mengobservasi gaya potong pada proses bubut akibat dari variasi kecepatan rotasi *spindle* dan pengaruhnya terhadap atribut-atribut penting proses pemesinan yang ditinjau berdasarkan analisa pemrosesan sinyal. Gaya potong tersebut diukur menggunakan dinamometer *full octagonal shaped ring* yang dibuat di laboratorium yang berbeda dengan konfigurasi dinamometer dengan yang diusulkan oleh peneliti sebelumnya, baik You, dkk. [10], Uquillas, dkk. [11], serta M. Rizal, dkk. [12,13].

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Material Benda Kerja

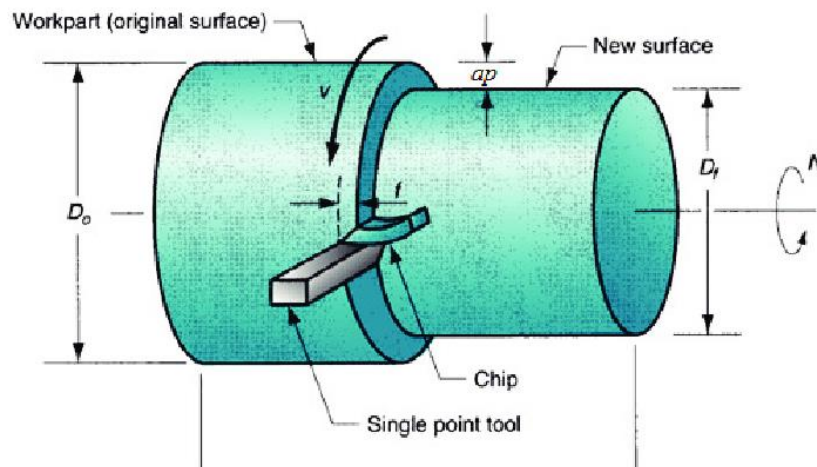
Material benda kerja yang digunakan adalah 1045 *Carbon Steel* yang luas diaplikasikan pada berbagai industri, seperti industri perkeretaapian, otomotif, dan konstruksi. Hal ini karena material ini memiliki keuletan yang tinggi, mudah di bentuk dengan mesin perkakas biasanya, seperti mesin bubut dan frais. Sifat mekanik (*mechanical properties*) material 1045 *Carbon Steel* ditampilkan pada Tabel 1. Selain itu, benda kerja berbentuk silinder yang berdiameter 25 mm dan panjang 50 mm.

Tabel 1. *Mechanical Properties Carbon Steel 1045*

Sifat - sifat	Index
Tensile Strength (MPa)	6500-800
Yield Strength (MPa)	≥ 430
Elongation sepanjang 50 mm (%)	≥ 16
Hardness (HB)	195-235

## 2.2. Pemodelan Gaya Potong pada Proses Bubut

Proses bubut (*turning process*) merupakan salah satu jenis proses pemesinan yang menggunakan pahat bermata tunggal (*single point cutting tool*) untuk menghasilkan produk berbentuk silinder, baik pada permukaan luar maupun bagian dalam. Dalam prosesnya, benda kerja dicekam oleh *chuck* yang terpasang pada *spindle* yang berotasi dan dipahat oleh pahat yang bergerak linier terhadap benda kerja sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 1. Sebagaimana yang terlihat pada gambar, terdapat beberapa variable proses, diantaranya; diameter awal ( $d_o$  dalam mm), diameter akhir ( $d_i$ , mm), panjang pemotongan ( $l$ , mm), pemakanan setiap rotasi ( $f$ , mm/putaran), sudut potong utama pahat ( $\kappa$ , °), dan kedalaman pemotongan ( $a$ , mm) kecepatan putaran spindle ( $n$ , rpm).



