



## Analisa Gaya Potong pada Proses Frais Komponen Kereta Api Menggunakan OCTAVE: Bagian 1 *Up Milling*

Agus Susanto<sup>1</sup>, Indarto Yuwono<sup>1</sup>, Noorsakti Wahyudi<sup>2</sup>, Ramadhana Eka Wicaknono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Perkeretaapian, Politeknik Negeri Madiun, Madiun

<sup>2</sup> Teknik Otomotif, Politeknik Negeri Madiun, Madiun

Agus\_eng.dept@pnm.ac.id

Received : 1 Oktober 2021; Received in revised form : 25 Oktober 2021; Accepted : 8 Desember 2021

### Abstract

*Milling is widely applied to process train components, especially for finishing wheel-set, boogie frames, and slotting shafts. The cutting forces of milling during operation is important to analyze because they affect on the final product. The analysis can be experimental data observation or simulation. This article presents simulation of cutting forces in up-milling with various input parameters using Octave open software. The simulation results showed that the exit angle ( $\varphi_e$ ) was  $80^\circ$  and  $60^\circ$  for simulation 1 and simulation 2, respectively. The start angle ( $\varphi_s$ ) was  $0^\circ$  for both simulation because it was up-milling process. Since the effective cutting angles were less than the interval angle of cutting edges ( $90^\circ$ ), only single cutting edge was involved in cutting. In addition, the cutting force was influenced by the cutting parameters, so that there were cutting force fluctuations during machining process. Differences in radial depth of cut, feed per tooth, and effective cutting angle affected in the differences of the cutting force quantity. In simulation 1, the resultant cutting force reached 400 N, while the cutting force  $F_x$  and  $F_y$  are 250 N and 325 N, respectively. In simulation 2, the resultant was 700 N, and 500 N and 420 N for  $F_x$  and  $F_y$  cutting forces, respectively. Spindle rotation speed did not affect on the quantity of cutting force but affects on the cutting time. In simulation 1 with a spindle speed of 7500 rpm, it took a cutting time of 0.008 seconds. While in simulation 2, the cutting time was slower, namely 0.012 seconds. This was because the spindle rotation speed reduced to 5000 rpm. The simulation also proved the characteristic frequency of milling process; tooth passing, and several harmonic frequencies.*

**Keywords:** train components, cutting force simulation, up-milling process, Octave software

### Abstrak

Proses frais luas diaplikasikan untuk memproses komponen kereta-api, terutama untuk *finishing wheel-set, boogie frame, dan slotting shaft*. Gaya potong pada proses frais penting untuk dianalisis karena mempunyai pengaruh terhadap hasil akhir produk. Analisis yang dilakukan dapat berupa observasi data eksperimen maupun simulasi. Artikel ini membahas tentang simulasi gaya potong proses frais naik dengan berbagai parameter input menggunakan *open software*, Octave. Hasil simulasi menunjukkan bahwa, sudut keluar ( $\varphi_e$ ) sebesar  $80^\circ$  dan  $60^\circ$  untuk simulasi 1 dan 2. Sedangkan sudut masuk ( $\varphi_s$ ) adalah  $0^\circ$ . Oleh karena sudut potong efektif kurang dari sudut interval antar mata potong ( $90^\circ$ ), maka hanya akan ada satu mata potong yang terlibat saat pemotongan. Gaya potong dipengaruhi oleh parameter pemotongan sehingga terjadi fluktuasi gaya potong selama proses pemesinan. Perbedaan kedalaman potong radial, laju pemakan per gigi, dan sudut potong efektif menghasilkan perbedaan kuantitas gaya potong. Pada simulasi 1, gaya potong resultan,  $F_x$  dan  $F_y$  masing-masing adalah 400, 250, dan 325 N. Sedangkan simulasi 2, mencapai 700, 500, dan 420 N. Kecepatan putaran spindle ( $\omega$ ) mempengaruhi waktu pemotongan. Pada simulasi 1 ( $\omega = 7500$  rpm), membutuhkan waktu pemotongan 0,008 detik. Sedangkan pada simulasi 2, waktu pemotongan lebih lambat yaitu 0,012 detik. Hal ini karena kecepatan putaran spindle turun menjadi 5000 rpm. Simulasi juga menjelaskan tentang frekuensi karakteristik proses frais, yaitu frekuensi *tooth passing*, dan beberapa frekuensi harmonik.

