

Identifikasi Aliran Energi Listrik pada Mesin CNC Machining Center

^{1)*}Sony Harbintoro, ²⁾Rafika Ratik Srimurni

¹⁾BBSPJILM – Kementerian Perindustrian

Jl. Sangkuriang 12 Bandung Jawa Barat Indonesia 40135

email: sony-harbintoro@kemenperin.go.id

²⁾Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Nusantara

Jl. Soekarno Hatta No.530 Bandung, Jawa Barat 40286

email: rafika.ratik@uininus.ac.id

Diterima: 11.08.2023, Disetujui: 27.10.2023, Diterbitkan: 15.11.2023

ABSTRACT

CNC machine tools have been widely used in the process and manufacturing industries, which have the potential to increase the intensity of electrical energy consumption so that energy efficiency is needed. Energy efficiency is a necessity for the sustainability of the process and manufacturing industrial sector which will be related to energy costs and environmental factors. In order to carry out energy efficiency, it is necessary to identify the consumption of electrical energy by tracing and mapping the electrical energy flow to the components in a CNC machining center machine, so opportunities for energy savings can be known. This research was conducted by collecting data by monitoring energy consumption in stand-by, setting and cutting machine conditions. Cutting tests are carried out to determine the energy consumption of each machine component that affects energy use. After that it can be seen the energy flow pattern by classifying the energy user components into primary and secondary components. Based on the analysis of electrical energy consumption data during the cutting process, it is known that the significant energy users are the spindle motor, the axis feed motor (X, Y, Z) and the coolant motor.

Keywords : *identification, energy flow, cnc machining center, energy consumption*

ABSTRAK

Mesin perkakas CNC telah banyak digunakan pada industri proses dan manufaktur, yang berpotensi dapat meningkatkan intensitas penggunaan energi listrik sehingga diperlukan efisiensi energi. Efisiensi energi menjadi suatu kebutuhan untuk keberlanjutan sektor industri proses dan manufaktur yang akan berhubungan dengan biaya energi dan faktor lingkungan. Dalam rangka melakukan efisiensi energi, perlu dilakukan identifikasi penggunaan energi listrik dengan menelusuri dan pemetaan aliran energi listrik pada komponen-komponen di mesin CNC *machining center*, sehingga didapatkan peluang untuk penghematan energi. Penelitian ini dilaksanakan dengan melakukan pengumpulan data dengan monitoring konsumsi energi pada kondisi mesin *stand by*, *setting* dan *cutting*. *Test cutting* dilakukan untuk mengetahui konsumsi energi pada setiap komponen mesin yang berpengaruh terhadap penggunaan energi. Setelah itu dapat diketahui pola aliran energi dengan mengklasifikasikan komponen pengguna energi pada komponen primer dan sekunder. Berdasarkan analisis data penggunaan energi pada saat proses *cutting*, maka diketahui bahwa pengguna energi terbesar yaitu motor spindle, motor axis feed (X, Y, Z) dan motor *coolant*.

Kata Kunci : identifikasi, aliran energi, cnc machining center, konsumsi energi

I. Pendahuluan

Penggunaan mesin perkakas CNC (*computer numerical control*) saat ini sudah cukup populer dan banyak diaplikasikan untuk berbagai proses pemesinan. Proses pemesinan dengan mesin manual telah banyak bergeser ke proses pemesinan dengan mesin CNC untuk mendapatkan produktivitas yang tinggi serta akurasi geometri yang diinginkan. Sejalan dengan

itu, maka intensitas penggunaan energi pada industri manufaktur menjadi meningkat. Untuk itu diperlukan langkah-langkah yang komprehensif dalam melakukan manajemen energi pada sektor industri proses dan manufaktur. Dengan perkembangan teknologi saat ini yang memungkinkan proses produksi dan manufaktur yang dilakukan secara otomatis akan mengintensifkan penggunaan energi di sektor ini (Paetzold,

Kolouch, Wittstock, & Putz, 2017). Semua aspek ini mendorong semua pihak seperti pemerintah sebagai pemangku kebijakan dan pelaku usaha agar melakukan efisiensi energi pada sektor industri proses dan manufaktur diantaranya pada mesin perkakas seperti yang dibahas pada *ISO 14955-1:2017 Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools*.