Gambar 1. Variabel Proses Bubut

Variable tersebut mengakibatkan terjadinya beberapa parameter proses pemotongan yang meliputi kecepatan pemotongan ( $v_c$ ), kecepatan pemakanan ( $v_f$ ), dan waktu pemotongan ( $t$ ), tebal geram ( $h$ ), lebar pemotongan ( $b$ ) yang mana masing-masing parameter proses ini dihitung pada persamaan (1) – (5).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

$$v_f = n \cdot f \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

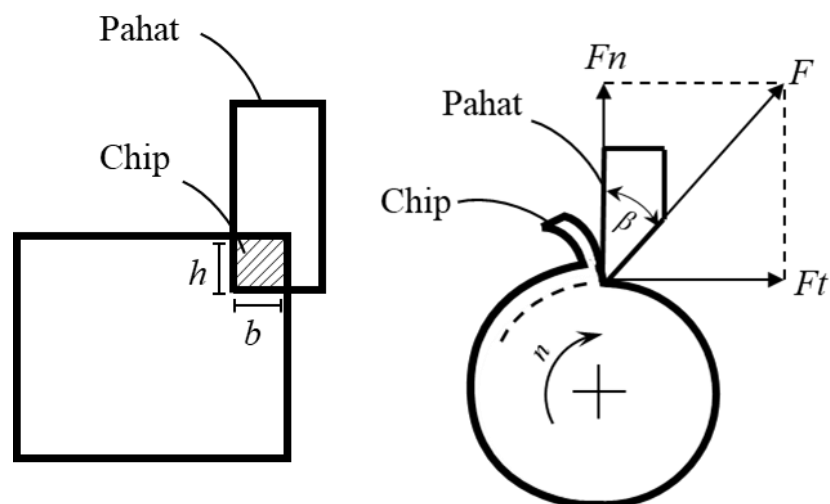
$$t = \frac{l}{v_f} \text{ (min)} \quad (3)$$

$$h = f \cdot \sin(\kappa) \text{ (mm)} \quad (4)$$

$$b = \frac{a}{\sin \kappa} \text{ (mm)} \quad (5)$$

dimana  $D$  merupakan diameter rata-rata pemotongan, dan  $\kappa$  merupakan sudut pemotongan utama pada proses bubut dimana sudut pada proses bubut miring (*oblique*) yaitu  $\alpha < 90^\circ$  dan sudut pada proses bubut tegak (*orthogonal*) yaitu  $\alpha = 90^\circ$ .

Saat proses bubut berlangsung, muncul beberapa gaya potong yang bekerja pada titik kontak pemotongan sehingga terjadi deformasi plastis yang mengakibatkan benda kerja terkelupas dalam bentuk *chip*. Beberapa gaya yang bekerja pada pemotongan *orthogonal* ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan gambar ini, gaya potong proses bubut adalah sebesar  $F$  (N) yangmana dapat diuraikan menjadi yakni gaya potong arah tangensial ( $F_t$ ) dan gaya potong arah normal ( $F_n$ ) dengan sudut potong sebesar  $\beta$  ( $^\circ$ ). Gaya potong arah tangensial bekerja dalam arah kecepatan potong ( $v_c$ ). Sedangkan gaya potong arah normal bekerja dalam arah kedalaman potong aksial. Untuk melihat dimensi *chip*, maka proses pemotongan dapat diproyeksikan sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2 disisi kiri. Terlihat bahwa dimensi *chip* terdiri-dari ketebalan ( $b$ ) dan lebar *chip* ( $h$ ) yang akan menentukan luasan *chip*, yaitu  $A = b.h$ .



Gambar 2. Gaya Potong Pada Proses Bubut *Orthogonal*

Berdasarkan penguraian gaya sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2, gaya potong arah tangensial dan arah normal masing-masing adalah;

$$F_t = K_s.A.\sin B = K_s.b.h.\sin(\beta) \quad (6)$$

dan

$$F_n = K_s.A.\cos B = K_s.b.h.\cos(\beta) \quad (7)$$

dimana ( $K_s$ ) adalah gaya potong spesifik yang nilainya tergantung pada jenis material benda kerja, geometri pahat, kecepatan potong ( $v_c$ ) dan ketebalan geram ( $h$ ). Schmitz et al. memformulasikan bahwa gaya potong pada proses bubut merupakan hasil kali antara luasan *chip* dan gaya potong spesifik ( $K_s$ ) yang dinyatakan;

