

ISSN 1411 - 9471

Volume 11 nomor 3, September 2011

Jurnal TEKNIK **M**ESIN



JURNAL
TEKNIK MESIN

Volume 11

Nomor 3

Halaman
173 - 257

SURABAYA
September 2011

ISSN
1411-9471

JURNAL TEKNIK MESIN

ISSN 1411 - 9471

*Jurnal Teknik Mesin terbit tiga kali setahun pada bulan Januari, Mei dan September.
Berisi tulisan yang diangkat dari hasil penelitian dan kajian analitis kritis di bidang Teknik Mesin.*

Ketua Penyunting

Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko

Wakil Penyunting

Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA.

Penyunting Pelaksana

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD.
Ir. Sudjud Darsopuspito, MT.
Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT.
Is Bunyamin Suryo, ST. MSc.
M. Khoirul Effendi, ST. MSc.
Wahyu Wijanarko, ST. MSc.

Penyunting Ahli

Prof. Ir. Djati Nursuhud, MSME.
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc., PhD.
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA.
Ir. Bambang Daryanto W., MSME., PhD.
Ir. Sudiyono Kromodihardjo, MSc., PhD.
Ir. Budi Utomo Kukuh W, ME.
Dr. Ir. Abdullah Shahab, MSc.
Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.
Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME.
Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono, DEA.
Dr. Ir. Suhanan, DEA.
Dr. Ir. Berkah Fajar T., Dipl. Ing.
Dr. Ir. Iwan Kusmarwanto
Prof. Dr. Ing. Harwin Saptoadi, MSc.

*Mesin-Mesin Konversi Energi - Jurusan Teknik Mesin ITS
Automotive - Jurusan Teknik Mesin ITS
Mekanika&Mesin Fluida - Jurusan Teknik Mesin ITS
Vibrasi&Sistem Dinamis - Jurusan Teknik Mesin ITS
Sistem Manufaktur&Otomasi Industri - Jurusan Teknik Mesin ITS
Perpindahan Panas&Termodinamika Terapan - Jurusan Teknik Mesin ITS
Metalurgi - Jurusan Teknik Mesin ITS
Perpindahan Panas&Termodinamika Terapan - Jurusan Teknik Mesin ITS
Mekanika Benda Padat - Jurusan Teknik Mesin ITS
Metrologi&Kalibrasi Dimensi - Jurusan Teknik Mesin ITS
Departemen Metalurgi dan Material -UI
Perpindahan Panas - Jurusan Teknik Mesin UGM
Perpindahan Panas & Massa - Jurusan Teknik Mesin UNDIP
Praktisi Industri, Ahli Aeronautics
Teknik Pembakaran - Jurusan Teknik Mesin UGM*

Mitra Bestari, Jurnal Teknik Mesin Volume 11 Tahun 2011

Dr. Ir. Suharto, DEA
Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA
Prof. Dr. Ir. H.D. Sungkono, M.Eng
Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT
Dr. Eng. Prabowo, M.Eng
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA

Prof. Dr. Ing. I Made Londen Batan, ME
Ir. Bambang Daryanto, MSME. PhD.
Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT
Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD
Ary Bachtiar Krisna P., ST. MT. PhD.
Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, MSc.
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Tata Pelaksana Usaha

Sri Suharti, BA
Imam Dahroni

Alamat Redaksi

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp. 031- 5922941, 5946230, Fax. 031-5922941

Jurnal Teknik Mesin diterbitkan oleh Jurusan Teknik Mesin FTI - ITS

E-mail : jurnalme@me.its.ac.id,
jurnalme@yahoo.co.id
Website : www.me.its.ac.id/Data/jurnal.html,
jurnalme.bravehost.com

*Penyunting menerima sumbangan tulisan yang belum pernah diterbitkan dalam media lain.
Naskah diketik mengikuti Persyaratan Naskah Jurnal Teknik Mesin
seperti tercantum pada bagian dalam sampul belakang Jurnal Teknik Mesin.*