Penggunaan energi mesin perkakas pada industri proses dan manufaktur dapat mencapai 68% dari total kebutuhan energi perusahaan (Shabi, Weber, & Weber, 2017). Proses produksi seperti : *milling, turning, drilling*, dll., merupakan proses yang membutuhkan energi listrik yang cukup besar. Atas dasar itu, maka industri proses dan manufaktur yang menerapkan efisiensi energy menjadi suatu kebutuhan untuk keberlanjutan sektor industri proses dan manufaktur yang akan berhubungan dengan biaya energy dan factor lingkungan (Sihag, Singh, & Pundir, 2018).

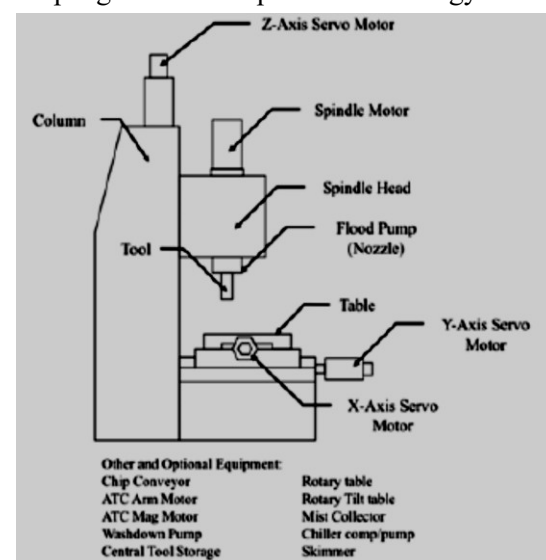
Mesin-mesin CNC seperti mesin bubut CNC, milling CNC merupakan mesin-mesin yang banyak dimiliki oleh perusahaan besar ataupun industri kecil menengah dan banyak mengkonsumsi energi listrik (Zhu, Stief, Dantan, Etienne, & Siadat, 2018). Setiap mesin CNC terdiri atas berbagai komponen yang mengkonsumsi energi listrik. Komponen-komponen tersebut merupakan komponen primer yang berpengaruh besar dalam proses pemesinan atau komponen sekunder sebagai pendukung untuk proses pemesinan. Untuk itu diperlukan pengetahuan tentang pemetaan komponen primer dalam mesin CNC sebagai pengguna energi yang spesifik. Pengguna energi spesifik pada setiap mesin CNC berbeda-beda, namun dengan pemetaan setiap komponen pengguna energi dapat membantu dalam melakukan penghematan energi. Dengan banyaknya penggunaan mesin CNC pada berbagai sektor manufaktur, maka penghematan dalam penggunaan energi di mesin CNC dapat berpengaruh besar pada total konsumsi energi (Hu et al., 2017). Sebagai contoh, dengan melakukan sedikit perubahan setting pada akserasi motor spindle di mesin perkakas dapat menghemat energy listrik. Kecepatan akselerasi putaran pada motor spindle di mesin bubut akan mempengaruhi pola konsumsi energy listrik (Lv, Tang, Tang, Liu, & Zhang, 2017).

Untuk memprediksi konsumsi energi dan optimasi pada desain mesin perkakas dapat dilakukan dengan pemetaan aliran energy (Triebe,

Mendis, Zhao, & Sutherland, 2018). Metode lain yang digunakan untuk optimasi desain mesin perkakas dapat dilakukan dengan pembuatan model empiris konsumsi energi berbasis model fisik (Yi li, Krenkel Nicole, 2018). Pemodelan empiris dibuat berdasarkan fungsi dari setiap komponen mesin dan perilaku komponen sebagai sub sistem terhadap konsumsi energi.