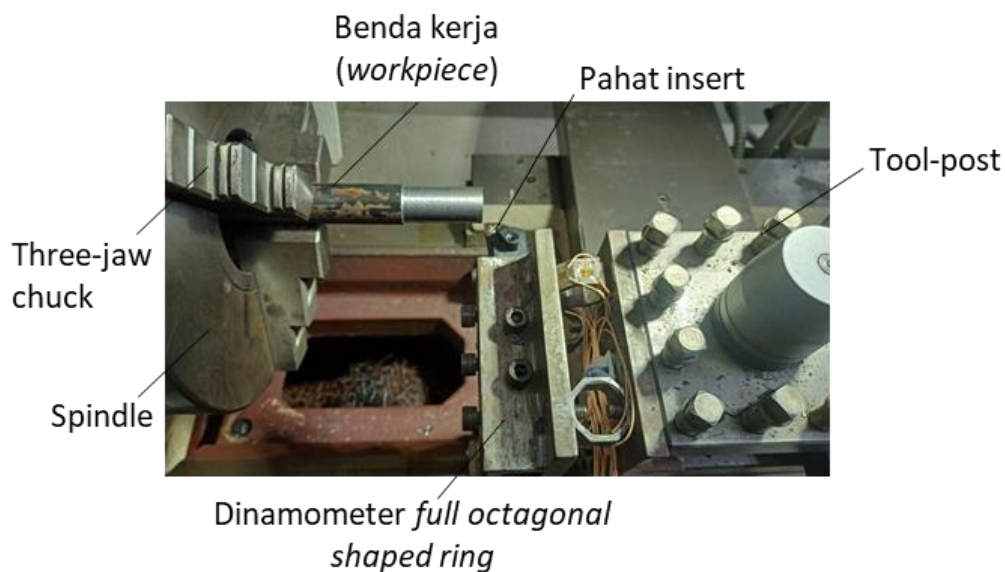
$$F = K_s.(N) \quad (8)$$

### 2.3. Uji Pemotongan pada Proses Bubut

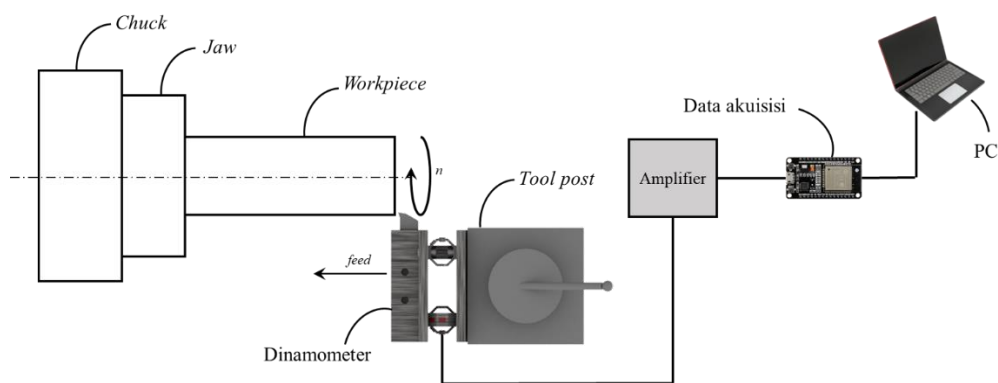
Untuk membuktikan kebenaran pendekatan secara numerik diatas, maka dilakukan pengujian pemotongan untuk mengetahui gaya potong. Oleh karena itu, dibutuhkan setup eksperimen untuk mengukur gaya potong tersebut sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Gambar 3(a) adalah setup dinamometer *full octagonal shaped ring* pada eksperimen proses bubut untuk mengukur gaya potong. Eksperimen ini dijelaskan secara memadai menggunakan *Schematic diagram* sebagaimana yang terlihat pada Gambar 3(b). Sebagaimana yang terlihat pada gambar, benda kerja (*workpiece*) dengan diameter

