

Penyusunan Model Prediksi Konsumsi Energi Pada Mesin CNC Milling Untuk Mencapai Pemesinan Hijau

Yohanes T. Wibowo^{1*}, Vuko AT Manurung²

¹. Program Studi Pembuatan Peralatan dan Perkakas Produksi, Politeknik Astra

²Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Politeknik Astra

^{1,2}Jln. Gaharu Blok F3, Delta Silicon II, Cikarang Selatan, Kabupaten Bekasi, 17530, Indonesia

E-mail: yohanes.trijoko@polytechnic.astra.ac.id¹, vuko.manurung@polytechnic.astra.ac.id²

Abstrak

Info Naskah:

Naskah masuk: 21 Mei 2024

Direvisi: 10 Juni 2024

Diterima: 17 Juni 2024

Mesin CNC Milling merupakan mesin perkakas yang memiliki populasi besar tetapi efisiensi energi rendah. Industri mesin perkakas mengonsumsi sekitar 10% dari total energi nasional, menjadikan industri ini sebagai pengguna energi terbesar kedua setelah sektor transportasi. Untuk mendapatkan kinerja mesin yang efisien, gerakan pada proses pemesinan harus dikontrol dengan mengatur parameter pemesinan yang tepat. Namun, terdapat kontradiksi di mana operator dan *programmer CAD/CAM* seringkali tidak memahami dampak pengaturan parameter tersebut sehingga menentukan nilai parameter secara sembarangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pengaturan parameter pemesinan dengan menyediakan nilai parameter yang terbukti memiliki kinerja ramah energi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah regresi berbasis *response surface methodology*. Berdasarkan simulasi numerik dan eksperimen yang dilakukan, variasi laju pemakanan dan kedalaman pemakanan terbukti memiliki dampak positif yang signifikan terhadap konsumsi energi. Eksperimen dan pengujian berhasil menurunkan nilai konsumsi energi di bawah 5A untuk 78% dari total proses.

Abstract

Keywords:

prediction model;
energy consumption;
green machining.

CNC Milling Machine is a machine tool that has a large population but low energy efficiency. The machine tool industry consumes about 10% of the national energy, making it the second largest energy user after transportation sector. To obtain efficient machine performance, the motion in the machining process must be controlled by setting the proper machining parameters. However, there is a contradiction in that CAD/CAM operators and programmers often do not understand the impact of such parameter settings and thus determine parameter values arbitrarily. This study aims to optimize machining parameter settings by providing parameter values proven to have energy-friendly performance. The method used in this research is regression-based response surface methodology. Based on numerical simulations and experiments conducted, variations in feed rate and depth of cut were shown to impact energy consumption significantly. Experiments and tests reduced the energy consumption value below 5A for 78% of the total process.

*Penulis korespondensi:

Yohanes T. Wibowo

E-mail: yohanes.trijoko@polytechnic.astra.ac.id

1. Pendahuluan

Energi merupakan sumber daya fundamental bagi pengembangan ekonomi dan salah satu faktor utama untuk masa depan yang berkelanjutan. Energi dibutuhkan dalam semua aspek kehidupan, terutama di dunia industri. Indonesia termasuk dalam lima negara dengan konsumsi energi terbesar, setelah Tiongkok, Amerika Serikat, India, dan Jepang. Industri di Indonesia menyerap 40% energi nasional, dimana 10% di antaranya digunakan oleh industri manufaktur perkakas [1], [2].

Sebagian besar industri manufaktur perkakas di Indonesia menggunakan mesin perkakas jenis milling berbasis *computerized numerical control* (CNC) [3]. Mesin CNC milling digunakan dalam proses manufaktur substraktif dan memiliki populasi yang tinggi serta membutuhkan energi besar untuk mengontrol gerakannya [4]. Pengaturan parameter pemesinan yang tidak tepat dapat menghasilkan produk yang tidak sesuai spesifikasi, memerlukan *rework* yang membutuhkan tambahan energi, waktu, biaya [5], dan sumber daya manusia [6], [7]. Oleh karena itu, pemilihan parameter pemesinan sangat kritis [8], [9]. Namun, tidak semua *programmer CAD/CAM* atau operator memahami pentingnya parameter pemesinan. Sering kali mereka memberikan nilai parameter tanpa pertimbangan matang, sehingga proses pemesinan tidak berjalan optimal. Mereka beranggapan bahwa jika spesifikasi tidak tercapai, mereka dapat melakukan *rework*, meskipun ini memerlukan tambahan energi, waktu, dan sumber daya lainnya.

Gerakan hemat energi menjadi perhatian global saat ini. *Green manufacturing* atau manufaktur hijau adalah salah satu upaya dalam gerakan ini. *Green machining* atau pemesinan hijau, yaitu proses produksi yang menggunakan energi seminimal mungkin untuk mencapai hasil yang sesuai spesifikasi, menjadi semakin penting dan mendesak [10], [11]. Penelitian sebelumnya telah meneliti konsumsi energi pada mesin CNC milling karena rendahnya efisiensi mesin ini [4]. Keausan alat potong menjadi salah satu penyebab utama meningkatnya konsumsi energi [12]. Dengan metode Taguchi, pengaturan kecepatan potong dan laju pemakanan mampu menurunkan konsumsi energi spesifik sebesar 53% dan 43% [13]. Pengaturan kedalaman pemakanan dan laju pemakanan juga dapat mengurangi waktu proses dan menghemat energi [14]. Pengelolaan parameter pemesinan yang baik dapat meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya, dan mengurangi emisi karbon [15], [16].