**Kata kunci:** komponen kereta api, simulasi gaya potong, proses frais naik (*up-milling*), *software octave*

## 1. PENDAHULUAN

Proses frais (*milling process*) secara luas digunakan di berbagai industri, termasuk proses frais pada komponen di industri kereta api. Komponen kereta api yang sering dimesin menggunakan proses frais adalah *wheel-set*, *boogie frame*, dan *slotting shaft*, dan biasanya dilakukan adalah langkah akhir (*finishing*) setelah melewati berbagai rantai manufaktur lainnya, misalnya pengecoran, pembentukan, dan *stamping*. Dalam *finishing process* ini, berbagai jenis proses frais digunakan, misalnya proses frais rata (*face milling*), *peripheral*, *slotting*.

Pada proses frais, gaya potong (*cutting force*) memegang peranan penting karena berkorelasi dengan getaran yang terjadi selama proses pemesinan, dan selanjutnya akan berperan pada kegagalan dalam menghasilkan permukaan yang lebih presisi. Susanto, dkk. mengobservasi kejadian *bumping milling* selama proses frais yang diakibatkan oleh perbedaan gaya potong spesifik (*specific cutting force*) antara dua benda kerja yang berbeda yang pada akhirnya membuat permukaan akhir (*surface finish*) tidak sesuai dengan dimensi. [1]. Secara teoritis, gaya potong yang lebih rendah dapat dicapai dengan memilih tingkat parameter pemotongan yang lebih rendah seperti kedalaman potong, baik radial maupun aksial, dan laju pemakanan (*feed rate*) yang lebih rendah. Namun, cara semacam ini jelas akan sangat mempengaruhi produktivitas pemesinan. Berbagai tinjauan literatur menunjukkan bahwa selain parameter pemotongan, parameter geometris pahat frais, seperti *rake angle*, sudut bebas (*clearance angle*) dan radius pahat, dan sudut heliks (*helix angle*), juga memiliki pengaruh pada gaya potong. Gunay dkk. [2] mengamati kecenderungan penurunan gaya potong ketika *rake angle* "dinaikkan" dari nilai negatif menjadi nilai positif. Saglam dkk. [3] menemukan bahwa *rake angle* yang optimum adalah  $12^\circ$  ketika mencermati gaya potong dan suhu secara bersamaan dalam sebuah pembuktian eksperimental. Endres dkk. [4] menyatakan gaya potong sebagai fungsi dari mata pahat (*cutting edges*) dan jarak bebas (*clearance face edge*). Gaya potong dibawah pengaruh parameter tersebut, kemudian diobservasi secara eksperimen. Sementara Huang, dkk. memantau kondisi proses frais pada saat proses pemesinan Titanium Alloy dengan mengamati gaya potong yang diakuisisi melalui sebuah percobaan laboratorium [5].

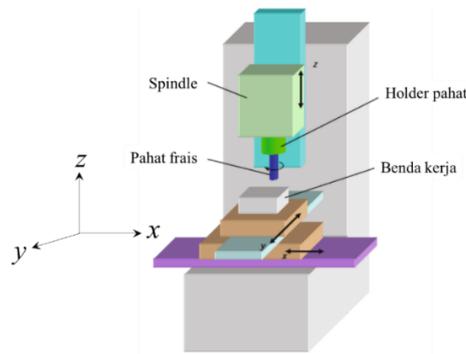
Selain melalui pengukuran pada laboratorium, gaya potong pada proses frais sering disimulasikan menggunakan *software* bahasa pemrograman, seperti Matlab maupun Java Script. Schmitz dan Smith [6] menggunakan Matlab untuk memodelkan gaya potong proses frais kemudian mensimulasikan hasilnya. Stone [7] menggunakan Java Script untuk memodelkan dan mensimulasikan gaya potong pada berbagai proses pemesinan, termasuk frais. Akan tetapi *software* tersebut merupakan bahasa pemrograman berbayar dan cukup sering disalahgunakan oleh sebagian akademisi dengan cara menggunakannya secara tidak sah. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai *software* bahasa pemrograman yang bersifat *open source* dapat digunakan, sepertihalnya *software* Octave.