25,4 mm dicekam oleh cekam rahang tiga (*three jaw chucks*) pada spindle mesin bubut. Benda kerja yang berotasi dengan kecepatan rotasi spindle sebesar  $n$  (rpm) kemudian diraut oleh pahat sisipan (*inserted cutting tool*) berbahan karbida dengan kedalaman potong aksial ( $a$ ) sebesar 0,2 mm, panjang pemotongan 50 mm, dan laju pemakanan (*feed rate, f*) sebesar 0,06 mm/rev. Akibat kontak antara benda kerja dan pahat selama proses pemotongan, terjadi fluktuasi gaya potong yang mana gaya potong tersebut diukur menggunakan dinamometer yang telah dipasang pada *tool-post* mesin bubut. Gaya potong ini kemudian diperbesar oleh amplifier dan kemudian diakuisisi menggunakan oscilloscope untuk kemudian dianalisa pada tahap berikutnya.

Eksperimen dilakukan dalam tiga variasi kecepatan rotasi spindle, yaitu 160 rpm, 320 rpm, dan 450 rpm. Variasi kecepatan rotasi spindle ini akan berakibat langsung pada perubahan kecepatan potong (*cutting speed*) dan kecepatan pemakanan (*feeding speed*) sebagaimana yang dijelaskan pada Persamaan (1) dan (2). Parameter pemesinan ini ditabulasi secara rinci pada Tabel 2. Gaya potong yang terjadi diukur menggunakan dinamometer khusus untuk mengukur gaya potong pada proses bubut.



(a) Setup dinamometer full octagonal shaped ring pada eksperimen



(b) Schematic diagram pengambilan data gaya potong

Gambar 3. Eksperimen pengambilan data gaya potong pada proses bubut

Tabel 2. Parameter Proses Bubut

Parameter	Simbol dan Satuan	Variasi		
		1	2	3
Laju pemakanan ( <i>feed rate</i> )	$f$ (mm/rev)	0,06	0,06	0,06
Kedalaman potong aksial ( <i>axial depth of cut</i> )	$a$ (mm)	0,2	0,2	0,2
Kecepatan rotasi spindle	$n$ (rpm)	160	320	450
Kecepatan potong ( <i>cutting speed</i> )	$v_c$ (m/menit)	12,76	25,52	35,89
Kecepatan pemakanan ( <i>feeding speed</i> )	$v_f$ (mm/menit)	9,6	19,2	27

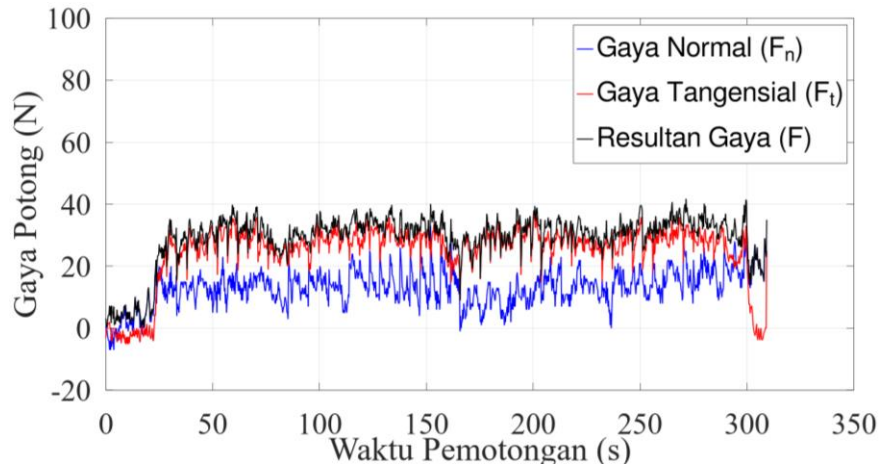
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gaya-gaya potong hasil eksperimen pada proses bubut ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan gambar ini, terdapat tiga jenis grafik gaya potong, yakni Gambar 4(a), 4(b), dan 4(c) yang masing-masing adalah grafik gaya potong dengan rotasi spindle 160 rpm, 320 rpm, dan 450 rpm. Grafik merah dan biru masing-masing merepresentasikan gaya potong arah tangensial dan arah normal. Sedangkan grafik warna hitam adalah resultan gaya potong dari kedua gaya potong tersebut yang dihitung  $F = \sqrt{F_t^2 + F_n^2}$ .

