

Kontribusi Pengaruh Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat Terhadap Konsumsi Energi Listrik Langsung Pada Proses Pemesinan Dingin dan Kering: Studi Kasus Proses Skrap Baja ST 37 (Baja Karbon Rendah)

Ismet Hari Mulyadi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas Padang

Kampus Unand Limau Manis Padang, Sumatera Barat

E-mail: ismet@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Konsumsi energi listrik menjadi perhatian utama saat ini. Hal ini disebabkan keterbatasan sumber daya dan efek negatif yang ditimbulkan sebagai akibat aktivitas pembangkitan listrik. Proses pemesinan yang memanfaatkan mesin perkakas yang digerakkan dengan energi listrik juga mempertimbangkan masalah penggunaan energi listrik. Salah satu usaha dalam mengendalikan konsumsi energi listrik pada proses pemesinan adalah dengan mengembangkan model untuk memperkirakan konsumsi energi listrik. Akan tetapi pengembangan model hanya mempertimbangkan daya listrik yang dipergunakan, waktu aktivitas dan umur pahat. Sedangkan yang menjadi pertimbangan dalam suatu proses pemesinan tidak hanya umur pahat yang dilihat dari tingkat keausan pahat, akan tetapi juga kualitas yang dapat dihasilkan dalam hal ini kekasaran permukaan produk. Untuk itu pada penelitian justifikasi kenapa hanya umur pahat yang dipertimbangkan sedangkan kekasaran permukaan diabaikan. Penelitian dilakukan dengan mengukur secara bersamaan besarnya daya listrik baik pada perubahan keausan pahat ataupun perubahan kekasaran permukaan. Selanjutnya kontribusi kekasaran permukaan dan keausan pahat terhadap daya listrik yang diperlukan dianalisa. Hasil menunjukkan bahwa kontribusi keausan pahat lebih tinggi (75%) dibandingkan kontribusi kekasaran permukaan (52%). Ini kemungkinan dapat menjelaskan kenapa umur pahat yang dijadikan salah satu komponen pembangun model energi listrik pada proses pemesinan.

Kata Kunci: Keausan Pahat, Kekasaran Permukaan, Daya Listrik Langsung

ABSTRACT

Electrical energy consumption of machine tools is great importance in machining process. This is owing to the limitation of electrical energy sources that used by the electrical power grid as well as an environmental burden of electrical power generation. Some strategies have been proposed for reducing electrical energy consumption of machine tools. One alternative is that of electrical energy consumption model. However, all the proposed models tend to exclude the surface roughness from the built model and only consider the tool life factor as a model's component. Meanwhile, surface roughness is one criterion for high product quality definition. Thus, in this present study, the reason behind that choice was justified. The experimental study was conducted on shaping process. The electrical power was measured simultaneously with measurement of flank wear progression and arithmetic surface roughness. Furthermore, the contribution of flank wear and surface roughness of electrical power elevation was analyzed. The results indicated that flank wear was having significant contribution of electrical power (75%) in comparison to surface roughness contribution (52%). The facts from this study could be a plausible answer of the hypothesis.

Keywords: Flank Wear, Surface Roughness, Direct Electrical Power

PENDAHULUAN

Proses pemesinan merupakan proses pembuatan sebuah produk yang memanfaatkan gerak relatif antara pahat dan benda kerja. Akibat adanya gerak relatif ini, bagian dari benda kerja yang tidak merupakan bagian dari produk akan dibuang melalui mekanisme pergeseran (*shearing*). Gaya untuk pergeseran yang diberikan oleh pahat; supaya proses dapat berlangsung, pada hakikatnya harus melebihi kekuatan geser yang dimiliki oleh bahan benda kerja. Oleh sebab itu dibutuhkan daya yang cukup agar kekuatan geser yang diberikan oleh pahat dapat menyebabkan terbentuknya geram (material buangan). Pada umumnya daya ini didapat dari hasil konversi energi listrik; sebagai sumber daya utama suatu mesin perkakas, menjadi daya mekanik yang disalurkan melalui pahat/spindel.

Secara teori, besarnya energi untuk menggerakkan pahat ditentukan oleh gaya dan daya pemotongan sebagai energi pada ujung pahat (*tool tip energy*). Akan tetapi Anderberg et al. [1] dan Gutowski et al. [2] beranggapan energi mekanik ini tidak memberikan informasi yang lengkap mengenai jumlah energi sebenarnya yang diperlukan oleh suatu proses pemesinan. Oleh karena itu pada beberapa penelitian untuk mengetahui besarnya energi yang dibutuhkan untuk proses produksi pemesinan lebih menitikberatkan kepada besarnya energi listrik langsung dibandingkan dengan memperhitungkan besarnya energi mekanik pada ujung pahat tersebut.

Keuntungan dengan mengukur energi listrik langsung ini sebagai pedoman dalam menentukan besarnya energi yang dibutuhkan selama proses pemesinan adalah dapat mengetahui besarnya konsumsi energi yang diperlukan untuk suatu proses pemesinan. Hal ini dilakukan dengan cara mengembangkan suatu model konsumsi energi listrik langsung seperti yang diperkenalkan oleh Gutowski et al. [2] dan yang dikembangkan oleh Rajemi dan Mativenga [3] dan Balogun dan Mativenga [4].

Akan tetapi seluruh model konsumsi energi listrik langsung yang telah dikembangkan hanya mempertimbangkan umur pahat (*tool life, T*) dan waktu aktivitas sebagai komponen pembentuk model yang dipengaruhi oleh parameter pemotongan (*machining variables*). Sedangkan seperti diketahui, parameter pemotongan tidak hanya akan mempengaruhi umur pahat akan tetapi juga akan berpengaruh kepada kualitas produk hasil pemotongan dalam hal ini kekasaran permukaan (*surface roughness*) [5-6]. Sedangkan penelitian untuk melihat hubungan kekasaran permukaan dengan konsumsi energi listrik dilakukan secara tidak langsung dengan cara membandingkan pengaruh parameter pemotongan terhadap konsumsi energi listrik dan tingkat kekasaran permukaan yang dapat dihasilkan [7-8].