Octave merupakan salah satu *software* bahasa pemrograman yang terbuka untuk umum (*open source*) [8], namun mempunyai kemampuan untuk menganalisa, mensimulasikan, dan menghitung berbagai jenis input data, termasuk mensimulasikan gaya potong. Oleh karena itu, artikel ini membahas tentang simulasi gaya potong pada proses frais naik (*up-milling*) yang diterapkan pada komponen kereta api dengan menggunakan *software* Octave. Parameter pemotongan dan parameter geometris pahat frais yang mempunyai pengaruh terhadap gaya potong sebagaimana disampaikan pada bagian awal akan ditinjau secara matematis, dan kemudian disimulasikan. Hasil simulasi ini akan sangat bermanfaat bagi berbagai kalangan akademisi karena dapat digunakan untuk mensimulasikan gaya potong saat proses perkuliahan, terutama mata kuliah proses pemesinan dan proses manufaktur.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Tinjauan mesin dan proses frais

Mesin frais dapat dibedakan menjadi dua jenis jika ditinjau dari putaran porosnya, yaitu *vertical* dan *horizontal milling machine*. Mesin tersebut dapat dikendalikan secara manual maupun dikontrol melalui komputer secara numerik (CNC). Gambar 1 mengilustrasikan gambar mesin frais dan bagian-bagian penting mesin. Selain itu juga memperlihatkan sumbu gerak mesin frais, yakni  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ .

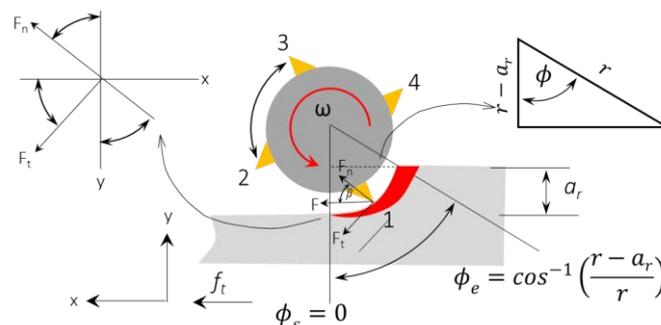


Gambar 1. Ilustrasi mesin frais, bagian pentingnya, dan notasi sumbu gerak mesin.

Pada proses frais, pahat juga menjadi bagian yang penting. Jenis pahat frais yang banyak digunakan adalah *end-mill*. *End-mill* ujung persegi (*square end-mill*), ujung berbentuk bola (*ball nose end-mill*), dan *bull nose end-mill*. Berbagai pahat tersebut mempunyai peran tersendiri, misalnya *peripheral*, *face milling*, *contouring*, dan *chamfer*.

## 2.2. Persamaan differensial gaya potong pada proses frais naik

Untuk mensimulasikan gaya potong pada proses frais naik (up milling), maka diperlukan persamaan differensial. Persamaan ini dapat ditentukan dengan cara mengetahui parameter pemotongan yang berhubungan dengan variasi ketebalan gram sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 2. Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa kedalaman aksial adalah kecil sehingga dapat mengabaikan sudut heliks pahat yang terdapat pada batang pahat.



Gambar 2. Parameter pemotongan dan pengaruhnya terhadap variasi ketebalan *chip* pada proses frais naik (*up-milling*)

Berdasarkan gambar diatas, pahat dengan 4 gigi (*cutting edge*) berotasi dengan kecepatan rotasi sebesar  $\omega$  (rpm) dan juga bergerak linear untuk meraut *chip* sebesar  $f_t$  (mm/gigi). Saat pahat frais berotasi untuk meraut benda kerja, sebuah mata pahat akan masuk dan keluar, masing-masing sebesar,  $\phi_s$  dan  $\phi_e$ . Sebagai implikasinya, proses frais ini akan menghasilkan ketebalan *chip* yang bervariasi (bagian gambar warna merah). Berdasarkan parameter diatas, ketebalan *chip*  $h(\phi)$  dinyatakan sebagai;

$$h(\phi) = f_t \sin(\phi) \quad (1)$$

dimana  $\phi$  adalah sudut potong antara  $\phi_s$  dan  $\phi_e$ ;  $f_t$  adalah gerak pemakanan setiap mata potong yang merupakan hubungan antara gerak pemakanan linear  $f$  (mm),  $\omega$ , dan jumlah mata potong  $N_t$ , yang dinyatakan sebagai;