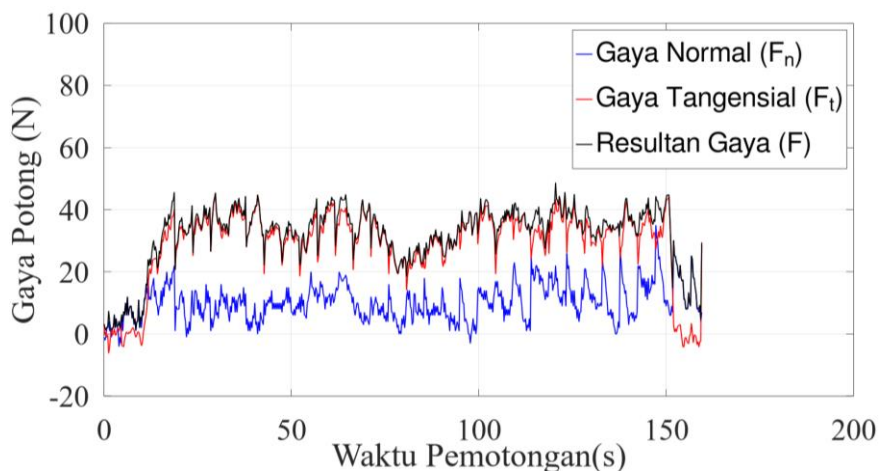
Ketiga grafik gaya pemotongan diatas mempunyai perbedaan waktu pemotongan, yang masing-masing adalah 312,5 detik; 156,25 detik; dan 112 detik. Hal ini sesuai dengan Persamaan (3) dengan setting panjang pemotongan adalah 50 mm dan laju kecepatan pemakanan (*feeding speed*) ditunjukkan pada Tabel 2. Sedangkan besar nilai gaya potong, baik arah tangensial dan normal, berfluktuasi. Secara teoritis sebagaimana yang ditunjukkan pada Persamaan (6) dan (7), gaya-gaya potong tersebut seharusnya bernilai konstan sepanjang waktu pemotongan. Hal ini karena parameter lebar ( $b$ ) dan ketebalan ( $h$ ) chip yang berpengaruh langsung terhadap besaran gaya potong sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (4)–(8) mempunyai nilai konstan.

Fluktuasi gaya potong pada setiap grafik tersebut sangat kuat dipengaruhi oleh proses dinamik selama terjadi kontak antara benda kerja dan pahat [4], [14], yang sayangnya tidak dieksplorasi secara detail pada artikel ini. Namun demikian, data menunjukkan bahwa gaya-gaya potong tersebut mempunyai bentuk (*shape*) yang sesuai dengan penelitian terdahulu, [12], [13], [6], dan [8]. Selain itu, bentuk grafik juga menyerupai sehingga dapat dikatakan bahwa variasi kecepatan rotasi spindle tidak mempengaruhi nilai gaya potong pada proses bubut. Hal ini terkonfirmasi pada persamaan 8 dan 9.

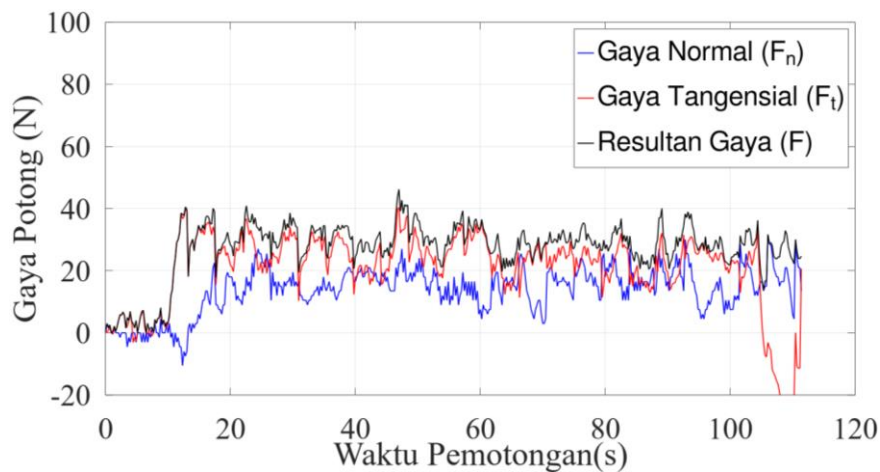
Untuk mengetahui pengaruh variasi putaran terhadap atribut proses bubut, maka perlu mentransformasi data yang ditampilkan pada Gambar 4 kedalam power spektrum untuk mengetahui perubahan frekuensi. Hal ini karena kecepatan rotasi spindle (rpm) hampir pasti berpengaruh terhadap kandungan frekuensi proses pemotongan pada proses pemesinan. Hasil spektrum frekuensi ditampilkan pada Gambar 5.