Dari uraian ini, jelas terlihat pentingnya optimasi parameter pemesinan. Namun, kontradiksi terjadi karena operator dan programmer seringkali tidak memahami pentingnya hal tersebut dan menetapkan nilai parameter pemesinan secara sembarangan. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab masalah ini dengan menyediakan nilai parameter pemesinan yang sesuai dengan kriteria pemesinan hijau. Dengan model prediksi yang diusulkan, konsumsi energi mesin dapat diperkirakan, sehingga model pemesinan hijau dapat dicapai dan efisiensi proses produksi dapat ditingkatkan.

2. Metode

Pada bagian metode, akan dijelaskan beberapa hal yang terkait dengan penelitian, termasuk juga data penelitian, tahapan penelitian dan bagaimana pengukuran dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan penelitian.

2.1 Material

Penelitian ini menggunakan material jenis PX5 dari Daido Steel, Jepang, yang tergolong dalam kelompok *Plastic Mold Steel* untuk penggunaan produk desain *general purpose*. Material ini setara dengan P20 dari AISI dan 1.2330 dari DIN. Material PX5 sering digunakan sebagai bahan untuk cetakan plastik, cetakan karet, dan cetakan besi. Pemilihan material ini didasarkan pada fakta bahwa PX5 merupakan material utama untuk bagian *cavity (female part)* yang memerlukan kekasaran permukaan tertentu, sehingga membutuhkan waktu proses yang lama [17]. Waktu proses yang lama menunjukkan bahwa material ini dikenai proses pemesinan dalam waktu yang lama dan memerlukan banyak energi [18]. Ukuran spesimen yang digunakan adalah 150 x 80 x 20 mm, dengan jumlah spesimen sebanyak 27 buah.

2.2 Mesin dan Alat Potong

Mesin yang digunakan adalah mesin CNC Milling merk Makino dengan kontroler Fanuc dengan seri S-33 buatan Singapura tahun 2011. Mesin S-33 merupakan mesin CNC Milling kelas menengah yang banyak dimiliki industri pembuat cetakan karena faktor ketegaran (*rigidity*) yang baik dan populasi mesin ini relatif banyak. 5 dari 10 industri memiliki mesin S-33.

Alat potong yang digunakan adalah alat potong untuk proses *finishing* yaitu *ballnose end mill carbide* dengan diameter 6 mm dan memiliki 2 mata potong (*flutes*). Alat potong dengan material *carbide* memiliki keistimewaan lebih tahan aus, dan mampu menghasilkan kualitas kekasaran permukaan yang rendah. Jenis *end mill* memiliki kemampuan untuk menghasilkan produk dengan akurasi ukuran yang tinggi, serta memiliki ketegaran yang baik sehingga rendah defleksi dan rendah getaran. Geometri alat potong seri *ballnose* merupakan alat potong untuk *finishing* dengan kualitas kekasaran rendah, sehingga kualitas permukaan lebih halus [19]. Seri alat potong yang digunakan adalah GSXB20300.

2.3 Data Penelitian

Data dalam penelitian ini diperoleh dari eksperimen yang menggunakan desain *Box Behnken Design* (BBD). BBD memiliki keistimewaan dengan memberikan hasil yang akurat dalam kondisi eksperimen terbatas dan membutuhkan jumlah eksperimen yang lebih sedikit [20], [21]. Desain eksperimen yang digunakan adalah matrik *orthogonal L₂₇* (3^4), yang berarti terdiri dari 27 eksperimen dengan 4 faktor yang diobservasi pada 3 level. Empat faktor dalam penelitian ini mengacu pada parameter pemesinan yang akan dikaji terkait dengan konsumsi energi yang dihasilkan. Detail parameter pemesinan dapat dilihat pada Tabel 1. Pemilihan parameter didasarkan pada praktik yang biasa dilakukan dalam proses *finishing*.

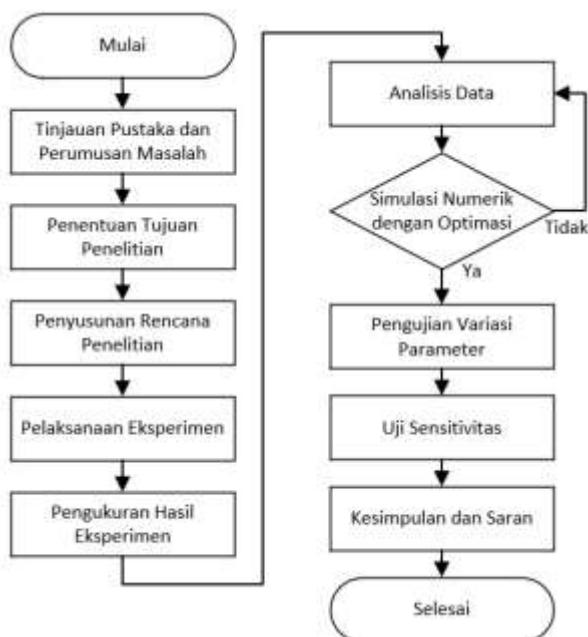
Data parameter pemesinan diolah menggunakan software Minitab 18 dengan metode *response surface methodology*.

Tabel 1. Parameter Pemesinan

No	Parameter	Notasi	Level			Satuan
			-1	0	1	
1	Kecepatan Potong	X ₁	35	55	75	m/min
2	Laju Pemakanan	X ₂	4	8	12	mm/dtk
3	Kedalaman Pemakanan	X ₃	0.2	0.3	0.4	mm
4	Lebar Pergeseran Pemakanan	X ₄	0.2	0.3	0.4	mm

2.4 Tahapan Penelitian

Gambar 1 menjelaskan tahapan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan alur penelitian yang jelas, arah dan sistematika akan terjaga alurnya, terukur capaiannya, dan permasalahan yang ada dapat dijawab sehingga tujuan penelitian dapat tercapai.