$$f_t = \frac{f}{\Omega \cdot N_t} \quad (2)$$

Sebagaimana terlihat pada Gambar 2, sudut masuk ( $\phi_s$ ) pada saat suatu mata pahat memulai pemotongan adalah  $0^\circ$ . Sedangkan sudut keluarnya ( $\phi_e$ ), dapat dicari dengan hubungan trigonometri menggunakan segitiga yang terjadi saat proses pemotongan, yaitu;

$$\phi_e = \cos^{-1} \left( \frac{r-ar}{r} \right) \quad (3)$$

dimana  $a_r$  adalah kedalaman potong radial.

Gaya potong ( $F$ ) yang terjadi pada setiap mata pahat merupakan fungsi dari luas area *chip* ( $A$ ) dan gaya potong spesifik (*specific cutting force*,  $K_s$ ) [6] yang dinyatakan sebagai;

$$F = K_s \cdot A \quad (4)$$

dimana  $A$  adalah luasan area *chip* merupakan perkalian antara lebar *chip* ( $b$ ) dan ketebalan *chip* ( $h$ ). Sehingga Persamaan (4) dapat ditulis ulang menjadi;

$$F = K_s \cdot b \cdot h \quad (5)$$

Persamaan (5) memperlihatkan bahwa gaya potong pada proses frais bervariasi setiap derajatnya. Hal ini karena gaya potong merupakan fungsi dari sudut potong sebagaimana yang dijelaskan pada Persamaan (1)–(4).

Selanjutnya, gaya potong ( $F$ ) pada proses frais ini dapat diproyeksikan menjadi gaya potong arah normal ( $F_n$ ) dan tangensial ( $F_t$ ), lihat Gambar 2. Dengan menggunakan gambar ini, persamaan gaya potong normal ( $F_n$ ) dan tangensial ( $F_t$ ) masing-masing dapat diformulasikan sebagai berikut;

$$F_n = \cos(\beta) \cdot F = \cos(\beta) \cdot K_s \cdot b \cdot h = K_n \cdot b \cdot h \quad (6)$$

dan

$$F_t = \sin(\beta) \cdot F = \sin(\beta) \cdot K_s \cdot b \cdot h = K_t \cdot b \cdot h \quad (7)$$

Gaya potong tersebut dapat diuraikan pada sumbu  $x$  dan  $y$  karena umumnya, alat ukur gaya potong (dynamometer) memberikan informasi gaya potong arah  $x$  dan  $y$ , yang dinyatakan sebagai;

$$F_x = F_t \cos(\phi) + F_n \sin(\phi) \quad (8)$$

$$F_y = F_t \sin(\phi) - F_n \cos(\phi) \quad (9)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan ketebalan *chip*, gaya potong arah normal dan gaya potong arah tangensial kedalam persamaan (8) dan (9), maka menghasilkan persamaan potong akhir, yaitu;

$$F_x = K_t b f_t \sin(\phi) \cos(\phi) + K_n b f_t \sin(\phi) \sin(\phi) \quad (10)$$

dan

$$F_y = K_t b f_t \sin(\phi) \sin(\phi) - K_n b f_t \sin(\phi) \cos(\phi) \quad (11)$$

### 2.3. Overview Octave

Octave merupakan suatu bahasa program (*language program*) komputer yang bisa membantu memecahkan berbagai masalah matematis dan numerik yang kerap ditemui dalam bidang teknik. Salah satu aspek yang sangat berguna dari Octave adalah kemampuannya untuk menggambarkan berbagai jenis grafik yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan data dan fungsi yang kompleks dengan *command* tertentu. *Software* Octave dapat di download dengan mudah karena merupakan *open source*. Meskipun jenis *open source software*, Octave mempunyai kemampuan yang hampir setara dengan *software* bahasa pemrograman lainnya yang berbayar, seperti Python, Matlab, C++, Math-CAD, dan lain sebagainya. Selanjutnya, keunggulan Octave ini akan dimanfaatkan untuk mensimulasi gaya potong saat proses frais naik (*up-milling*).