Dalam tahap perencanaan pemilihan mesin harus disesuaikan dengan proses produksi untuk menghindari fungsi komponen/fitur dari mesin yang tidak dibutuhkan sehingga bisa mengurangi penggunaan energi. Pada proses pemilihan mesin perkakas yang disesuaikan dengan proses produksi dapat menggunakan *key performance index* (Um, Gontarz, & Stroud, 2015). Untuk mengetahui karakteristik konsumsi energy pada mesin perkakas, dapat dilakukan *bench marking* pada beberapa mesin perkakas sejenis untuk menginvestigasi penggunaan energi sehingga mendapatkan data pola konsumsi energi dari setiap mesin (Wirtz, Meißner, Wiederkehr, & Myrzik, 2018). Proses pengumpulan data pemakaian energi dapat dilakukan dengan melakukan *test cutting* pada setiap mesin dengan parameter operasi yang sama dan material benda kerja yang sama, sehingga didapat variasi data konsumsi energi dari setiap mesin CNC *machining center*.

Pada Gambar 1., ditunjukkan skema mesin CNC *vertical machining center* yang menggambarkan komponen/sub rakitan yang berpengaruh terhadap konsumsi energy.



Gambar 1. Skema mesin CNC vertical machining center (Triebe et al., 2018)

Salah satu permasalahan utama dalam mengimplemetasikan efisiensi energy pada system produksi manufaktur yaitu kurangnya pengetahuan tentang konsumsi energy pada proses produksi dan peralatan seperti mesin perkakas (Wirtz, Biermann, Meißner, Wiederkehr, & Myrzik, 2018).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan identifikasi penggunaan energi listrik dengan menelusuri dan pemetaan aliran energy listrik pada komponen pengguna energi listrik di mesin CNC *machining center*. Manfaat dari penelitian ini didapatkan peluang penghematan energy dengan mengidentifikasi komponen-komponen yang signifikan mengkonsumsi energi listrik pada mesin CNC *machining center*.

II. Bahan dan Metode

Penelitian dilakukan di suatu workshop permesinan dengan obyek penelitian yaitu mesin CNC *machining center*. Pengambilan data dilakukan dengan melakukan pengamatan dan pengukuran secara langsung pada mesin CNC *machining center*. Pengukuran konsumsi energi listrik dilakukan dengan menggunakan clamp meter KY 2055 AC/DC dan *smart energy meter* yang terhubung ke server sehingga data konsumsi energi bisa di-*record* ataupun bisa dilihat secara *real time*. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan parameter kelistrikan yang meliputi, tegangan, arus, daya dan energi listrik (Ahadi Khalif., 2019). Pengukuran dilakukan pada saat mesin dalam kondisi *setting*, *cutting*, dan *idle*. Data primer dikumpulkan dari hasil pengukuran energy pada saat mesin dioperasikan sedangkan data sekunder dikumpulkan dari data *record* konsumsi energi pada *server*. *Smart energy meter* dihubungkan pada panel listrik mesin CNC *machining center* menggunakan CT 100/5A sedangkan data hasil pengukuran dikoneksikan melalui kabel ke *switch hub*, yang kemudian di-*uplink* ke *server* melalui koneksi *WiFi*. Data dari *server* dimunculkan pada *dashboard* konsumsi energy, sehingga konsumsi energy listrik dapat di monitor secara langsung melalui perangkat PC atau *smartphone*. Sebagai objek penelitian pengamatan dan pengukuran energy yatu mesin CNC *machining center* 3 axis dengan spesifikasi mesin sebagai berikut.

Tabel 1. Spesifikasi mesin CNC *machining center*

No	Data teknis mesin CNC <i>machining center</i>
1	Travel X / Y / Z 39.37 / 21.65 / 19.68 Inch
2	Working surface 43.3 x 19.68 Inch

3	Spindle speed	10000	rpm
4	Daya	30	kVA
5	Tegangan	380 ; 3 Ø	volt
6	Frekuensi	50	Hz

Pada mesin CNC *machining center* terdapat beberapa motor listrik sebagai pengguna energi listrik, seperti ditunjukkan pada Tabel berikut.