Gambar 1. Diagram Alur Tahapan Penelitian

2.5 Pengukuran Hasil Penelitian

Secara garis besar, pengukuran yang dilakukan dalam penelitian ada 2 yaitu pengukuran sebelum pelaksanaan eksperimen untuk menguji homogenitas material pada spesimen dan pengukuran yang dilakukan setelah eksperimen yang dilakukan untuk mengukur hasil respon yang muncul pada spesimen dan pada alat ukur konsumsi energi. Uji homogenitas yang dilakukan sesuai standar pengujian alat potong berdasar ISO-8688 [22] untuk memastikan tidak adanya defleksi akibat ketidakseragaman komposisi [23].

Alat yang digunakan untuk uji homogenitas material spesimen adalah alat ukur kekerasan material logam baja

yaitu Wizhard HR-522, merk Mitutoyo, buatan Jepang tahun 2019 seperti terlihat pada Gambar 2. Alat yang digunakan untuk mengukur konsumsi energi adalah *Power Analyzer* WT-1800, merk Yokogawa, buatan Jepang tahun 2015.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Penelitian

Operasi pemesinan diawali dengan melakukan uji homogenitas sesuai standar ISO-8688. Tabel 2 menjelaskan hasil uji homogenitas yang dilakukan terhadap 8 dari 27 spesimen. Jumlah minimal spesimen yang dibutuhkan untuk uji homogenitas adalah sebanyak parameter pemesinan yang diobservasi. Berdasarkan Tabel 1, jumlah parameter yang terpilih adalah 4 buah. Dengan demikian jumlah minimal spesimen uji homogenitas adalah 4 buah. Tetapi, dengan mempertimbangkan aspek kecukupan spesimen yang tersedia dimana terdapat 27 spesimen [22], dan teori prediksi menyatakan bahwa replikasi dapat meningkatkan kecermatan sebuah model prediksi [24], [25], maka ditentukan 8 buah spesimen uji yang merepresentasikan 4 parameter.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kekerasan Spesimen

No	Hasil Pengukuran (HRc)					Rata-rata Kekerasan	Deviasi %
	Titi k Uji 1	Titi k Uji 2	Titi k Uji 3	Titi k Uji 4	Titi k Uji 5		
1	39,2	39,2	39,7	39,7	39,6	39,48	0,56
2	40,8	40,7	40,8	40,8	41,1	40,84	0,64
3	41,0	40,8	40,8	40,8	41,1	40,9	0,49
4	40,9	40,8	40,9	40,9	41,1	40,92	0,44
5	41,1	41,2	40,8	40,8	41,0	40,98	0,54
6	40,1	40,0	39,6	39,5	40,1	39,86	0,60
7	39,8	39,9	39,8	39,8	39,6	39,78	0,30
8	39,7	39,6	40,1	40,1	39,8	39,86	0,60

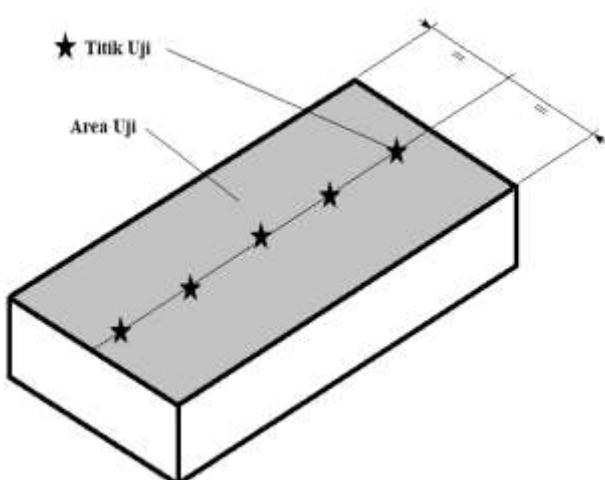
Uji homogenitas dilakukan dengan mengukur kekerasan material spesimen pada 5 titik uji yang terletak segaris di area uji pada permukaan spesimen seperti diilustrasikan pada gambar 3. Nilai hasil pengujian dari setiap spesimen dirata-rata dan dihitung nilai deviasinya.

Tabel 3 menampilkan urutan proses pemesinan, parameter pemesinan (X_1-X_4) yang merupakan input sedangkan Z_1 mewakili respon kekasaran permukaan dan Z_2 yang mewakili respon arus yang dikonsumsi oleh mesin. Secara spesifik, arus ini diukur pada sisi motor spindle atau motor yang menggerakkan alat potong. Satuan dari arus adalah amper sedangkan satuan kekasaran permukaan adalah μm (*micron meter*).

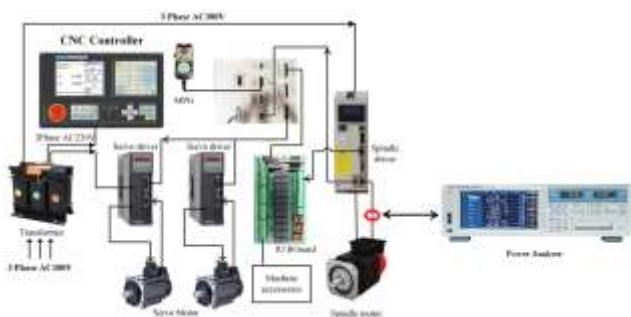
Gambar 4 menunjukkan lokasi titik pengukuran arus pada mesin CNC Milling. Gambar lingkaran merah pada Gambar 4 menunjukkan lokasi pemasangan sensor.