Berpedoman kepada paparan di atas, menjadi hal yang dipertanyakan kenapa kekasaran permukaan tidak dapat dijadikan komponen yang akan mempengaruhi besarnya konsumsi energi listrik langsung. Untuk itulah pada penelitian ini difokuskan untuk mengetahui seberapa besar kontribusi kekasaran permukaan terhadap konsumsi energi listrik dibandingkan keausan pahat (umur pahat). Proses skrap baja ST 37 dipilih sebagai media penelitian karena proses ini dianggap membutuhkan daya yang besar dan baik tingkat keausan pahat maupun kekasaran permukaan lebih mudah untuk diidentifikasi perubahannya.

KONSUMSI ENERGI LISTRIK PADA PROSES PEMESINAN

Energi Listrik Pada Proses Pemesinan

Proses pemesinan pada umumnya memanfaatkan energi listrik sebagai sumber daya utama untuk menggerakkan motor penggerak. Motor penggerak berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang akan diteruskan ke ujung pahat. Oleh karena itu, menjadi hal yang umum dalam proses pemesinan perhitungan daya pemotongan dilakukan berdasarkan daya mekanik yang terukur pada ujung pahat (*Tool tip energy concept/ specific cutting energy*).

Dalam memonitor besarnya energi/daya mekanik, biasanya dilakukan dengan mengukur besarnya gaya pemotongan yang bekerja. Pengukuran gaya pemotongan ini dilakukan secara eksperimen atau sebelum proses produksi dilakukan (*off-line*) atau dengan memanfaatkan data pemesinan yang telah tersedia, baik yang disediakan oleh pembuat pahat maupun data yang didapat dari hasil-hasil penelitian sebelumnya. Hanya, dengan cara seperti ini, informasi yang didapat tidaklah selengkap jika pengukuran dilakukan secara langsung (*online*) dari sumber daya utamanya (daya listrik) [1-2]. Hal ini disebabkan besarnya energi listrik yang diperlukan pada proses pemesinan tidak hanya merupakan yang diubah menjadi energi mekanik pada ujung pahat akan tetapi juga energi yang diperlukan untuk menggerakkan pahat tanpa pemotongan (*idle*), energi untuk pompa, dan lain-lain.

Gutowski et al. (2005) dan Dahmus dan Gutowski (2004) menemukan bahwa antara 30-85 % dari keseluruhan konsumsi listrik mesin perkakas diserap pada saat mesin belum mulai melakukan pemotongan (*stand by modes*). Hanya sekitar 14,8 % energi listrik yang dipergunakan untuk melakukan proses pemotongan [2]. Atau dengan kata lain, hanya 14,8 % dari daya listrik yang disalurkan (*supplied*) yang diubah menjadi energi mekanik pada ujung pahat.

Selain itu, sebagai sumber energi utama untuk menggerakkan mesin perkakas, penggunaan energi listrik memberikan banyak tantangan. Keterbatasan sumber pembangkit listrik dan aspek lingkungan dari pemanfaatannya menjadi hal yang memerlukan perhatian serius. Sebagai akibat tidak langsung dalam pemakaian energi listrik pada mesin perkakas adalah dalam hal produksi karbon [11]. Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit akan memproduksi karbon (CO) sebagai hasil sampingannya dan ini akan merusak lingkungan dengan meninggalkan jejak karbon/polusi ke lingkungan (*Carbon footprint phenomenon*).

Fakta-fakta di atas menjelaskan bagaimana pentingnya energi listrik, khususnya dalam penggunaan mesin-mesin perkakas/pada proses pemesinan dibandingkan hanya dengan mempertimbangkan energi mekanik pada ujung pahat baik dalam perencanaan maupun pada pelaksanaan proses pemesinan.

Berbagai usaha telah dilakukan untuk mereduksi konsumsi energi listrik pada proses pemesinan. Strategi untuk mengurangi konsumsi energi listrik baik pada mesin perkakas maupun proses pemesinannya dapat dilakukan dengan cara merancang mesin perkakas yang memiliki efisiensi yang lebih baik [12] maupun dengan merencanakan proses pemesinan yang membutuhkan jumlah energi yang rendah yang dilakukan dengan mempergunakan model konsumsi energi listrik [13].

Pemodelan Konsumsi Energi Listrik Langsung Pada Proses Pemesinan

Perancangan dan pembuatan mesin perkakas yang memiliki efisiensi yang tinggi dapat mengurangi konsumsi energi listrik pada mesin perkakas. Akan tetapi strategi ini memerlukan waktu yang panjang dan biaya yang besar. Alternatif lain untuk mereduksi konsumsi energi pada proses pemesinan adalah dengan melakukan perencanaan proses pemesinan yang dapat meningkatkan efisiensi dalam penggunaan energi khususnya energi listrik. Usaha yang telah dan sedang dilakukan adalah dengan membangun model yang dapat membantu dalam perencanaan proses pemesinan. Sehingga sebelum proses dilakukan, besarnya konsumsi energi listrik sudah dapat diperkirakan di awal. Pengembangan model merupakan metode penting dalam mengetahui efisiensi dalam proses pemesinan [9]. Model yang dikembangkan harus dapat memperlihatkan hubungan antara parameter pemotongan dengan konsumsi energi yang diperkirakan [1].

Gutowski et al. (2006) telah merintis pengembangan model energi listrik pada proses pemesinan dengan memperkenalkan suatu persamaan (Persamaan (1)) [2]. Dimana besarnya daya listrik pada proses pemesinan didefinisikan sebagai

akumulasi besarnya daya listrik pada saat tanpa pemotongan, P_o (*standby modes*) dengan besarnya daya listrik untuk melakukan proses pemesinan, P_c (*cutting modes*). Dimana daya listrik yang diperlukan untuk melakukan proses pemotongan adalah merupakan perkalian antara konstanta energi, k (kJ/cm^3) dengan laju penghasilan geram, Z (cm^3/detik).

$$P_c = P_o + kZ \quad (1)$$

k dapat diartikan sebagai spesifik energi yang didapat dari pengukuran gaya pemotongan selama periode tertentu terhadap jumlah geram yang dihasilkan. Akan tetapi Rajemi (2011) telah membuktikan bahwa harga k dapat diukur langsung dari besarnya daya listrik langsung yang diperlukan selama periode tertentu untuk jumlah geram yang dihasilkan [14].