## 2.4. Bahan

Metode yang digunakan pada artikel ini adalah simulasi gaya potong terhadap persamaan yang telah diderivasikan pada pembahasan sebelumnya menggunakan *software Octave*. Dua simulasi gaya potong saat proses frais naik akan dibahas untuk material panduan aluminium (*aluminum alloy*). Material ini mempunyai gaya potong spesifik sebesar  $K_s = 791 \text{ N/mm}^2$  sehingga banyak diaplikasikan sebagai komponen kereta api. Dengan menggunakan Persamaan (6) dan (7), maka  $k_n$  dan  $k_t$  dapat diketahui, yaitu  $k_t = 750 \text{ N/mm}^2$  dan  $k_n = 250 \text{ N/mm}^2$  dengan  $\beta = 71,6^\circ$ . Sedangkan parameter pemotongan yang digunakan pada simulasi ini adalah lebar pemotongan  $b$ , laju pemakanan  $f_t$ , dan kecepatan potong  $\omega$  ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemotongan yang digunakan untuk simulasi

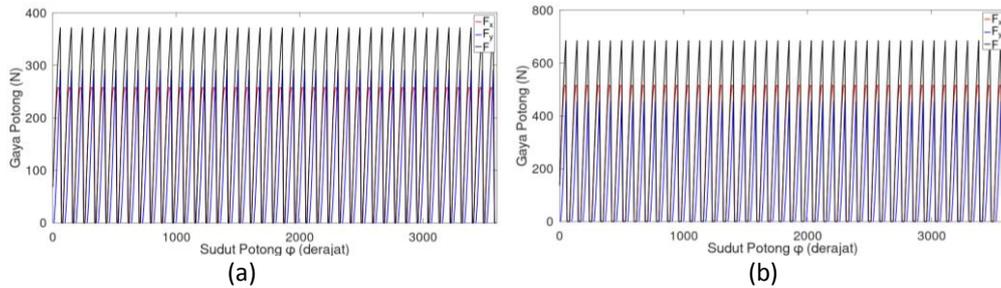
Parameter pemotongan	Simulasi 1	Simulasi 2
Lebar pemotongan $b$ (mm)	5	5
Kedalaman potong radial $a$ (mm)	4,75	3
Laju pemakanan setiap gigi $f_t$ (mm/gigi)	0,1	0,2
Kecepatan putaran spindle mesin frais $\omega$ (rpm)	7500	5000

Sedangkan spesifikasi pahat yang digunakan mempunyai diameter ( $d$ ) 19 mm dan jumlah mata gigi ( $N_t$ ) 4. Sehingga interval sudut antar mata potong adalah  $90^\circ$ . Berdasarkan parameter ini dan Persamaan (3), dapat diketahui sudut keluar  $\varphi_e$  yaitu sebesar  $80^\circ$  untuk simulasi pertama dan  $60^\circ$  untuk simulasi kedua. Sedangkan sudut masuk  $\varphi_s = 0$  karena merupakan proses *up-milling*. Oleh karena sudut potong efektif  $\varphi$  ( $80^\circ$  dan  $60^\circ$ ) kurang dari sudut interval antar mata potong, maka hanya akan ada satu mata potong yang terlibat saat pemotongan.

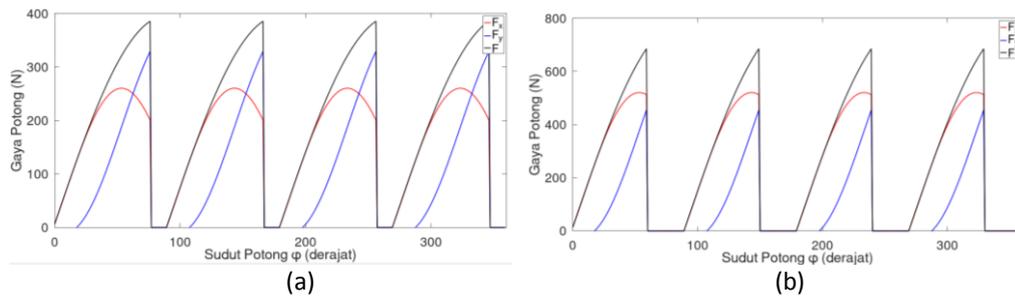
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi tertera pada Gambar 3. Gambar ini menampilkan gaya potong dengan 10 kali rotasi pahat. Secara berturut-turut Gambar 3(a) dan 3(b) adalah gaya potong hasil simulasi ke-1 dan ke-2. Untuk keperluan pembahasan hasil secara terperinci, maka ditampilkan gaya potong saat pahat sekali berotasi ( $360^\circ$ ) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4. Terlihat empat peak gaya potong sebagai akibat dari aktivitas keempat mata potong saat melakukan pemotongan benda kerja. Warna merah mewakili gaya potong arah  $x$  ( $F_x$ ), warna biru mewakili gaya potong arah  $y$  ( $F_y$ ), dan warna hitam mewakili resultan gaya potong ( $F$ ) yang dihitung dengan cara  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ .

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4(a), terlihat bahwa mata potong ke-1 meraut benda kerja dari sudut  $0^\circ$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) yang menghasilkan gaya potong juga nol. Gaya potong ini terus meningkat seiring meningkatnya sudut potong  $\varphi$ . Meningkatnya sudut potong  $\varphi$  menyebabkan peningkatan ketebalan *chip* ( $h$ ) yang pada akhirnya gaya potong juga akan meningkat. Gaya potong ini mencapai maksimum saat  $\varphi = 80^\circ$ . Selanjutnya, gaya potong turun menjadi nol, yakni mulai sudut  $80^\circ$  hingga  $90^\circ$ , karena rentang sudut ini tidak terjadi aktivitas pemotongan yang dilakukan oleh mata potong 1, hingga mata potong ke-2 mulai melakukan perautan, yakni dimulai pada  $\varphi = 90^\circ$ . Seperti pada mata potong ke-1, gaya potong terus meningkat karena ketebalan *chip* ( $h$ ) meningkat seiring meningkatnya sudut potong  $\varphi$ . Gaya potong ini mencapai maksimum saat  $\varphi = 170^\circ$  dan gaya turun menjadi nol, yakni mulai sudut  $170^\circ$  hingga  $180^\circ$ . Fluktuasi gaya potong ini akan terjadi seterusnya untuk satu putaran penuh sehingga terlihat empat peak gaya potong. Selain itu, terlihat bahwa resultan gaya potong untuk masing-masing mata pahat pada simulasi ini adalah tertinggi yang mencapai 400 N, sedangkan gaya potong  $F_x$  dan  $F_y$  masing-masing adalah 250 N dan 325 N.



Gambar 3. Gaya potong proses frais naik (*up-milling*) dengan 10 kali rotasi pahat; (a) hasil simulasi pertama, (b) hasil simulasi kedua

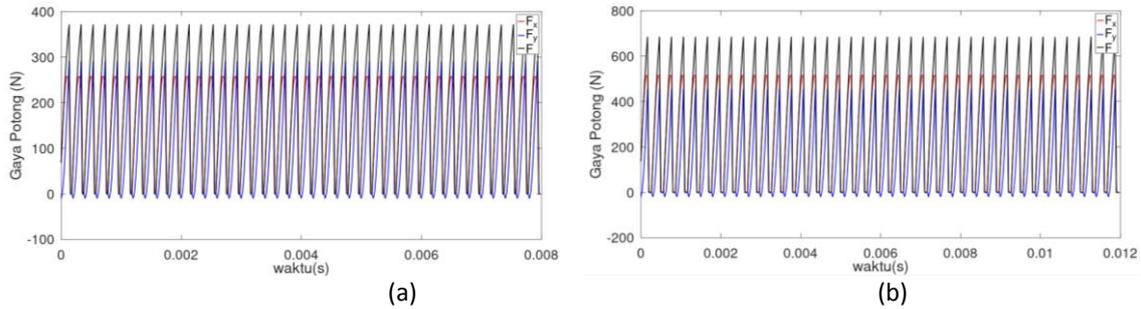


Gambar 4. Porsi gaya potong dari Gambar 10 yang menampilkan satu kali rotasi pahat ( $360^\circ$ ); (a) hasil simulasi pertama, (b) hasil simulasi kedua