Jurnal TEKNIK **M**ESIN

Volume 11 Nomor 3, September 2011

ISSN 1411 – 9471

- Getaran Pada Pipa Percabangan Tipe T Akibat Fluktuasi Aliran
Dua Fasa Gas – Cair halaman 173-181
Muhammad Irsyad
- Effect of Transient Thermal Tensioning (TTT) on Fatigue Crack Growth Rate of
Friction Stir Welded T-Joints in Aluminium Alloy 6061-T6 Welded Structures halaman 182-190
Mochammad Noer IIman, Triyono
- Hambatan Termal Dan Efektivitas Alat Rekoveri Panas Loop Termosifon
Bertekanan 0,8 Dan 1,2 MPA halaman 191-199
Suyitno
- Effect of Prestrain on Delayed Fracture of Stainless Steel 304 halaman 200-207
Mohammad Badaruddin, Ahmad Su'udi
- Effect of Transfer Time During Austempering of Nodular Cast Iron FCD 450 halaman 208-214
Indra Sidharta, Wajan Berata
- Pengaruh Temperatur Karbonisasi dan Gasifikasi Terhadap Kualitas Kokas
Pada Industri Peleburan Besi halaman 215-221
Kitairil, Irwansyah dan Udink Aulia
- Pengaruh Kekerasan dan Stuktur Mikro Komposit Logam Al - SiC Hasil Proses
Metode Primex Sebagai Aplikasi Komponen Otomotif halaman 222-230
Agus Pramono
- Evaluasi dan Aplikasi Dinamometer *Force Ring* untuk Mengukur Gaya
Pemotongan pada Pemesinan Bubut dengan Sistem Pahat Berputar halaman 231-239
Suryadiwansa Harun
- Karakteristik ketangguhan *impact* dan kekuatan tarik komposit *hybrid* serat
batang kelapa /serat gelas menggunakan matrik *urea formaldehyde* halaman 240-248
Nasmi Herlina Sari, Ahmad Taufan
- Pemanfaatan Paket Pemograman CFD untuk Mengkaji Distribusi Temperatur
Ruang Bakar Boiler 51MW Berbahan Bakar MFO dan LNG halaman 249-257
Syukran



Evaluasi dan Aplikasi Dinamometer *Force Ring* untuk Mengukur Gaya Pemotongan pada Pemesinan Bubut dengan Sistem Pahat Berputar

Suryadiwansa Harun

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jalan Prof. Dr. Sumantri Brodjonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145

Telp. 0721-3555519, Fax. 0721-704947

Email: Harun@unila.ac.id

Diterima 16 Maret 2011; diterima terkoreksi 10 Juni 2011; disetujui 18 Oktober 2011

Abstract

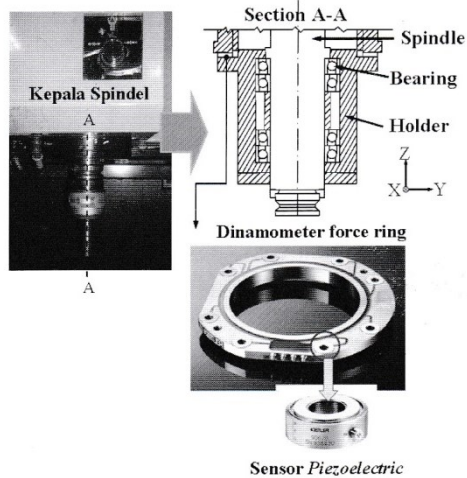
This paper presents an evaluation of the force ring dynamometer in order to measure accurately the cutting forces on the turning with rotary tool system. The evaluation criteria include the effect of integration of the force ring dynamometer on the sensitivity of the sensor, the cross-talk between the signal force channels, and the existence of spindle-internal force. Calibration of the force ring dynamometer was carried out prior the cutting test to calibrate the sensitivity of the force ring dynamometer with use of the table-type dynamometer and also to compensate the cross talk of the output signals and error signals due to rotations of the spindle. Actual metal cutting tests were carried out to measure the cutting force components, which were compared with those measured with the standard table-type force dynamometer. The cutting test results show the measured cutting force components with the force ring dynamometer are in good agreement with the signal measured by the standard dynamometer. In addition, the measurement precision of average cutting force of the force ring dynamometer is $\pm 10\%$. The measurement results of cutting force using the force ring dynamometer on the turning with rotary tool system showed that the force ring dynamometer is sensitive to the change of cutting force under the machining condition change including the cutting speed, depth of cut, and tool rotational speed.