Selanjutnya Rajemi et al. (2010) menyempurnakan model yang dibangun oleh Gutowski et al. (2006) menjadi suatu model energi pada proses pemesinan (Persamaan 2) [15]. Dimana Rajemi et al. memperkirakan bahwa besarnya energi listrik (E) yang digunakan dalam proses pemotongan akan tergantung kepada seluruh aktivitas yang terjadi. Aktivitas dipengaruhi oleh perioda kejadiannya (waktu *idle* (t_1), waktu pemotongan (t_2), dan waktu penggantian pahat jika telah aus (t_3). Selain itu energi pemotongan juga dipengaruhi oleh energi yang mengikuti (*embedded energy*) dalam hal ini adalah seperti energi yang diperlukan untuk pembuatan pahat (y_E).

$$E = P_0 t_1 + (P_0 + kZ)t_2 + P_0 t_3 \left[\frac{t_2}{T} \right] + \dots \\ \dots + y_E \left[\frac{t_2}{T} \right] \quad (2)$$

Akan tetapi, Persamaan (2) masih memiliki kelemahan karena hanya dipertimbangkan untuk proses pemesinan kering dimana cairan pendingin tidak dipergunakan sehingga peranan cairan pendingin dalam menentukan umur pahat (T) menjadi nihil. Oleh karena itu, Balogun dan Mativenga (2013) mencoba menyempurnakan dengan memasukkan energi listrik yang diperlukan untuk menyalurkan cairan pendingin ke daerah kontak (*contact zones*) (Persamaan (3)).

$$E = P_0(t_1 + t_r + t_2) + P_r t_r + P_{air} t_{air} + P_{ic} t_2 \left[INT \left(\frac{t_2}{T} \right) + 1 \right] + \dots \\ \dots + [(mN + C) + P_{pendingin} + kZ] t_2 \quad (3)$$

Selain itu, Balogun dan Mativenga juga mempertimbangkan waktu kesiapan mesin sebelum memotong (t_r), pergerakan pahat tanpa memotong (*air cut*) dan karakteristik mesin perkakas ($mN + C$). Pada persamaan ini energi listrik untuk proses pendinginan baik dengan cairan (pompa) maupun dengan udara (*compressor*) merupakan parameter

yang diukur tersendiri. Hal ini menyebabkan persyaratan untuk sebuah model seperti yang diprasyaratkan oleh Anderberg et al. (2009) [1] belum sepenuhnya terpenuhi. Oleh karena itu, Mulyadi et al. (2015) mencoba untuk menyempurnakannya sehingga model dapat dipergunakan untuk seluruh proses pemesinan dengan berbagai macam metode penyaluran cairan pendingin [17].

Model pada Persamaan (3) telah menjadi acuan bagi banyak peneliti dalam mengembangkan model energi listrik pada proses pemesinan. Akan tetapi, mengacu kepada model-model tersebut hanya waktu pemotongan dan umur pahat yang menjadi pertimbangan dalam memperkirakan besarnya energi yang diperlukan untuk suatu proses pemesinan. Umur pahat, seperti yang diketahui ditentukan oleh tingkat keausan tepi (*Flank wear*) selama waktu pemotongan. Sedangkan keluaran dari proses pemesinan adalah kualitas (kualitas permukaan dari produk). Hal ini, sampai saat ini, belum menjadi pertimbangan dalam memperkirakan besarnya konsumsi energi dari suatu proses pemesinan.

Kekasaran Permukaan Terhadap Konsumsi Energi Listrik Langsung

Kekasaran permukaan merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas komponen/produk yang dihasilkan. Hal ini juga yang menjadikan proses pemesinan menjadi proses yang lebih unggul dibandingkan dengan proses-proses manufaktur lainnya (seperti pengecoran (*casting*), pembentukan (*forming*), dan metalurgi serbuk (*powder metallurgy*)).

Kekasaran permukaan yang dihasilkan oleh suatu proses pemesinan ditentukan oleh sifat mampu mesin (*machinability*) yang dimiliki oleh bahan baku benda kerja dan kondisi pemotongan yang dipilih. Pada umumnya kondisi pemotongan yang memiliki pengaruh dominan terhadap kekasaran permukaan adalah gerak makan (*feeding movements, f*) [18-19]. Akan tetapi di beberapa penelitian terdahulu, diidentifikasi bahwa laju pemakanan, V_f (*feedrates*), juga berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan yang dapat dicapai [20-21]. Sehingga dapat disimpulkan secara tidak langsung, kecepatan potong (V_c) juga memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan. Hal ini disebabkan laju pemakanan merupakan hasil perkalian antara gerak makan (f) dengan putaran (N) yang merupakan komponen luaran kecepatan potong.

Selanjutnya, berdasarkan penelitian Patel dan Patel (2012) [20] dan Camposeco-Negrete (2015) [21], secara tidak langsung perubahan nilai laju pemakanan juga akan menyebabkan perubahan daya listrik yang harus disalurkan pada mesin per-

kakas. Ini diperjelas oleh penelitian yang dilakukan oleh Guo et al. (2012) dimana dinyatakan bahwa secara tidak langsung perubahan terhadap nilai kekasaran permukaan (R_a) juga akan mempengaruhi konsumsi energi listrik [22].

Fakta-fakta di atas telah memberi gambaran bahwa kekasaran permukaan juga memiliki pengaruh terhadap perubahan daya/energi listrik langsung dari operasi sebuah mesin perkakas. Hanya, seluruh penelitian tersebut tidak memberikan hubungan yang langsung antara konsumsi energi listrik dengan kekasaran permukaan. Seluruhnya merupakan studi perbandingan. Selain itu, juga tidak dinyatakan yang memberikan pengaruh dominan terhadap konsumsi energi listrik pada suatu proses pemesinan antara keausan pahat (umur pahat) dan kekasaran permukaan.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan dan Peralatan