Tabel 2. Spesifikasi motor listrik mesin CNC *machining center*

No	Motor listrik	Daya	Satuan
1	Spindle	15	kW
2	Servo X axis	1.8	kW
3	Servo Y axis	1.8	kW
4	Servo Z axis	3.0	kW
5	Pompa Coolant	1.5	kW
6	Spindle cooler	0.18	kW
7	Central lubrication	0.1	kW
8	Chip conveyor	1.5	kW
9	ATC arm	0.1	kW
10	ATC magazine	0.2	kW

Tahapan penelitian dilakukan dengan melakukan studi literature terhadap penelitian sejenis dan *manual book* dari mesin *machining center*, kemudian melakukan pengamatan langsung pada mesin CNC *machining center*. Berdasarkan hasil pengamatan didapat tiga kondisi penggunaan mesin yaitu kondisi mesin *idle (stand by)*, kondisi pada saat *setting* dan kondisi *cutting*. Tahapan berikutnya yaitu melakukan pengumpulan data primer dengan melakukan pengukuran parameter kelistrikan yang meliputi, tegangan, arus, daya dan energi listrik pada setiap kondisi. Untuk mendapatkan data penggunaan energy pada kondisi *setting* dan *cutting* maka dilakukan *test cutting* menggunakan material *mild steel S45C*, dengan *cutting tools flat endmill solid carbide Ø 12 mm*. Selanjutnya setiap komponen pengguna energi di-*breakdown* dan dibagi kedalam klasifikasi komponen inti dan komponen pembantu. Pada penelitian ini komponen pengguna energy listrik yang diklasifikasikan yaitu motor listrik, karena motor listrik mempunyai porsi yang cukup besar dalam konsumsi energy di mesin perkakas khususnya mesin CNC *machining center*. Pengklasifikasian berdasarkan komponen yang paling berpengaruh pada kondisi *cutting*.

Berdasarkan klasifikasi tersebut maka dibuat peta aliran energi pada setiap komponen pengguna energy di mesin CNC *machining center*.

III. Hasil dan Pembahasan

Dari pengamatan perilaku konsumsi energy pada mesin CNC *machining center* terdapat tiga kondisi operasi mesin yang berakibat pada konsumsi penggunaan energi.

Kondisi yang pertama yaitu kondisi *idle (stand by)*. Pada kondisi ini, komponen mesin yang mengkonsumsi daya listrik hanya pada drive controller dan lampu penerangan mesin sedangkan motor spindle dan motor axis belum beroperasi.

Kondisi kedua yaitu kondisi operasi *setting*, dimana pada kondisi ini motor servo X, Y dan Z axis beroperasi secara individu atau secara bersamaan untuk melakukan *setting* benda kerja. Pergerakan mesin *non-cutting* seperti pergerakan *home reference* dimana motor servo X, Y dan Z axis beroperasi secara bersamaan termasuk dalam kondisi *setting*.

Pada kondisi ketiga yaitu kondisi *cutting*, motor servo X, Y, Z axis dan motor spindle beroperasi secara simultan untuk memotong benda kerja.

Untuk mendapatkan gambaran penggunaan energy dari ketiga kondisi diatas, maka diperlukan monitoring penggunaan energy sejak mesin mulai beroperasi. Untuk mengukur konsumsi energy pada kondisi *setting* dan *cutting*, dilakukan *cutting test* dengan parameter proses seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter proses milling

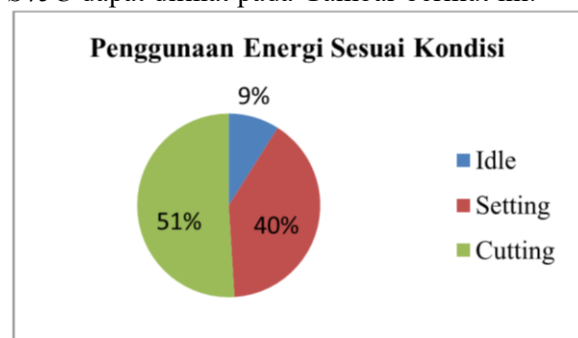
Variabel pemotongan	Nominal	Satuan
Kecepatan potong (Vc)	45 - 75	m/min
Putaran spindle	2750	rpm
Feedrate Fz	0.13	mm/tooth
Depth of cut (ap)	0.4	mm
Diameter tool	12	mm
Jumlah Flute	4	
Type alat potong	FEM Solid carbide	
Material benda kerja	S45C	
Komposisi material	0.45%C, 0.65%Mn, 0.22%Si, 0.004%S, 0.008%P, 0.34%Cr, 0.02%Ni, 0.015%Cu, 0.015%Mo, 0.031%Al,	

Proses *cutting* pada mesin CNC *machining center*, ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. Proses cutting pada mesin CNC *machining center*

Gambaran data penggunaan energy pada proses milling material *mild steel S45C* dapat dilihat pada Gambar berikut ini.