Gambar 2. Alat Uji Kekerasan Material Wizhard HR-522



Gambar 3. Titik Pengujian Kekerasan Spesimen



Gambar 4. Konfigurasi Pengukuran Arus Motor Spindle

Tabel 3. Urutan Pemesinan dan Hasil Pengukuran

No	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Z ₁	Z ₂
1	55	12	0,4	0,3	159	6,77
2	55	8	0,3	0,3	128	5,31
3	35	8	0,3	0,4	162	5,41
4	55	4	0,3	0,4	148	4,52
5	55	12	0,3	0,4	182	6,54
6	55	8	0,3	0,3	131	5,33
7	55	12	0,2	0,3	131	6,23
8	35	8	0,4	0,3	151	5,66
9	75	4	0,3	0,3	131	4,52
10	55	4	0,2	0,3	120	4,12
11	75	8	0,3	0,4	165	5,32
12	75	8	0,4	0,3	154	5,67
13	75	12	0,3	0,3	137	6,57
14	75	8	0,2	0,3	115	5,13
15	75	8	0,3	0,2	93	5,33
16	35	8	0,3	0,2	105	5,32
17	55	8	0,2	0,2	70	5,14
18	35	8	0,2	0,3	128	5,12
19	35	4	0,3	0,3	134	4,51
20	55	8	0,3	0,3	137	5,32
21	55	8	0,4	0,4	210	5,67
22	55	8	0,2	0,4	128	5,14
23	55	4	0,3	0,2	105	4,56
24	55	8	0,4	0,2	114	5,67
25	55	12	0,3	0,2	105	6,53
26	35	12	0,3	0,3	111	6,52
27	55	4	0,4	0,3	137	4,87

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

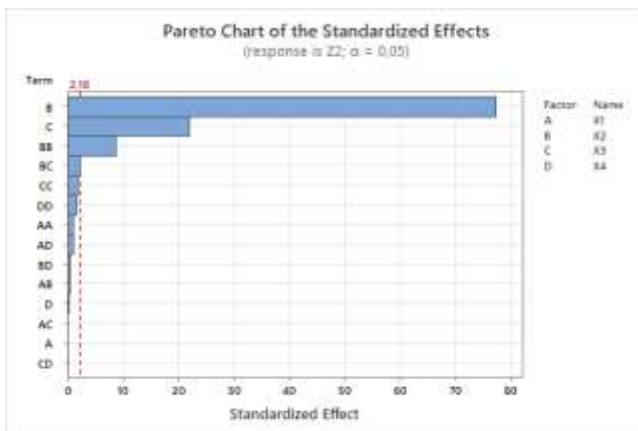
Pada Tabel 2 yang berisi hasil pengukuran kekerasan spesimen, terlihat bahwa deviasi kekerasan masing-masing spesimen berada di bawah 1%. Deviasi maksimal yang diizinkan menurut ISO-8688 adalah 5%. Perbedaan nilai kekerasan material spesimen di bawah 5% merupakan selisih perbedaan yang diizinkan menurut standar ISO. Perbedaan nilai 1% menunjukkan bahwa penyimpangan nilai persentase heterogenitas penyusun material spesimen dianggap sama dengan perbedaan sebesar 1%. Nilai 1% masih berada jauh di bawah ambang batas yang diizinkan. Hal ini berarti bahwa eksperimen dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya karena sudah memenuhi ketentuan aspek homogenitas yang disebut dalam ISO-8688 secara meyakinkan.

Tabel 3 menampilkan urutan (*run order*) pemesinan spesimen, parameter pemesinan (X₁-X₄) yang merupakan

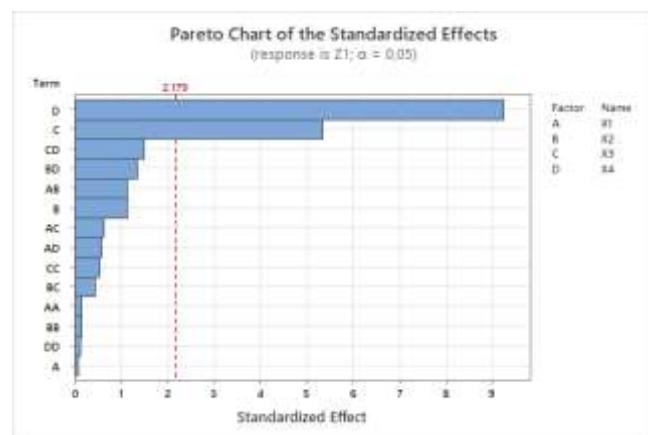
input, Z_1 adalah respon yang mewakili nilai kekasaran permukaan, dan Z_2 adalah respon yang mewakili nilai konsumsi energi. Output Z_1 dan Z_2 diukur dari hasil eksperimen pemesinan. X_1 merupakan kecepatan potong, X_2 merupakan laju pemakanan, X_3 merupakan kedalaman pemakanan, dan X_4 merupakan lebar pergeseran pemakanan seperti dijelaskan pada Tabel 1.

Dengan menggunakan aplikasi Minitab V18, diperoleh persamaan regresinya dan informasi lainnya yang berbasiskan *response surface methodology*. *Pareto chart* adalah diagram batang yang menunjukkan tingkat kontribusi dan tingkat kepentingan dampaknya dari satu atau beberapa parameter dalam suatu proses. *Pareto Chart* pada Gambar 5 menjelaskan bahwa parameter pemesinan laju pemakanan (X_2) dan kedalaman pemakanan (X_3) mempengaruhi konsumsi energi (Z_2) secara signifikan. Tingkat signifikansi tersebut dijelaskan dengan kondisi bahwa ujung kanan diagram batang X_2 dan X_3 berada jauh di sebelah kanan garis referensi vertikal putus-putus berwarna merah. Parameter kecepatan potong (X_1) dan lebar pergeseran pemakanan (X_4) mempengaruhi konsumsi energi (Z_2) secara tidak signifikan. Hal tersebut dijelaskan oleh posisi ujung kanan diagram batang X_1 dan X_4 yang berada di sebelah kiri garis referensi vertikal putus-putus berwarna merah.