(a) Grafik Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 160 rpm

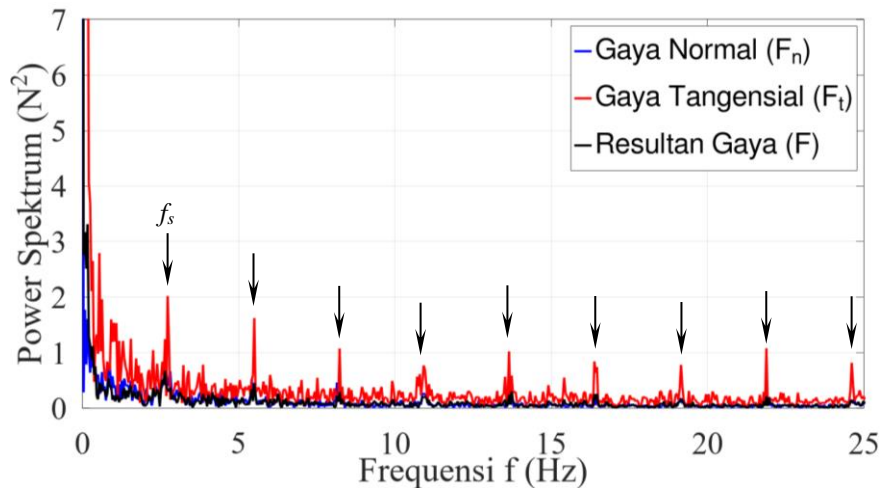


(b) Grafik Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 320 rpm

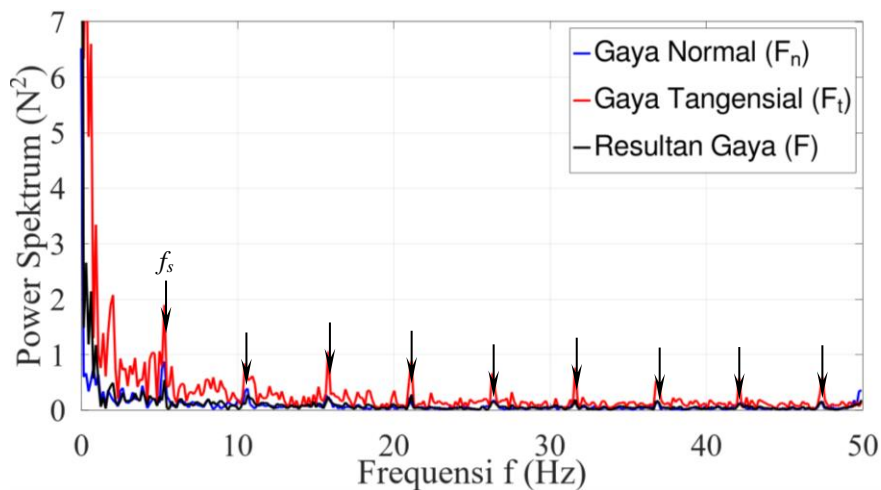


(c) Grafik Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 450 rpm

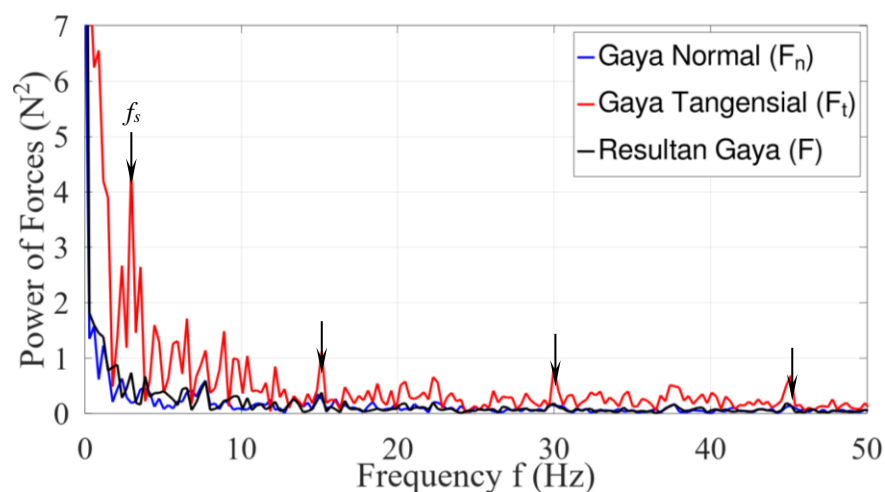
Gambar 4. Grafik Gaya Potong Hasil Eksperimen Pada Proses Bubut Dengan Tiga Variasi Kecepatan Rotasi Spindle



(a) Spektrum Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 160 rpm



(b) Spektrum Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 320 rpm



(c) Spektrum Gaya Potong Dengan Rotasi Spindel 450 rpm

Gambar 5. Spektrum Frekuensi Yang Koresponding Terhadap Tiga Gaya Potong Hasil Eksperimen

Spektrum pada Gambar 5 menunjukkan kandungan frekuensi gaya potong, baik gaya potong arah normal, arah tangensial, dan resultannya yang divisualisasikan dengan warna grafik masing-masing. Berdasarkan setiap spektrum frekuensi pada Gambar 5, terdapat berbagai frekuensi yang dapat