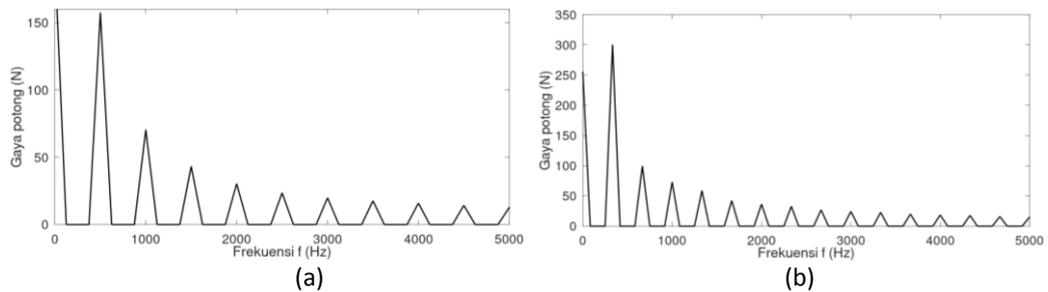
Pada Gambar 4(b) memperlihatkan gaya potong hasil simulasi ke-2. Sebagaimana terlihat dari gambar ini bahwa bentuk grafiknya mirip dengan gaya potong hasil simulasi ke-1, namun berbeda besaran nilai gaya potong. Terlihat bahwa resultan gaya potong untuk masing-masing mata pahat pada simulasi ini adalah tertinggi yang mencapai 700 N, sedangkan gaya potong  $F_x$  dan  $F_y$  masing-masing adalah 500 N dan 420 N. Hal ini dikarenakan kedalaman potong radial dan sudut potong efektif berpengaruh terhadap bentuk kuantitas gaya potong sebagaimana tertera pada Persamaan (11). Sedangkan kecepatan putaran spindle tidak mempunyai pengaruh terhadap kuantitas gaya potong, melainkan berpengaruh terhadap waktu pemotongan. Untuk melihat pengaruh ini, absis rotasi (dalam derajat) dari gaya potong yang tertera pada Gambar 3 dikonversi menjadi absis waktu (dalam detik). Konversi ini mengharuskan kecepatan spindle ( $\Omega$ , *rpm*) dirubah berdasarkan Persamaan (12). Hasil simulasi gaya potong dalam domain waktu tertera pada Gambar 5.

$$t = \frac{\phi \cdot 60}{\Omega \cdot 360} \quad (12)$$

Gambar 5 menunjukkan grafik gaya potong yang sama dengan yang tersedia pada Gambar 3 dengan absis menjadi satuan waktu. Gambar 5(a) menunjukkan plot gaya potong yang dihasilkan dari simulasi dengan kecepatan spindle 7500 rpm. Terlihat bahwa satu kali rotasi pahat membutuhkan waktu 0,008 detik. Dengan demikian setiap mata potong membutuhkan waktu 0,002 detik karena setiap mata potong mempunyai jarak interval  $90^\circ$ . Dari sini juga dapat diketahui bahwa frekuensi setiap mata pahat (*tooth passing frequency* ( $f_{gigi}$ )) adalah  $\frac{1}{0.002} = 500$  Hz. Berbeda dengan gaya potong hasil simulasi ke-2 dengan kecepatan rotasi spindle ( $\Omega$ ) 5000 rpm sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5(b). Terlihat bahwa satu kali rotasi pahat membutuhkan waktu yang lebih lambat, yaitu 0,012 detik. Dapat dipahami bahwa pemotongan lebih lambat karena memang terjadi penurunan kecepatan putaran spindle menjadi 5000 rpm. Dengan demikian setiap mata potong membutuhkan waktu 0,003 detik. Sehingga memiliki frekuensi mata pahat  $\frac{1}{0.003} = 333$  Hz. Untuk mengkonfirmasi frekuensi setiap mata potong perlu melihat kandungan frekuensi (*frequency content*) dengan menggunakan teknik analisis sinyal *fast Fourier transform*. Analisis ini akan menghasilkan spektrum frekuensi sebagaimana tertera pada Gambar 6.



Gambar 5. Gaya potong dari Gambar 10 yang dilihat dalam domain waktu; (a) hasil simulasi pertama, (b) hasil simulasi kedua



Gambar 6. Spektrum frekuensi untuk gaya potong; (a) hasil simulasi pertama, (b) hasil simulasi kedua