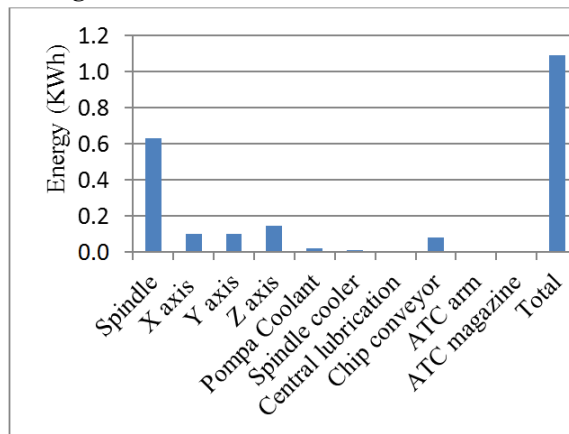
Gambar 3. Persentase penggunaan energy sesuai kondisi

Dari grafik diatas terlihat bahwa persentase penggunaan energy yang paling besar yaitu pada saat kondisi proses *cutting* sebesar 51%, hal ini diakibatkan karena pada saat *cutting*, terdapat banyak komponen mesin khususnya motor listrik yang bekerja secara bersamaan, diantaranya yaitu : motor spindle, motor servo X axis, motor servo Y axis, motor servo Z axis, motor pompa *coolant*, motor *screw chip conveyor*.

Pada kondisi proses *setting*, konsumsi energy sebesar 40%, karena pada proses ini terdapat beberapa kegiatan seperti pemasangan benda kerja pada *table* mesin, kemudian *setting cutting tools* terhadap benda kerja, pemasangan *tool holder* pada *magazine*, dll. Pada saat kondisi *setting*, motor listrik yang bekerja secara individu atau bersamaan, diantaranya yaitu motor servo X axis, motor servo Y axis, motor servo Z axis, motor ATC (*automatic tool changer*) dan motor *tool magazine*. Sedangkan pada kondisi *idle*, konsumsi energy hanya 9% dari total penggunaan energy. Salah satu factor yang menyebabkan pada kondisi *idle*, konsumsi energinya relative rendah, karena proses pembuatan

program *machining* (CAM) dibuat pada komputer *workstation*, kemudian di-*transfer* ke *controller* mesin CNC *machining center*. Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (Triebe et al., 2018), dimana pada penelitiannya dinyatakan persentase dari ketiga kondisi yaitu 40%:40%:20%.

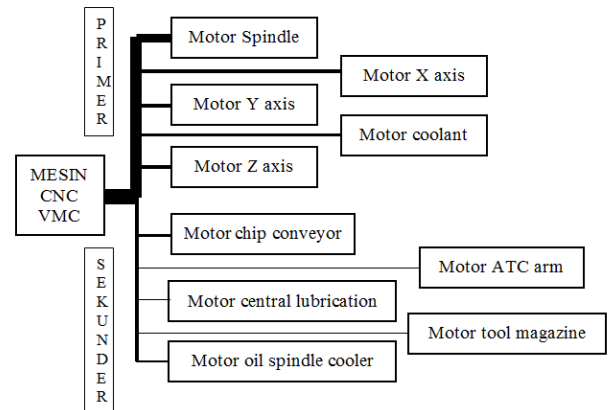
Pada gambar berikut ditunjukkan konsumsi energy pada motor listrik yang terdapat pada mesin CNC *machining center* selama kondisi *cutting*.



Gambar 4. Penggunaan energy pada kondisi cutting

Pada gambar diatas, dapat dilihat bahwa motor spindle merupakan komponen yang menggunakan energy listrik secara signifikan (SEU). Proses start awal pada saat mengoperasikan motor spindle dapat menimbulkan lonjakan arus yang berakibat konsumsi energi menjadi meningkat, selain itu factor setting kecepatan akselerasi putaran motor spindle akan turut mempengaruhi terhadap konsumsi energy listrik. Metode untuk mengurangi konsumsi energy pada motor spindle, menurut penelitian (Lv et al., 2017) dapat dilakukan dengan mengurangi langkah operasi *on* dan *off* yang tidak diperlukan pada motor spindle.