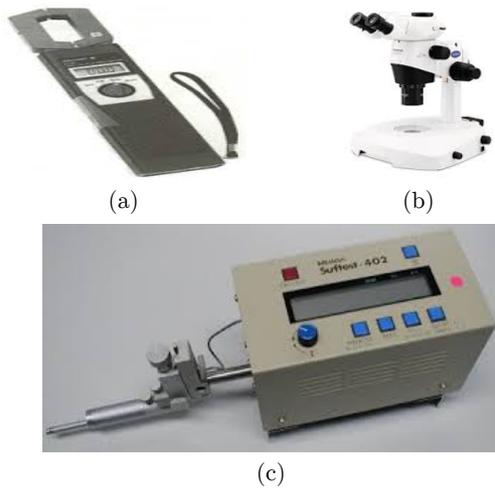
Penelitian ini dilakukan dengan melakukan proses pemesinan skrap (*shaping*) baja karbon rendah ST 37 yang memiliki komposisi kimia seperti yang tertera pada Tabel 1 dan dengan ukuran 200 mm x 200 mm x 60 mm. Adapun alasan pemilihan bahan jenis ini adalah didasari penggunaan dari bahan ini pada pembuatan komponen-komponen pada bengkel-bengkel dan ditambah dengan harga yang relatif murah. Sedangkan pahat yang dipergunakan adalah pahat jenis HSS (*High Speed Steel*) dengan pertimbangan memiliki sifat mampu mesin yang baik dengan bahan benda kerja baja karbon rendah dan mudah diasah untuk menyesuaikan dengan geometri pahat yang dipergunakan pada penelitian ini (sudut potong utama, $\kappa_r=70^\circ$ dan radius pojok, $\epsilon_r = 0,7$ mm). Sedangkan kecepatan potong (V_c) yang dipergunakan adalah sebesar 30 m/menit atau kecepatan potong rata-rata untuk proses skrap (\bar{V}) setara dengan 10,125 m/menit. Selanjutnya parameter pemotongan lainnya untuk jenis pahat ini ditentukan melalui penelitian awal untuk mendapatkan waktu pemotongan sebesar 10 menit dengan luas permukaan benda kerja yang tersedia. Dari hasil penelitian awal ini diperoleh nilai gerak makan (f) sebesar 0,91 mm/r dan kedalaman potong (a_p) sebesar 0,6 mm.

Tabel 1. Komposisi kimia baja karbon rendah ST 37

C	Si	Mn	P	S	N
0,17	0,55	1,60	0,04	0,04	0,009

Selanjutnya mesin perkakas skrap yang dipergunakan adalah buatan Erdmann. Mesin ini dipilih karena banyak dimanfaatkan pada proses pemesinan untuk meratakan permukaan sebelum benda kerja diproses lebih lanjut untuk mendapat kualitas permukaan yang baik. Sehingga proses

umumnya akan memiliki daya pemotongan yang cukup besar yang diharapkan dapat memberi perbedaan terhadap data yang akan diambil. Selain itu, untuk melihat perbedaan respon energi listrik baik akibat pengaruh kekasaran permukaan maupun oleh karena pengaruh keausan pahat, maka proses pemesinan dilakukan dalam kondisi kering (*dry machining*) dan kondisi basah (*wet machining/ flood cooling*) dengan mempergunakan cairan pendingin Bromus yang merupakan jenis yang dapat larut dengan air (*water miscible cutting fluids*).



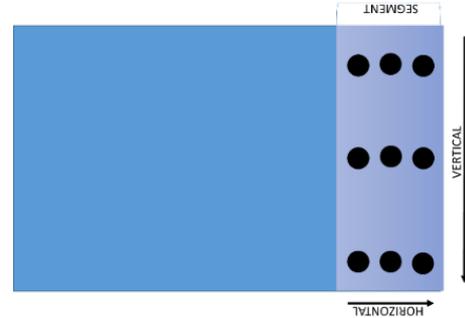
Gambar 1. Alat ukur yang dipergunakan. (a) Tangmeter Yokogawa seri 2433-11; (b) Olympus SZX-10 Optical Microscope; dan (c) Mitutoyo SurfTest seri 402

Sedangkan data arus listrik (yang akan dikonversi menjadi energi listrik), data kekasaran permukaan aritmetik (R_a) dan data keausan tepi pahat (VB) berturut-turut mempergunakan alat ukur arus listrik, Yokogawa *Clampmeter* seri 2433-11 (Gambar 1(a)), alat ukur kekasaran permukaan, Mitutoyo *Surface Roughness Tester* seri 402 (Gambar 1(b)) dan alat pengamatan, Olympus SZX-10 *Optical Microscope* (Gambar 1(c)) yang dilengkapi perangkat lunak pengukuran. Khusus alat ukur arus listrik, pemakaian tangmeter (*clampmeter*) bertujuan untuk memudahkan proses pengukuran tanpa harus mengukur kedua kutub sumber daya utama dari mesin perkakas skrap.

Metode Pengukuran

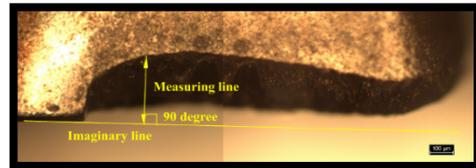
Nilai kekasaran permukaan yang dipergunakan adalah nilai kekasaran rata-rata aritmetik (R_a) dan hasil pengukuran kekasaran permukaan benda kerja sebelum diproses menunjukkan nilai $4,53 \mu\text{m}$. Nilai kekasaran permukaan yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah nilai kekasaran arah vertikal (Gambar 2). Hal ini dilakukan berdasarkan pertimbangan dimana perpindahan gerakan pahat dalam memberi pemakanan (dimana nilai kekasaran dipengaruhi oleh radius pojok (ϵ_r) dan gerak makan per langkah (f) searah

dengan arah vertikal. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada 3 (tiga) titik pengamatan pada arah vertikal. Setiap titik pengamatan, *stylus* dari alat ukur akan bergerak dengan panjang pengamatan (b) sebesar $0,25 \mu\text{m}$ dan panjang ukur (l_n) sebesar $0,8 \mu\text{m}$ sehingga akan ada sekitar 4 kali pengukuran untuk setiap titik pengamatan.