Berdasarkan gambar diatas, terlihat banyak frekuensi yang muncul. Frekuensi yang pertama kali muncul adalah frekuensi mata pahat (*tooth passing frequency*). Frekuensi ini dihitung menggunakan persamaan  $f_{gigi} = \frac{\Omega \cdot N_t}{60}$  (Hz). Sehingga didapatkan  $f_{gigi} = 500$  Hz untuk hasil simulasi ke-1. Hal ini sekaligus mengkonfirmasi kebenaran frekuensi gaya potong untuk setiap mata pahat. Frekuensi setelahnya disebut dengan frekuensi harmonik dari  $f_{gigi}$ . Frekuensi harmonik ini merupakan kelipatan bilangan bulat dari  $f_{gigi}$ , yaitu  $2f_{gigi}$ ,  $3f_{gigi}$ ,  $4f_{gigi}$  dan seterusnya. Sehingga frekuensi harmonik untuk hasil simulasi ke-1 adalah 1.000 Hz; 1.500 Hz; 2.000 Hz, dan seterusnya. Baik  $f_{gigi}$  maupun frekuensi harmonik disebut dengan frekuensi karakteristik (*characteristic frequencies*) proses frais dan sekaligus menjadi frekuensi khas saat proses frais. Sedangkan untuk hasil untuk proses simulasi ke-2, frekuensi mata potong adalah  $f_{gigi} = 333,3$  Hz, yang artinya mengkonfirmasi kebenaran frekuensi gaya potong yang telah dibahas sebelumnya. Sedangkan frekuensi harmonik yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari  $f_{gigi}$  adalah 666,6 Hz; 999,9 Hz; 1.333,3 Hz, dan seterusnya.

#### 4. SIMPULAN

Proses frais secara luas diaplikasikan untuk memproses komponen kereta api, terutama untuk proses penyelesaian akhir (*finishing*). Gaya potong pada proses frais penting untuk dianalisis karena mempunyai pengaruh terhadap hasil akhir produk. Analisis yang dilakukan dapat berasal dari data eksperimen maupun simulasi. Artikel ini membahas tentang simulasi gaya potong pada proses frais naik (*up-milling process*) dengan berbagai parameter input menggunakan *software* Octave.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa gaya potong dipengaruhi oleh parameter pemotongan sehingga terjadi fluktuasi gaya potong selama proses pemesinan. Perbedaan kedalaman potong radial, laju pemakan per gigi, dan sudut potong efektif menghasilkan perbedaan kuantitas gaya potong. Pada simulasi 1, resultan gaya potong mencapai 400 N, sedangkan gaya potong  $F_x$  dan  $F_y$  masing-masing adalah 250 N dan 325 N. Sedangkan simulasi kedua, resultannya mencapai 700 N, sedangkan gaya potong  $F_x$  dan  $F_y$  masing-masing adalah 500 N dan 420 N. Kecepatan putaran spindle tidak mempengaruhi kuantitas gaya potong tapi mempengaruhi waktu pemotongan. Pada simulasi 1 dengan kecepatan spindle 7500 rpm, membutuhkan waktu pemotongan 0,008 detik. Sedangkan pada simulasi 2, waktu pemotongan lebih lambat yaitu 0,012 detik. Hal ini karena kecepatan putaran spindle turun menjadi 5000 rpm. Simulasi juga menjelaskan tentang frekuensi karakteristik proses frais, yaitu *tooth passing frequency*, dan beberapa frekuensi harmonik.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1]. A. Susanto, C. H. Liu, K. Yamada, Y. R. Hwang, R. Tanaka, and K. Sekiya, "Application of Hilbert–Huang transform for vibration signal analysis in end-milling," *Precis. Eng.*, vol. 53, 2018.
- [2]. M. Günay, I. Korkut, E. Aslan, and U. Şeker, "Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 166, 2005.
- [3]. H. Saglam, S. Yaldiz, and F. Unsacar, "The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature," *Mater. Des.*, vol. 28, 2007.
- [4]. W. J. Endres, R. E. DeVor, and S. G. Kapoor, "A dual-mechanism approach to the prediction of machining forces, part 2: Calibration and validation," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 117, 1995.
- [5]. P. Huang, J. Li, J. Sun, and J. Zhou, "Study on vibration reduction mechanism of variable pitch end mill and cutting performance in milling titanium alloy," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, 2013.
- [6]. Tony L. Schmitz and K. S. Smith, *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*, vol. 1. Springer. London. 2008.
- [7]. B. Stone, *Chatter and Machine Tools*. Springer. London. 2014.
- [8]. <https://www.gnu.org/software/octave/download.html#ms-windows>. Acces 2021