Pareto Chart Gambar 6 menjelaskan bahwa parameter pemesinan lebar pergeseran pemakanan (X_4) dan kedalaman pemakanan (X_3) mempengaruhi kekasaran permukaan (Z_1) secara signifikan. Hal ini ditunjukkan dengan ujung kanan diagram batang lebar pergeseran pemakanan (X_4) dan kedalaman pemakanan (X_3) yang berada jauh di sebelah kanan garis referensi vertikal putus-putus warna merah. Laju pemakanan (X_2) dan kecepatan potong (X_1) mempengaruhi kekasaran permukaan (Z_1) secara tidak signifikan.



Gambar 5. Tingkat Signifikansi Parameter terhadap Konsumsi Energi



Gambar 6. Tingkat Signifikansi Parameter terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan perhitungan matematis pada simulasi numerik, diperoleh persamaan regresi untuk Z_1 dan Z_2 seperti ditampilkan pada persamaan (1) dan (2).

$$\begin{aligned} Z_1 = & 238 - 1,63*X_1 - 13,26*X_2 - 436*X_3 - 177*X_4 - \\ & 0,0022*X_1^2 + 0,055*X_2^2 + 300*X_3^2 - 75*X_4^2 + \\ & 0,0906*X_1*X_2 + 2,00*X_1*X_3 + 1,88*X_1*X_4 + \\ & 6,9*X_2*X_3 + 21,3*X_2*X_4 + 950*X_3*X_4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & 3,531 - 0,00367*X_1 + 0,1035*X_2 + 1,68*X_3 - \\ & 1,45*X_4 + 0,000058*X_1^2 + 0,01068*X_2^2 + 3,71*X_3^2 \\ & + 3,21*X_4^2 + 0,000125*X_1*X_2 - 0,0125*X_1*X_4 - \\ & 0,1313*X_2*X_3 + 0,0312*X_2*X_4 \end{aligned} \quad (2)$$

Informasi dari Gambar 5 tentang hubungan antara parameter pemesinan dengan konsumsi energi, menguatkan penelitian terdahulu dari para peneliti pada area yang sama. Konsumsi energi dipengaruhi oleh laju pemakanan dan kedalaman pemakanan secara signifikan [6], [9], [26], [27]. Sementara itu, informasi pada Gambar 6 tentang hubungan parameter pemesinan dengan kekasaran permukaan sejalan dengan beberapa peneliti terdahulu [28], [29].

Signifikansi laju pemakanan dalam mempengaruhi konsumsi energi sangat meyakinkan. Tingkat signifikansi kedalaman pemakanan terhadap konsumsi energi juga meyakinkan. Berdasarkan *pareto chart*, jika dikuantifikasi dalam skala 1-10, nilai pengaruh laju pemakanan terhadap konsumsi energi diwakili angka 8, sedangkan kedalaman pemakanan berada di nilai 2. Dalam skala ini, semakin besar angka mempunyai arti semakin signifikan [25], [30].

Laju pemakanan yang semakin besar mempunyai arti membutuhkan tenaga (energi) yang semakin besar juga untuk memotong material spesimen secara baik. Semakin kecil laju pemakanan, semakin kecil tenaga (energi) yang dibutuhkan. Demikian juga untuk parameter kedalaman pemakanan. Semakin dalam pemotongan, semakin besar tenaga (energi) yang dibutuhkan [6], [9], [26], [27]. Akumulasi kebutuhan tenaga (energi) yang besar untuk mengakomodir laju pemakanan dan kedalaman pemakanan,

merepresentasikan kebutuhan arus listrik yang menjadi dasar penentuan tingkat konsumsi energi.

Besarnya pengaruh laju pemakanan dan kedalaman pemakanan juga tercermin pada persamaan regresi (2) dimana nilai koefisien untuk varibel bebas X_2 dan X_3 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai koefisien untuk variabel bebas X_1 dan X_4 .

3.3 Optimasi Parameter Rendah Konsumsi Energi

Model prediksi konsumsi energi akan menjadi suatu model yang berdampak rendah jika tidak dilanjutkan sampai pada tahapan optimasi. Pada tahapan optimasi, dengan menggunakan model optimasi yang bersifat multi tujuan, parameter pemesinan disimulasikan secara numeris menggunakan *response surface methodology* yang merupakan gabungan pendekatan metode *operational research* dan statistik, untuk menghasilkan nilai parameter pemesinan yang menghasilkan konsumsi energi yang rendah. Dengan konsumsi energi yang rendah, aktivitas untuk mencapai pemesinan hijau atau ramah energi akan dapat dicapai. Dalam optimasi tersebut, tujuan yang menjadi titik kuncian adalah kekasaran permukaan. Melalui optimasi ini, dengan energi yang lebih rendah, kekasaran permukaan yang sama dapat dicapai [9], [28].

Pada Tabel 3, jumlah spesimen dengan kekasaran di atas 160 μm berjumlah 15%, di bawah 80 μm berjumlah 4%, dan berada pada rentang 80-160 μm berjumlah 81%. Jumlah spesimen dengan konsumsi arus di atas 6 A berjumlah 22%, di bawah 4 A berjumlah 22%, dan di antara 5-6 A berjumlah 56%. Pada optimasi ini, ingin diperoleh spesimen dengan kekasaran yang berada pada rentang 80-160 μm , tetapi dengan konsumsi arus di bawah 4 A.