Gambar 2. Skema pengukuran kekasaran permukaan

Sedangkan nilai keausan pahat yang diukur adalah keausan tepi (*Flank Wear*) dengan batas nilai keausan tepi ditetapkan sebesar $0,3 \text{ mm}$ sesuai dengan ISO-8868 [23]. Nilai VB diambil pada sekitar 10 titik dari posisi radius pojok sampai pada posisi dimana tidak terdapat perubahan dari mata potong utama (*primary cutting edge*) (Gambar 3). Dari masing-masing titik posisi tersebut dengan mempergunakan perangkat lunak pengukur yang melengkapi mikroskop yang dipergunakan, dibuat garis ukuran dari posisi mata potong pada bagian yang aus pada bidang utama (*Flank Face*). Kemudian, 10 ukuran garis pada bidang utama yang mempresentasikan nilai VB dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai VB rata-rata yang akan diplot ke dalam grafik.



Gambar 3. Skema pengukuran keausan tepi (VB)

Selanjutnya konsumsi energi listrik langsung ditentukan oleh besarnya daya listrik yang diperlukan untuk melakukan proses pemotongan selama perioda pemotongan (waktu pemotongan, t_c). Daya listrik ini didapatkan dengan memasukkan nilai arus listrik yang diukur dengan tangmeter ke dalam Persamaan (4).

$$P = VI\sqrt{3} \quad (4)$$

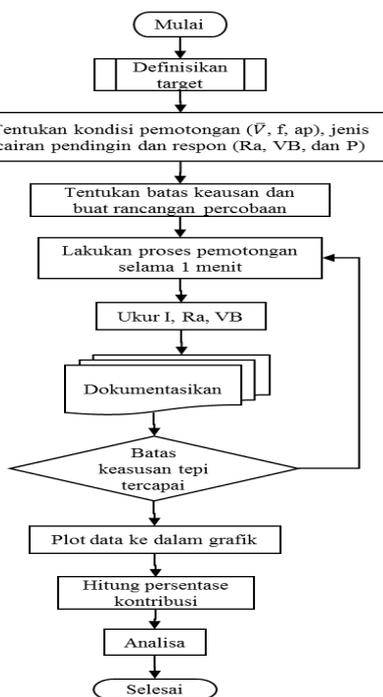
Dimana P adalah besarnya daya listrik (dalam Watt), V adalah besarnya tegangan listrik yang dipergunakan (dalam Volt) yang dalam penelitian ini memiliki nilai 380 Volt dan I adalah besarnya arus listrik yang terukur pada saat pemotongan berlangsung (dalam *Ampere*). Pengukuran arus lis-

trik dilakukan dengan menempatkan tangmeter pada kabel utama dimana arus listrik PLN dialiri ke mesin skrap. Proses pengukuran dilakukan tanpa harus membuka kabel sehingga lebih aman. Adapun konsep dari pengukuran ini adalah, pada saat terjadinya perubahan tahanan pada bagian dari mesin perkakas, maka akan terjadi perubahan dari arus listrik yang akan dialiri ke bagian-bagian mesin perkakas.

Rancangan Percobaan

Pada penelitian ini dilakukan proses pemesinan skrap secara terus-menerus (*progressive*) untuk setiap perioda pemotongan. Perioda pemotongan yang dipilih adalah setiap 1 (satu) menit pemotongan sampai pahat mencapai batas keausan tepi yang telah didefinisikan. Berpedoman pada jumlah perioda sampai pahat mengalami batas keausan tepi, maka setiap perioda, keausan tepi rata-rata (VB), kekasaran permukaan rata-rata aritmetik (R_a) dan besarnya arus (I) diukur. Pengukuran untuk semua respon dilakukan berulang sebanyak dua kali untuk mendapatkan data yang *valid*.

Seluruh data hasil pengukuran akan diplot ke dalam grafik hubungan antara keausan pahat (VB) dan daya listrik (P) dan grafik hubungan antara kekasaran permukaan (R_a) dan konsumsi daya listrik (P). Selanjutnya grafik-grafik yang dihasilkan akan dianalisa untuk mendapatkan persentase kontribusi keausan pahat maupun kekasaran permukaan terhadap daya listrik langsung. Lebih jelasnya mengenai alur dari penelitian ini dapat dilihat pada skema penelitian seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 4.

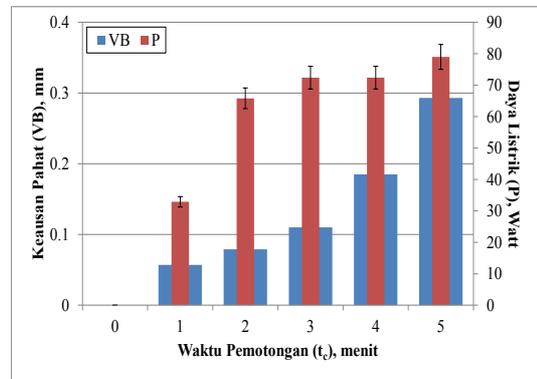


Gambar 4. Skema penelitian

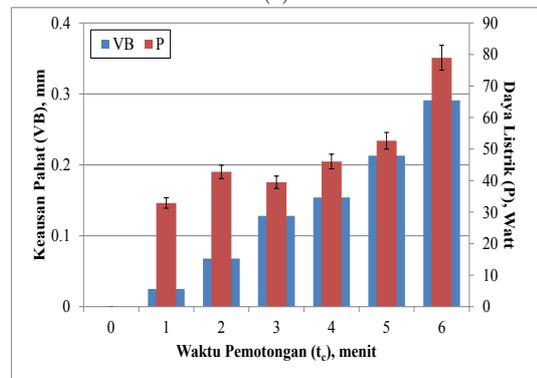
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat Terhadap Daya Listrik Langsung

Pada penelitian ini, proses skrap baja karbon rendah ST 37 dilakukan pada rentang waktu pemotongan sampai batasan keausan tepi 0,3 mm dicapai. Pada setiap 1 (satu) menit waktu pemotongan, nilai keausan tepi (VB), kekasaran permukaan aritmetik (R_a) dan arus listrik (I) diukur. Untuk tahanan listrik, nilainya dikonversi dengan mempergunakan Persamaan (4) untuk mendapatkan nilai daya listrik langsung. Pengukuran dilakukan baik pada pemotongan tanpa mempergunakan cairan pendingin dan dengan mempergunakan cairan pendingin. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



(a)



(b)