diobservasi, diantaranya frekuensi rotasi *spindle* ( $f_s$ ) dan frekuensi harmoniknya yang disimbolkan dengan tanda anak panah. Baik frekuensi *spindle* dan frekuensi harmonik adalah frekuensi karakteristik yang merupakan konsekuensi dari adanya kecepatan rotasi spindle. Berdasarkan spektrum frekuensi pada Gambar 5, frekuensi spindle untuk proses bubut pada kecepatan spindle rotasi 160 rpm adalah 2,67 Hz diikuti oleh frekuensi harmoniknya yang merupakan kelipatan (5,33; 8; 10,66 Hz dan seterusnya).

Proses bubut dengan kecepatan *spindle* rotasi 320 rpm mempunyai frekuensi *spindle* 5,33 Hz dan diikuti oleh frekuensi harmoniknya yaitu 10,66; 16; 21,33 Hz dan seterusnya. Sedangkan variasi terakhir dengan kecepatan *spindle* rotasi 450 rpm mempunyai frekuensi *spindle* 7,5 Hz dengan frekuensi harmoniknya yaitu 15; 22,5; 30 Hz dan seterusnya. Dalam tinjauan dinamika proses pemesinan, seluruh frekuensi karakteristik tersebut merupakan salah-satu jenis getaran paksa (*forced vibration*) [XXX]. Meskipun jenis getaran ini tidak berbahaya, namun berpotensi menjadi penyebab getaran eksitasi diri (*self-excited vibration*) jika frekuensi *spindle* bertemu dengan frekuensi pribadi (*natural frequency*) sistem bubut, yakni benda kerja-spindle-pahat terpasang.