Pada proses optimasi ini, nilai tujuan untuk kekasaran permukaan adalah berada pada rentang 80-160 μm dan nilai tujuan konsumsi energi adalah minimasi dengan batas maksimal 5 A. Dengan simulasi numerik menggunakan aplikasi Minitab V18, diperoleh nilai parameter pemesinan seperti ditampilkan oleh Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Nilai Parameter Pemesinan Hasil Optimasi

No	Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
1	Kecepatan Potong	X_1	69	m/min
2	Laju Pemakanan	X_2	5.2	mm/dtk
3	Kedalaman Pemakanan	X_3	0,22	mm
4	Lebar Pergeseran Pemakanan	X_4	0,33	mm

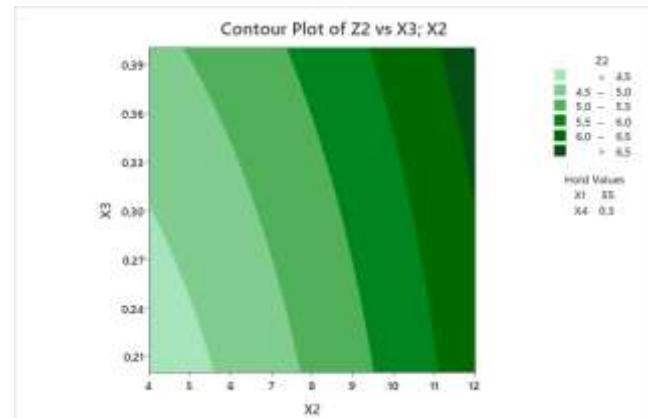
3.4 Pengujian Parameter Hasil Optimasi

Untuk mendapatkan gambaran tentang kinerja model prediksi, pengujian terhadap persamaan regresi konsumsi energi perlu dilakukan. Tabel 5 menjelaskan output hasil pengujian berdasarkan perhitungan matematis dan output hasil pengujian yang dilakukan secara langsung di mesin CNC milling. Pengujian ini dilakukan pada 8 spesimen baru.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Prediksi dengan Hasil Pemesinan

No	Hasil Prediksi		Hasil Pemesinan		Deviasi %	
	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
1	119	4,5	120	4,5	1	0
2	119	4,5	125	4,6	5	2
3	119	4,5	126	4,6	6	2
4	119	4,5	120	4,5	1	0
5	119	4,5	118	4,4	1	2
6	119	4,5	120	4,4	1	2
7	119	4,5	130	4,7	9	5
8	119	4,5	130	4,7	9	5

Tabel 5 menunjukkan bahwa dari 8 spesimen, nilai kekasaran permukaan dengan target berada pada rentang 80-160 μm tercapai 100%, meskipun terhadap nilai hasil prediksi terdapat deviasi sampai dengan 9%. Demikian juga dengan nilai konsumsi energi yang diminta. Semua spesimen memberikan informasi konsumsi energi yang berada di bawah 5 A, meskipun terhadap nilai hasil prediksi terdapat deviasi sampai dengan 5%. Tabel 5 ini secara meyakinkan menguatkan pendapat para peneliti terdahulu bahwa laju pemakanan dan kedalaman pemakanan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi energi [6], [9], [26], [27], dan bahwa pengaturan variasi parameter pemesinan dapat menjadi sebuah model optimasi dalam proses pemesinan. Pemesinan hijau yang diharapkan dapat dipenuhi dengan model yang diusulkan pada penelitian ini.

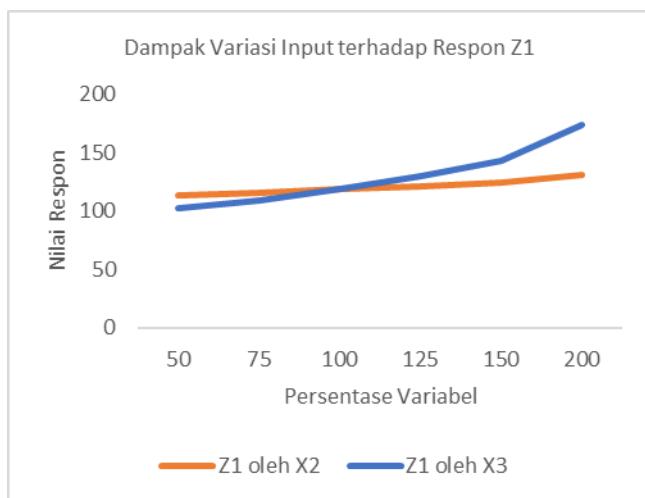


Gambar 7. Contour Plot Interaksi Parameter X_3 dan X_2 terhadap Konsumsi Energi (Z_2)

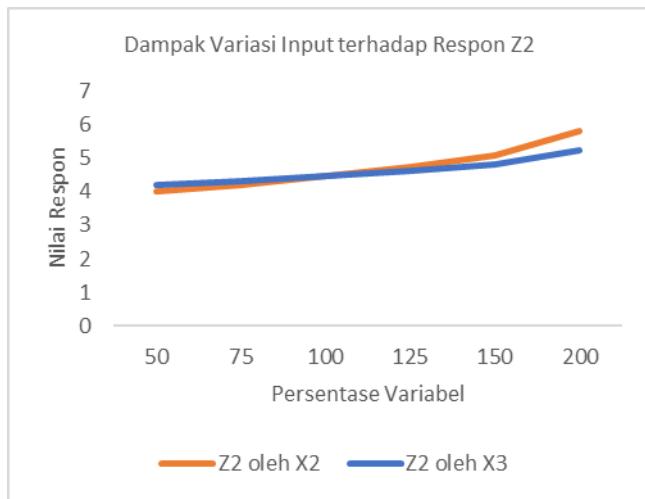
Gambar 7 menjelaskan relasi variabel input X_2 dan X_3 terhadap variabel respon Z_2 . X_2 dan X_3 memiliki hubungan yang linear dengan konsumsi energi. Semakin besar laju pemakanan, semakin besar konsumsi energi. Semakin besar kedalaman pemakanan, semakin besar konsumsi energi. Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu [6], [9], [26], [27].

3.5 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menganalisis dampak perubahan setiap nilai input parameter pemesinan terhadap variabel respon konsumsi energi. Beberapa nilai perubahan persentase variabel input yang digunakan pada pengujian sensitivitas ini mulai dari -50%, -25%, 0%, +25%, +50%, dan +100%.