Gambar 5. Perubahan nilai keausan terhadap daya listrik langsung pada proses skrap (a) tanpa cairan pendingin dan (b) dengan cairan pendingin terhadap waktu pemotongan

Pada Gambar 5 terlihat bahwa setiap perubahan terhadap nilai keausan tepi akan menyebabkan perubahan terhadap daya listrik langsung. Yang mana semakin aus pahat, maka akan semakin besar daya listrik langsung yang diperlukan untuk menjamin terjadi proses pembentukan geram. Peningkatan daya listrik ini terjadi karena semakin besarnya tahanan yang dialami pahat sehingga diperlukan lebih banyak daya listrik yang harus dialiri ke mesin perkakas untuk menjamin proses

pemotongan terus berlangsung. Ini juga kemungkinan adanya perubahan daya mekanik sebagai akibat terjadinya keausan pahat [24-25]. Daya mekanik merupakan hasil konversi dari daya listrik yang dilakukan oleh motor penggerak. Sehingga berdasarkan fakta yang didapat pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya nilai keausan tepi, maka daya listrik langsung yang diperlukan juga semakin meningkat.

Penggunaan cairan pendingin pada penelitian ini tidak terlalu memberikan perubahan yang berarti pada nilai keausan tepi dari pahat (Gambar 5b). Dari hasil analisa regresi linier diketahui bahwa tanpa penggunaan cairan pendingin perubahan yang terjadi pada nilai keausan pahat hanya berubah dari 0,054 menjadi 0,048 atau terjadi penurunan keausan pahat sebesar sekitar 11%. Akan tetapi perubahan yang cukup berarti diperlihatkan oleh nilai daya listrik langsung. Dimana pemberian cairan pendingin dapat menurunkan daya listrik yang diperlukan hampir sebesar 33%.

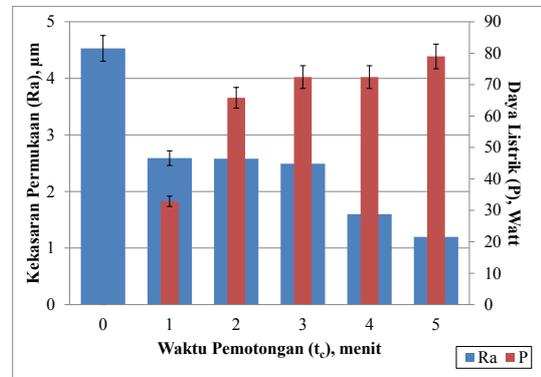
Hal ini mengindikasikan bahwa daya listrik langsung sensitif terhadap perubahan yang terjadi pada nilai keausan. Penurunan nilai keausan sebesar 11% dapat mengurangi daya listrik langsung sebesar lebih dari dua kali lipatnya.

Selanjutnya, dengan terjadinya peningkatan nilai keausan tepi sejalan dengan semakin lamanya waktu pemotongan, maka permukaan yang dihasilkan akan semakin kasar baik tanpa ataupun dengan penggunaan cairan pendingin [26-27]. Hal ini juga akan berimplikasi terhadap besarnya daya listrik yang diperlukan. Jadi semakin kasar permukaan yang dihasilkan maka akan semakin besar daya listrik langsung yang diperlukan dan sebaliknya [22].

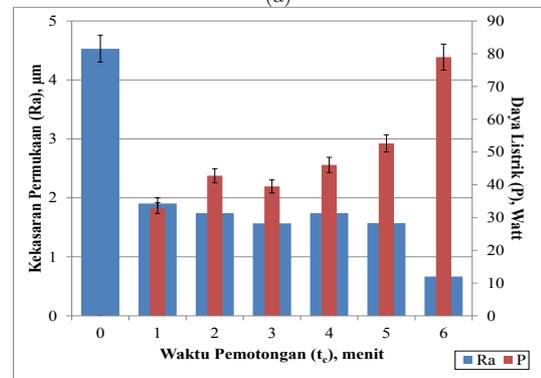
Akan tetapi bukti yang diberikan oleh Gambar 6 menunjukkan kondisi yang sebaliknya. Semakin halus permukaan produk semakin besar daya listrik langsung yang diperlukan. Penurunan kekasaran permukaan kemungkinan disebabkan oleh perubahan geometri pahat yang terjadi selama pemotongan berlangsung. Hal ini dijelaskan pada Gambar 7 dimana selama pemotongan terjadi perubahan bentuk dari radius pojok (ϵ_r).

Pahat yang aus dan permukaan yang kasar akan menyebabkan besarnya daya listrik. Akan tetapi dengan berubahnya nilai radius pojok, maka permukaan yang dihasilkan juga akan semakin halus. Ini disebabkan karena terjadinya mekanisme bajakan (*ploughing*) dibandingkan mekanisme geseran (*shearing*) yang merupakan mekanisme yang diharapkan pada proses pemesinan [28]. Akibat mekanisme bajakan ini, maka permukaan yang dibentuk terjadi karena adanya proses pembentukan (*forming*) seperti halnya proses penghalusan dengan proses *burnishing*. Konsekuensi dari mekanisme ini adalah semakin besarnya daya listrik yang

diperlukan karena penampang geram yang dipotong menjadi lebih besar. Selain itu geram yang dihasilkan bukan lagi diakibatkan oleh adanya tegangan geser yang bekerja pada bidang geser akan tetapi oleh tegangan normal yang lebih besar yang bekerja pada bidang normal/ penampang benda kerja yang akan dipotong

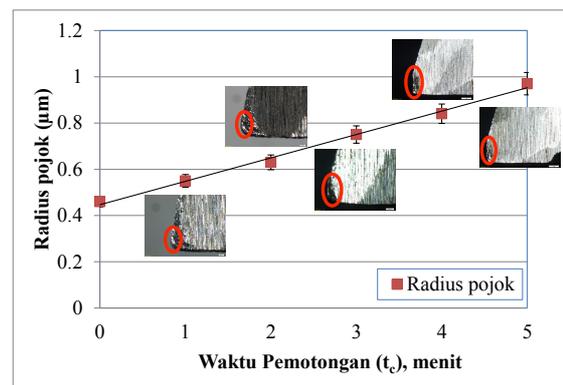


(a)



(b)