Berdasarkan data pengukuran diatas, maka komponen-komponen khususnya motor listrik yang terdapat pada mesin CNC *machining center*, dapat diklasifikasikan menjadi komponen primer dan komponen sekunder. Komponen primer merupakan komponen yang berpengaruh langsung pada kondisi proses operasi mesin yaitu kondisi *cutting*. Komponen primer ini diantaranya yaitu motor spindle, motor X axis, motor Y axis, motor Z axis, dan motor pompa *coolant*. Sedangkan komponen sekunder yaitu motor *chip conveyor*, motor *central lubrication*, motor *oil spindle cooler*, motor *ATC arm*, dan motor *tool magazine*.



Gambar 5. Pemetaan energy pada mesin CNC *machining center*

Pada gambar 5, dijelaskan mengenai aliran energy pada mesin CNC *machining center*, motor spindle merupakan pengguna energy listrik yang paling signifikan (SEU), setelah itu diikuti oleh motor axis feed (X, Y, Z) dan motor pompa *coolant*. Proses *machining* di mesin CNC *machining center*, terdapat dua tahapan proses yaitu proses *roughing* dan *finishing*.

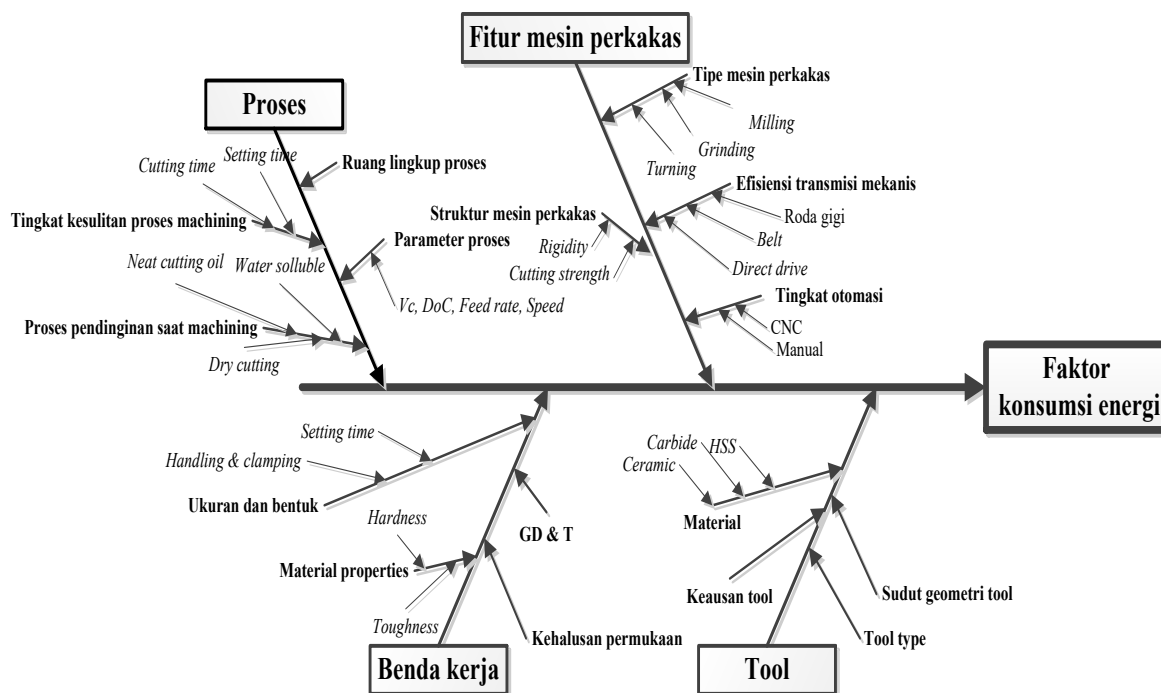
Eksperimen *test cutting*, pada tahapan proses *roughing machining*, konsumsi energy lebih besar dibandingkan dengan tahapan *finishing*, khususnya pada motor spindle. Hal ini disebabkan pada tahapan proses *roughing* dibutuhkan gaya potong yang disalurkan ke *cutting tools* untuk memotong benda kerja, berkorelasi dengan kecepatan potong, laju pemakanan dan kedalaman pemotongan yang menghasilkan MRR (*material removal rate*) yang besar dibandingkan pada proses *finishing* (Harbintoro & Krisnadi, 2020). Dari ketiga parameter proses *cutting*, yang paling berdampak pada konsumsi energy yaitu *depth of cut*, *feed rate* dan diikuti oleh *cutting speed* (Stief, Dantan, Etienne, Siadat, & Design, 2019). Total konsumsi energy pada motor axis feed (X, Y, Z) pada tahapan proses *roughing* dan *finishing* tidak terjadi penurunan yang signifikan, karena gerakan motor axis feed (X, Y, Z) masih mengikuti *tool path* yang sama. Penggunaan energy pada pompa *coolant* (*cutting fluid*) untuk pendingin pada proses *cutting*, hampir sama antara proses *roughing* dan *finishing*, karena putaran pompa motor *coolant* tidak diatur, sehingga motor berputar pada putaran nominal 2855 rpm. Pada eksperimen yang dilakukan, proses *cutting* menggunakan *coolant* sehingga membutuhkan energy