Gambar 8. Dampak Variasi Input X_2 dan X_3 terhadap Respon Z_1



Gambar 9. Dampak Variasi Input X_2 dan X_3 terhadap Respon Z_2

Mempertimbangkan bahwa variabel X_2 dan X_3 merupakan variabel yang berpengaruh secara signifikan, pada analisis sensitivitas ini, variabel input yang dimainkan adalah X_2 dan X_3 saja. Variasi X_2 terhadap respon Z_1 memberikan dampak perubahan yang linear dan membentuk kurva konvek landai. Variasi X_3 terhadap Z_1 menghasilkan dampak perubahan nilai respon Z_1 yang linear, membentuk kurva konvek tetapi dengan radius lebih kecil seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Variasi X_3 terhadap respon Z_2 memberikan dampak perubahan yang linear dan membentuk kurva konvek landai. Variasi X_2 terhadap Z_2 menghasilkan dampak perubahan nilai respon Z_2 yang linear, membentuk kurva konvek tetapi dengan jari-jari lebih kecil seperti

ditunjukkan pada Gambar 9. Secara ringkas dapat disebutkan variabel respon Z_2 lebih sensitif terhadap input X_2 dan variabel respon Z_1 lebih sensitif terhadap input X_3 . Secara teknis dapat diambil catatan bahwa untuk menurunkan konsumsi energi, menurunkan nilai X_2 akan memberikan hasil lebih signifikan dibandingkan dengan menurunkan nilai X_3 . Hasil penelitian ini secara positif dan meyakinkan senada dengan peneliti terdahulu[11], [19], [20],[31].

4. Kesimpulan

Pada akhir penelitian ini, didapatkan simpulan bahwa usulan model prediksi mampu menekan konsumsi energi pada mesin CNC Milling sehingga pemesinan hijau dapat dicapai. Variasi parameter pemesinan terbukti mampu memenuhi tujuan kekasaran permukaan dan menurunkan konsumsi energi. Parameter pemesinan yang secara signifikan berpengaruh terhadap konsumsi energi adalah laju pemakanan dan kedalaman pemakanan. Pada eksperimen awal, hanya 22% pemesinan yang mengkonsumsi energi kurang dari 5A. Tetapi, berdasarkan pengujian terhadap nilai parameter hasil optimasi, 100% pemesinan mengkonsumsi energi kurang dari 5A. Dengan demikian, diperoleh peningkatan efisiensi energi sebesar 78%. Implikasi bagi manajemen adalah melakukan penerapan nilai parameter dari penelitian ini pada proses pemesinan sehingga mendapatkan kinerja lebih dalam peningkatan efisiensi konsumsi energi. Karena mesin CNC milling bersifat sensitif, adopsi nilai parameter dapat dilakukan secara adaptif dan bertahap supaya penurunan konsumsi energi yang didapatkan sesuai harapan. Selain itu, model prediksi ini juga dapat dikaji lebih lanjut, secara khusus pada variabel respon yang lain seperti konsumsi energi pada motor sumbu gerak.

Daftar Pustaka

- [1] S. Kimura and H. Phoumin, "Energy Outlook and Energy Saving Potential in East Asia 2019." ERIA, 2019.
- [2] A. A. Musyafiq and R. Purwanto, "Peramalan Permintaan Pasokan Energi Berdasarkan Intensitas Konsumsi Listrik dan Kapasitas Pembangkit Listrik Terpasang," *Infotekmesin*, vol. 12, no. 1, pp. 65–70, Mar. 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.442.
- [3] S. D. Riyanto, M. Yusuf, R. P. Dewi, and R. Nurdiansyah, "Rancang Bangun CNC Router 3 Axis Ukir Kayu Untuk Kerajinan Kaligrafi," *Infotekmesin*, vol. 15, no. 1, pp. 171–179, 2024, doi: 10.35970/infotekmesin.v15i1.2156.
- [4] S.-M. Wang, C.-Y. Lee, H. Gunawan, and C.-C. Yeh, "An Accuracy-Efficiency-Power Consumption Hybrid Optimization Method for CNC Milling Process," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 7, Art. no. 7, Apr. 2019, doi: 10.3390/app9071495.
- [5] K. Kusnadi, W. Wahyudin, and B. Nugraha, "Usulan Kebijakan Pemeliharaan Mesin Untuk Mengurangi Frekuensi Breakdown Menggunakan Reliability Centered Maintenance," *Infotekmesin*, vol. 11, no. 2, pp. 158–165, Aug. 2020, doi: 10.35970/infotekmesin.v11i2.254.
- [6] X. Zhang, T. Yu, Y. Dai, S. Qu, and J. Zhao, "Energy consumption considering tool wear and optimization of cutting parameters in micro milling process," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 178, p. 105628, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105628.