Gambar 6. Perubahan nilai kekasaran permukaan dan konsumsi daya listrik langsung pada proses skrap (a) tanpa cairan pendingin dan (b) dengan cairan pendingin terhadap waktu pemotongan



Gambar 7. Perubahan bentuk dan ukuran radius pojok pada pahat skrap seiring dengan pertambahan waktu pemotongan

Selanjutnya, tidak seperti yang terjadi pada perubahan nilai keausan pahat terhadap daya listrik langsung. Pada pengamatan pengaruh kekasaran

permukaan terhadap kebutuhan daya listrik langsung, penurunan nilai kekasaran permukaan yang terjadi sebesar sekitar 22% (dua kali lipat dari nilai perubahan keausan pahat) dengan penambahan cairan pendingin pada proses. Sedangkan perubahan terhadap kebutuhan daya listrik langsung menurun dengan persentase yang sama ketika pengamatan dilakukan terhadap penurunan keausan pahat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai kekasaran permukaan memberikan pengaruh yang lebih rendah dibandingkan dengan pengaruh yang disebabkan oleh perubahan nilai keausan pahat terhadap daya listrik langsung yang dibutuhkan.

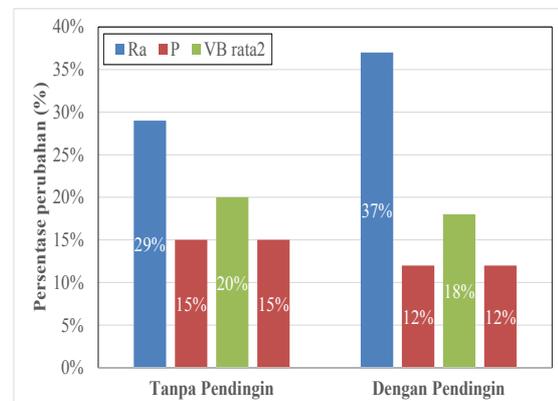
Kontribusi Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat Terhadap Konsumsi Energi Listrik Langsung

Dari pembahasan sebelumnya, terindikasi bahwa pengaruh keausan pahat lebih berarti dibandingkan pengaruh kekasaran permukaan terhadap perubahan kebutuhan daya listrik langsung. Akan tetapi informasi yang telah diperoleh belum memberikan gambaran yang jelas tentang kontribusi masing-masing terhadap perubahan kebutuhan daya listrik langsung. Untuk itu dilakukan analisa tambahan dengan menghitung persentase perubahan yang terjadi dari masing-masing fokus pengamatan (kekasaran permukaan, keausan pahat dan kebutuhan daya listrik langsung) terhadap penambahan waktu pemotongan.

Dari hasil perhitungan didapat bahwa nilai kekasaran permukaan terjadi perubahan sebesar 29%, nilai keausan pahat berubah sebesar 20% sedangkan untuk kedua pengaruh tersebut, perubahan nilai kebutuhan daya listrik tetap pada kondisi 15%. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi dengan cairan pendingin walaupun dengan persentase yang berbeda (Gambar 8). Perbedaan ini terjadi karena cairan pendingin sesuai dengan fungsinya untuk melumasi bidang kontak; pahat-benda kerja (*tool-workpiece interface*) dan pahat-geram (*tool-chip interface*), serta melalui mekanisme konveksi paksa akan mengurangi gesekan pada proses pemotongan sehingga akan terjadi penurunan daya listrik langsung yang diperlukan.

Selanjutnya dari data-data tersebut kontribusi masing-masing pengaruh dihitung dengan membandingkan persentasenya dengan persentase perubahan nilai kebutuhan daya listrik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kontribusi kekasaran permukaan terhadap daya listrik langsung sebesar 52%. Dimana perubahan nilai kekasaran permukaan sebesar 29% hanya dapat mempengaruhi kebutuhan daya listrik sebesar 15%. Sedangkan keausan pahat memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap perubahan kebutuhan daya listrik

langsung, yaitu sebesar 75%. Yang berarti dengan hanya berubah sebesar 20% dari nilai keausan tepi pahat sudah dapat menyebabkan perubahan daya listrik langsung sebesar 15%. Dari sini dapat disimpulkan bahwa kontribusi keausan pahat terhadap daya listrik langsung lebih besar jika dibandingkan dengan kontribusi kekasaran permukaan.



Gambar 8. Persentase perubahan konsumsi daya listrik terhadap persentase perubahan pada kekasaran permukaan dan/keausan pahat baik pada proses skrap dengan dan/ tanpa cairan pendingin

Hal ini juga terjadi pada proses skrap dengan mempergunakan cairan pendingin. Dimana dengan mempergunakan cairan pendingin kontribusi keausan pahat masih lebih dominan dibandingkan dengan kontribusi kekasaran permukaan.

Hal yang menarik dari hasil ini adalah dengan penggunaan cairan pendingin maka baik perubahan rata-rata kekasaran permukaan maupun perubahan rata-rata keausan pahat menyebabkan berkurangnya daya listrik langsung yang diperlukan untuk memastikan proses pembentukan geram terjadi (*chip formation*). Hal ini ditenggarai sebagai akibat pengurangan gesekan selama proses pemotongan akibat penambahan cairan pendingin. Gesekan yang rendah menyebabkan daya/energi mekanik yang diperlukan untuk terjadinya geram juga akan turun sehingga akan menyebabkan tahanan listriknya turun. Ini, selanjutnya, akan berimplikasi pada penurunan keperluan (*supply*) daya listrik langsung yang harus dipasok pada motor untuk menggerakkan pahat maupun motor untuk penggerak meja (yang memberikan gerak makan).

Hasil ini juga mengkonfirmasi bahwa kenapa keausan pahat menjadi faktor yang menjadi pertimbangan dalam membangun persamaan energi untuk memperkirakan besarnya konsumsi/daya listrik langsung pada beberapa penelitian sebelumnya [3-4].