#### 4. SIMPULAN

Penelitian eksperimental ini mengeksplorasi pengaruh kecepatan rotasi *spindle* terhadap proses pemotongan. Pembahasan hasil eksperimen menyimpulkan bahwa variasi kecepatan rotasi *spindle* tidak mempengaruhi nilai gaya potong proses bubut meskipun terlihat grafik gaya potong berfluktuasi. Hal ini diakibatkan adanya dinamika proses pemesinan. Namun peningkatan kecepatan rotasi *spindle* mempengaruhi waktu pemotongan dimana semakin besar nilai kecepatan rotasi *spindle* yang digunakan semakin cepat pula proses bubut selesai, yang masing-masing adalah 312,5 detik; 156,25 detik; dan 112 detik. Kecepatan rotasi spindle (rpm) juga berpengaruh terhadap kandungan frekuensi proses bubut. Berbagai frekuensi karakteristik proses bubut dapat diobservasi, diantaranya frekuensi rotasi *spindle* ( $f_s$ ) dan frekuensi harmoniknya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Sandvick Coromant, Railway turning: Re-turning and new wheel turning [Online], diakses pada 01 April 2024, Available: <https://coromantstrgprod.blob.core.windows.net/files/sitecollectiondocuments%2Fdownloads%2Fglobal%2Ftechnical%20guides%2Fen-gb%2Fc-1020-019.pdf>
- [2]. Departemen Jurusan Teknik Mesin dan Teknik Industri, Universitas Gadjah Mada, Kurikulum Departemen Teknik Mesin dan Teknik Industri [Online], diakses pada 01 April 2024, Available: <https://dtmi.ft.ugm.ac.id/program-studi/teknik-mesin/program-sarjana/>
- [3]. Departemen Teknik Mesin, Mata Kuliah [Online], diakses pada 01 April 2024, Available: <https://mesin.ft.undip.ac.id/mata-kuliah/>
- [4]. Agus Susanto, Indarto Yuwono, N. Wahyudi, Ramadhana Eka Wicaknono, "Analisa Gaya Potong pada Proses Frais Komponen Kereta Api Menggunakan OCTAVE: Bagian 1 Up Milling", *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 13, no. 02, pp. 60–67, 2021, doi: 10.33504/manutech.v13i02.193.
- [5]. Agus Susanto, Hanum Arrosida, Muhammad Fajar, Agus Choirul, Muhammad Azka, "Hubungan Parameter Pemesinan terhadap Gaya Potong, Temperatur, dan Power pada Proses Bubut Inconel 718", *Rotasi*, vol. 24, no. 3, pp. 43–49, 2022.
- [6]. Gergo Fodor, Henrik T. Sykora, Daniel Bachrathy, "Stochastic modeling of the cutting force in turning processes", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 1–2, pp. 213–226, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05877-8.
- [7]. Judit Lukács dan Richard Horváth, "Comprehensive Investigations of Cutting with Round Insert: Introduction of a Predictive Force Model with Verification", *Metals*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/met12020257.
- [8]. Qingchun Zheng, Cuilei Yang, Shanqing Zhang, Yahui Hu, "Simulation and experimental research on cutting force of turning titanium alloy", *MATEC Web Conf.*, vol. 31, pp. 4–8, 2015, doi: 10.1051/mateconf/20153103013.
- [9]. Kistler. Cutting force measurement with dynamometers [Online], diakses pada 01 April 2024, Available: <https://www.kistler.com/US/en/cp/multicomponent-dynamometers-9255c/P0000674>
- [10]. Zhao You, Zhao Yulong, Gong Taobo, "Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring", *14th IEEE Int. Conf. Electron. Meas. Instruments, ICEMI 2019*, pp. 891–897,

- 
- 2019, doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101849.
- [11]. D. A. Reyes-Uquillas and T. Hsiao, "Wireless tool holder sensor design for cutting force measurement applied to chatter detection", *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 1845–1848, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2016.7848340.
- [12]. Muhammad Rizal, Jaharah A. Ghani, Husni, Husaini, "Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process", *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 4072–4087, 2018, doi: 10.15282/jmes.12.4.2018.07.0353.
- [13]. Muhammad Rizal, Jaharah A. Ghani, Amir Zaki Mubarak, "Design and Development of a Tri-Axial Turning Dynamometer Utilizing Cross-Beam Type Force Transducer for Fine-Turning Cutting Force Measurement", *Sensors*, vol. 22, no. 22, 2022, doi: 10.3390/s22228751.
- [14]. Agus Susanto, Keiji Yamada, Ruy Tanaka, Y. A. Handoko, Muhammad Fajar Subhan, "Chatter identification in turning process based on vibration analysis using Hilbert- Huang transform", *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 6856–6868, 2020.