- [7] J. Mumtaz *et al.*, "Multi-objective optimisation for minimum quantity lubrication assisted milling process based on hybrid response surface methodology and multi-objective genetic algorithm," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 4, p. 168781401982958, Apr. 2019, doi: 10.1177/1687814019829588.
- [8] S. Shankar, T. Mohanraj, and R. Rajasekar, "Prediction of cutting tool wear during milling process using artificial intelligence techniques," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1550681>.
- [9] J. Zhao, L. Li, and C. Li, "Optimization Method of Partitioned Complex Surface CNC Milling for Minimum Energy Consumption and High Efficiency," *Zhongguo Jixie Gongcheng China Mech. Eng.*, vol. 30, pp. 64–71, Jan. 2019, doi: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.01.009.
- [10] G. Singh, V. Aggarwal, and S. Singh, "Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining," *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122185, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122185.
- [11] W. Ming, F. Shen, G. Zhang, G. Liu, J. Du, and Z. Chen, "Green machining: A framework for optimization of cutting parameters to minimize energy consumption and exhaust emissions during electrical discharge machining of Al 6061 and SKD 11," *J. Clean. Prod.*, vol. 285, p. 124889, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124889.
- [12] S. Lubis, Rosehan, S. Darmawan, and B. Indra, "Tool Wear Analysis of Coated Carbide Tools on Cutting Force in Machining Process of AISI 4140 Steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 852, no. 1, p. 012083, Jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/852/1/012083.
- [13] B. Öztürk, L. Uğur, and A. Yıldız, "Investigation of effect on energy consumption of surface roughness in X-axis and spindle servo motors in slot milling operation," *Measurement*, vol. 139, pp. 92–102, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.02.009.
- [14] L. Hu, R. Tang, W. Cai, Y. Feng, and X. Ma, "Optimisation of cutting parameters for improving energy efficiency in machining process," *Robot. Comput. Integrat. Manuf.*, vol. 59, pp. 406–416, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.04.015.
- [15] R. Yin, J. Ke, G. Mendis, and J. W. Sutherland, "A cutting parameter-based model for cost and carbon emission optimisation in a NC turning process," *Int. J. Comput. Integrat. Manuf.*, vol. 32, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1080/0951192X.2019.1667026.
- [16] M. Malekan, C. D. Bloch-Jensen, M. A. Zolbin, K. B. Ørskov, H. M. Jensen, and R. Aghababaei, "Cutting edge wear in high-speed stainless steel end milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 114, no. 9–10, pp. 2911–2928, Jun. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07006-5.
- [17] C. Maria and P. Ana, "Modification of the Cavity of Plastic Injection Molds: A Brief Review of Materials and Influence on the Cooling Rates," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7249, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14237249>.
- [18] D. Hermanto, Y. Burhanuddin, S. Harun, and G. Ibrahim, "Analisis Konsumsi Energi Listrik Universal Milling Machine Pada Berbagai Keadaan Operasi dan Parameter Pemesinan," *Mechanical*, vol. 9, no. 1, Nov. 2018, doi: 10.23960/mech.v9.i1.201806.
- [19] L. Yung-Chih, W. Kung-Da, and S. Wei-Cheng, "Evaluation of the optimum machining stability of a milling tool with different flutes and overhangs," *Adv. Sci. Technol. – Res. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 56–64, 2019, doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/106235>.
- [20] J. Yang, Y. Zhang, Y. Huang, J. Lv, and K. Wang, "Multi-objective optimization of milling process: exploring trade-off among energy consumption, time consumption and surface roughness," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 36, no. 2, pp. 219–238, Feb. 2023, doi: 10.1080/0951192X.2022.2078511.
- [21] T. N. Wibowo, H. Hartono, and B. Sugiantoro, "Optimasi Parameter Gravitasi Shot Peening Terhadap Kekerasan, Kekerasan dan Struktur Mikro ST 45 dengan Metode Taguchi," *Infotekmesin*, vol. 12, no. 1, pp. 28–35, Mar. 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.519.
- [22] I. O. for Standardization, *Tool Life Testing in Milling - End milling*. in ISO 8688. Geneve: ISO, 1989. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=V1c8yQEACAAJ>
- [23] D. Kumar, G. S. Dangayach, and P. N. Rao, "An experimental investigation to optimise injection moulding process parameters for plastic parts by using Taguchi method and multi-objective genetic algorithm," *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 9, no. 1, pp. 1–26, Feb. 2019, doi: 10.1504/IJPMB.2019.10019073.
- [24] B. Singh and H. Sodhi, *RSM: A Key to Optimize Machining. Multi-Response Optimization of CNC Turning with Al-7020 Alloy*. Hamburg: Anchor Academic Publishing, 2014. [Online]. Available: www.anchor-publishing.com
- [25] M. Yanis, A. S. Mohruni, S. Sharif, I. Yani, A. Arifin, and B. Khona'ah, "Application of RSM and ANN in Predicting Surface Roughness for Side Milling Process under Environmentally Friendly Cutting Fluid," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1198, no. 4, p. 042016, Apr. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1198/4/042016.
- [26] C. Feng, H. Guo, J. Zhang, Y. Huang, and S. Huang, "A Systematic Method of Optimization of Machining Parameters Considering Energy Consumption, Machining time and Surface Roughness with Experimental Analysis," In Review, preprint, Jul. 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-669643/v1.
- [27] J. Lv, S. Jia, H. Wang, K. Ding, and F. T. S. Chan, "Comparison of different approaches for predicting material removal power in milling process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 116, no. 1–2, pp. 213–227, Sep. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07257-2.
- [28] Y. T. Wibowo, N. Siswanto, and M. Suef, "Response surface methodology approach in achieving multi-response setup optimization in the machining process," *Salud Cienc. Tecol.*, vol. 2, no. S2, p. 190, Dec. 2022, doi: 10.56294/saludcyt2022190.
- [29] Y. Su, C. Li, G. Zhao, C. Li, and G. Zhao, "Prediction models for specific energy consumption of machine tools and surface roughness based on cutting parameters and tool wear," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 235, no. 6–7, Art. no. 6–7, May 2021, doi: 10.1177/0954405420971064.
- [30] P. J. Whitcomb, *RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*, 1st ed. Productivity Press, 2004. doi: 10.4324/9781482293777.
- [31] Gatot Setyono, Slamet Riyadi, Muhamrom, Ong Andre Wahyu Riyanto, and Sigit Pratama, "Effect of Cutting Parameter Toward The Surface Roughness Applied In Turning Tool Steel Material," *Infotekmesin*, vol. 13, no. 2, pp. 233–238, Jul. 2022, doi: 10.35970/infotekmesin.v13i2.1533.