SIMPULAN

Dari penelitian ini ada beberapa hal utama yang dapat disimpulkan, yaitu:

1. Peningkatan nilai keausan pahat menyebabkan terjadinya peningkatan daya listrik langsung. Akan tetapi kekasaran permukaan justru memperlihatkan kecenderungan penurunan. Hal ini kemungkinan disebabkan karena terjadinya perubahan radius pojok selama proses skrap berlangsung. Sebagai akibat perubahan ini terjadi perubahan mekanisme pemotongan dari mekanisme pergeseran (*shearing*) menjadi mekanisme bajakan (*ploughing*) yang sudah tentu akan mempengaruhi besarnya daya listrik yang harus dialiri ke mesin perkakas.
2. Perubahan nilai keausan pahat memiliki kontribusi yang besar; yaitu 75% (pemotongan tanpa cairan pendingin) dan 67% (pemotongan dengan cairan pendingin) terhadap perubahan daya listrik langsung yang dibutuhkan pada proses skrap benda kerja ST 37 jika dibandingkan dengan kontribusi kekasaran permukaan yang hanya sebesar 52% dan 32% berturut-turut untuk proses pemotongan tanpa cairan pendingin dan proses pemotongan dengan cairan pendingin. Hal ini yang menjawab pertanyaan kenapa persamaan konsumsi energi listrik yang telah dibangun oleh beberapa penelitian sebelumnya mengesampingkan pengaruh kekasaran permukaan terhadap konsumsi energi/daya listrik langsung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak akan berhasil tanpa bantuan pihak-pihak yang terkait. Dalam kesempatan ini Penulis tidak lupa menyampaikan terima kasih kepada Niko Revita Vito yang telah meluangkan waktunya dalam pengambilan data-data yang ditampilkan pada tulisan ini disela-sela kesibukannya dalam pengambilan data Tugas Akhirnya. Selain itu Penulis juga tidak lupa menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah mendukung keuangan penelitian ini melalui RKAKL Tahun Anggaran 2015.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anderberg S.E., Kara S., dan Beno T. Impact of energy efficiency on computer numerically controlled machining. Proc. ImechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 224, 531-541.
2. Gutowski T.G., Dahmus J., dan Thiriez A. Electrical energy requirements for manufacturing processes. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, May 31st – June 2nd, 2006.

3. Rajemi M.F., Mativenga P.T., dan Aramcharoen A. Sustainable Machining: Selection of Optimum Turning Conditions Based on Minimum Energy Considerations. Journal of Cleaner Production, 2010, 18 (10-11), 1059-1065.
4. Balogun V.A., dan Mativenga P.T. Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. Journal of Cleaner Production, 2013, 41, 179-186.
5. Lalwani, D.I., Mehta, N.K., dan Jain, P.K., Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206, 167-179.
6. Palanikumar, K., Karunamoorthy, L. dan Karthikeyan, R., Optimizing the Machining Parameters for Minimum Surface Roughness in Turning of GFRP Composites Using Design of Experiments. J. Mater. Sci. Technol., 2004, 20 (4), 373-378.
7. Kant, G., dan Sangwan, K.S., Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. Journal of Cleaner Production, 2004, 83, 151-164.
8. Pervaiz, S., Deiab, I., and Zafar, S., dan Shams, S., Prediction of energy consumption and surface roughness in reaming operation of AI-6061 using ANN based models. International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI). 22-23 Oktober 2012, Rawalpindi, pp 169-173.
9. Gutowski, T., Murphy, C., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Piwonka, T., Sheng, P., Sutherland, J., Thurston, D., dan Wolff, E., Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States. Journal of Cleaner Production, 2005, 13 1-17.
10. Dahmus, J.B., dan Gutowski, T.G., An environmental analysis of machining. Proceedings of IMECE2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo November 13-19, 2004, Anaheim, California USA, pp 1-10.
11. Branker, K., Jeswiet, J., dan Kim, I.Y., Greenhouse gases emitted in manufacturing a product—A new economic model. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2011, 60, 53-56.
12. Dufloy, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., dan Kellens, K., Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2012, 61(2), 587-609.
13. Sutherland, J., Gunter, K., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Gutowski, T., Murphy, C., Piwonka, T., Sheng, P., Thurston, D., dan Wolff, E., A global perspective on the environmental challenges facing the automotive

- industry: state-of-the-art and directions for the future. *Int. J. Vehicle Design*, 2004, 35(1/2), 86-110.
14. Rajemi, M.F., Energy analysis in turning and milling, A thesis, Manchester, UK: The University of Manchester, 2011.
 15. Rajemi M.F., Mativenga P.T., dan Aramcharoen A. Sustainable Machining: Selection of Optimum Turning Conditions Based on Minimum Energy Considerations. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18 (10–11), 1059-1065.
 16. Balogun, V.A., dan Mativenga, P.T., Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 41, 179-186.
 17. Mulyadi, I.H., Balogun, V.A., dan Mativenga, P.T., Environmental performance evaluation of different cutting environments when milling H13 tool steel. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.024
 18. Qehaja, N., Jakupi, K., Bunjaku, A., Bruçi, M., dan Osmani, H., Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process. *Procedia Engineering*, 2015, 100, 135 – 140
 19. Singh, H., Khanna, R., dan Garg, M.P., Effect of cutting parameters on MRR and surface roughness in turning EN-8. *Current Trends in Engineering Research*, 2011, 1(1), 100-104
 20. Patel. P.R., dan Patel, V.A., Effect of machining parameters on Surface roughness and Power consumption for 6063 Al alloy TiC Composites (MMCs). *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, 2 (4), 295-300
 21. Camposeco-Negrete, C., Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 91,109-117
 22. Guo, Y., Loenders, J., Dufloy, J., dan Lauwers, B., Optimization of energy consumption and surface quality in finish Turning. *Procedia CIRP*, 2012, 1, 512 – 517
 23. ISO 8688-1 Standard, Tool life testing in milling; Part 1, 1989
 24. Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., dan Krishnamurthy, R., Modelling of tool wear based on cutting forces in turning. *Wear*, 169 (1993) 25-32
 25. Wang, J., Huang, C.Z., dan Song, W.G., The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 142, 338–346
 26. Dhara, N.R., dan Kamruzzaman, M., Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47, 754–759
 27. Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F., dan Simoncini, M., Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46, 1547–1554
 28. Childs, T.H.C, Dornfeld, D., Lee, D.-E., Min, S., Sekiya, K., Tezuka, R., dan Yamane Y., The influence of cutting edge sharpness on surface finish in facing with round nosed cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, 1, 70–75