untuk motor pompa *coolant*. *Coolant* (*cutting fluid*) pada proses milling berguna untuk menjaga temperatur pada saat proses *cutting* di area *cutting zone* dibandingkan proses *cutting* tanpa menggunakan *coolant* (*dry cutting*) (Chris, Taylor, & Crawforth, 2020). Dengan menjaga temperatur pada saat proses *cutting* di area *cutting zone* dengan menggunakan metode pendinginan *wet cutting* menggunakan *cutting fluid* akan mengurangi keausan *cutting tools* dan menjaga kehalusan permukaan hasil *machining*, sehingga level produktivitas dapat dijaga dibandingkan dengan proses *cutting* secara *dry cutting*. Untuk itu diperlukan metode MQL (*minimum quantity lubricated*) untuk mendapatkan efisiensi energy namun tidak menurunkan produktivitas.

Terdapat beberapa factor yang secara signifikan dapat mempengaruhi penggunaan energy listrik pada mesin perkakas (Zhou et al., 2015). Pada gambar 7 ditampilkan factor konsumsi energy pada mesin perkakas, yang terdiri atas empat factor utama yaitu diantaranya: (a) proses, (b) fitur mesin perkakas, (c) benda kerja dan (d) tool yang digunakan.

Proses pemesinan yang dilakukan seperti parameter proses, tingkat kesulitan *machining* dan proses pendinginan (*coolant*) saat *machining* berlangsung akan mempengaruhi factor konsumsi energy pada mesin perkakas. Tipe mesin, struktur

mesin, tingkat otomasi dan efisiensi transmisi mekanis dapat mempengaruhi konsumsi energy listrik. Dengan meningkatkan tingkat otomasi dengan cara melakukan retrofit pada system kendali motor listrik di mesin perkakas dapat menjadi salah satu cara untuk efisiensi energy (Harbintoro, 2014). Tools merupakan salah satu factor lainnya yang berpengaruh terhadap konsumsi energy mesin perkakas, factor seperti tipe *cutting tools*, material *cutting tools*, keausan *tools* dan sudut geometri *cutting tools* akan berpengaruh terhadap besarnya *feedrate*, kecepatan potong dan MRR, sehingga akan mempengaruhi lamanya durasi proses *cutting*. Faktor benda kerja yang dikerjakan pada mesin perkakas turut mempengaruhi konsumsi energy di mesin perkakas, ukuran dan bentuk benda kerja akan mempengaruhi tingkat kesulitan pada saat setting khususnya pada *material handling* benda kerja. Material properties dari benda kerja seperti sifat kekerasan dan keuletan akan berpengaruh terhadap kecepatan potong, factor kehalusan permukaan, geometri, dimensi dan toleransi akan mempengaruhi lamanya proses *finishing* sehingga akan mempengaruhi konsumsi energy listrik.



Gambar 6. Factor konsumsi energy pada mesin perkakas

IV. Kesimpulan

Dengan melakukan identifikasi terhadap komponen pengguna energi listrik pada mesin CNC *machining center* dapat diketahui bahwa pengguna energy listrik terbesar pada kondisi *cutting* yaitu motor spindle, motor axis feed (X, Y, Z) dan motor *coolant*. Mengurangi proses *start* dan *stop* yang tidak diperlukan pada motor spindle merupakan salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengurangi konsumsi energi listrik pada motor spindle. Pada eksperimen proses pemesinan milling yang telah dilakukan, pengaturan parameter proses seperti *depth of cut*, *feedrate* dan kecepatan putaran spindle pada kondisi *cutting* dapat mempengaruhi konsumsi energy listrik pada mesin CNC *machining center*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *workshop* pemesinan MIDC (*Metal Industries Development Center*), yang telah membantu dalam proses pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahadi Khalif., S. T. G. (2019). Analisis konsumsi energi listrik pada proses pembekuan dan penyimpanan ikan. *Ketengalistrikan Dan Energi Terbarukan*, 18(1), 11–22.
- Chris, M., Taylor, M., & Crawforth, P. (2020). Resource consumption and process performance in minimum quantity lubricated milling of of tool steel. *Procedia Manufacturing*, 43, 463–470. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.187>
- Harbintoro, S. (2014). Penelitian efisiensi energi pada mesin horizontal boring and milling. *Metal Indonesia*, 36, 77 – 83. <http://doi.org/10.32423/jmi.2014.v36.76-83>
- Harbintoro, S., & Krisnadi, L. (2020). Pembuatan inti stator motor listrik dengan menggunakan proses milling profil electric motor stator core making using profile milling process. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 14(2), 209–219.
- Hu, L., Liu, Y., Lohse, N., Tang, R., Lv, J., Peng, C., & Evans, S. (2017). Sequencing the features to minimise the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed. *Energy*, 139, 935–946. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.032>
- Lv, J., Tang, R., Tang, W., Liu, Y., & Zhang, Y. (2017). An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 143, 794–803. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.045>
- Paetzold, J., Kolouch, M., Wittstock, V., & Putz, M. (2017). Methodology for process-independent energetic assessment of machine tools. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 254–261. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.032>
- Shabi, L., Weber, J., & Weber, J. (2017). Analysis of the Energy Consumption of Fluidic Systems in Machine Tools. *Procedia CIRP*, 63, 573–579. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.348>
- Sihag, N., Singh, K., & Pundir, S. (2018). Development of a structured algorithm to identify the status of a machine tool to improve energy and time efficiencies. *Procedia CIRP*, 69(May), 294–299. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.081>
- Stief, P., Dantan, J., Etienne, A., Siadat, A., & Design, C. (2019). Multi-objective optimization of machining parameters to minimize surface roughness and power consumption using TOPSIS. *Procedia CIRP*, 86, 116–120. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.036>
- Triebe, M. J., Mendis, G. P., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2018). Understanding energy consumption in a machine tool through energy mapping. *Procedia CIRP*, 69(May), 259–264. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.041>
- Um, J., Gontarz, A., & Stroud, I. (2015). Developing energy estimation model based on Sustainability KPI of machine tools. *Procedia CIRP*, 26, 217–222. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.002>
- Wirtz, A., Biermann, D., Meißner, M., Wiederkehr, P., & Myrzik, J. (2018).

- Evaluation of cutting processes using geometric physically-based process simulations in view of the electric power consumption of machine tools. *Procedia CIRP*, 79(i), 602–607. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.083>
- Wirtz, A., Meißner, M., Wiederkehr, P., & Myrzik, J. (2018). Simulation-assisted investigation of the electric power consumption of milling processes and machine tools. *Procedia CIRP*, 67, 87–92. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.181>
- Yi li, Krenkel Nicole, A. J. c. (2018). An energy model of machine tools for selective laser melting. *Procedia CIRP*, 78, 67 – 72. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.302>
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., & Xu, X. (2015). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 1 – 14. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>
- Zhu, P., Stief, P., Dantan, J., Etienne, A., & Siadat, A. (2018). Energy Consumption Characteristics and Influence on Surface Quality in Milling. *Procedia CIRP*, 71, 111–115. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.081>