Keywords: cutting force measurement, force ring dynamometer, turning with rotary tool system

Pemesinan kecepatan tinggi (*high speed machining*) adalah salah metode yang memainkan peranan penting dalam teknologi manufaktur modern saat ini. Hal ini disebabkan pemesinan kecepatan tinggi dapat meningkatkan produktifitas pemesinan dan menurunkan biaya produksi. Bagaimanapun, peningkatan suhu pemotongan adalah faktor pembatas usaha ini. Beberapa peneliti telah berusaha mencari metode yang efektif untuk mengatasi peningkatan suhu pemotongan ketika pemotongan kecepatan tinggi diterapkan. Umumnya suhu pemotongan yang tinggi dapat dikurangi dengan menggunakan cairan pendingin, tetapi usaha ini dihadapkan pada persoalan lingkungan dan kesehatan [1]. Metode lain adalah pemakaian material pahat potong yang mempunyai ketahanan aus yang tinggi

misalnya pahat potong *polycrystalline diamond* (PCD) [2] and CBN [3].

Salah satu metode untuk menurunkan suhu pemotongan serta untuk meningkatkan produktivitas pemesinan adalah dengan menggunakan metode sistem pahat putar dalam proses pemesinan bubut [4]. Pada metode pemesinan ini, pahat potong yang mata pisaunya (*cutting edge*) berbentuk bulat (*round tool*) diputar sambil memotong benda kerja yang juga berputar. Akibatnya ada indeks mata pisau yang secara kontinyu masuk dalam daerah pemotongan (*cutting zone*) untuk menyayat benda kerja dan kemudian keluar dari daerah pemotongan untuk didinginkan selama periode tanpa pemotongan (*non cutting period*) selama satu putaran pahat potong. Hal ini diharapkan bahwa suhu pahat potong akan menurun dibandingkan dengan proses pemesinan bubut



Gambar 1. Sensor gaya pemotongan dengan *built-in type* untuk *Vertical Machine Centre*

konvensional (pahat potong diam). Selain itu juga diharapkan bahwa proses pemesinan dengan pahat berputar ini dapat digunakan untuk pemotongan kecepatan tinggi (*high speed cutting*) untuk material Magnesium (*Magnesium Alloy*) dan material yang sulit dipotong (*difficult to-cut materials*) seperti paduan Nikel (*Nickel Alloy*) dan Titanium (*Titanium Alloy*).

Gaya-gaya pemotongan yang bekerja pada pahat potong adalah aspek yang penting dalam proses pemesinan, dimana bersama kecepatan potong dibutuhkan untuk memperkirakan kebutuhan energi pemotongan. Dalam penerapan pemesinan bubut dengan sistem pahat putar pada mesin perkakas sumbu banyak (*multi-axis machine tools*) seperti *machine center*, pengukuran komponen gaya secara prinsip berbeda dibandingkan pada mesin perkakas bubut konvensional. Karena pahat potong diletakkan pada spindle utama *machine center*, maka alat ukur gaya (*force dynamometer*) biasanya diintegrasikan pada spindle utama mesin tersebut. Oleh karena itu, pengukuran komponen gaya potong dalam penelitian ini adalah dengan mengintegrasikan *piezoelectric force ring sensor* dalam struktur spindle. Bagaimanapun, pengintegrasian sensor ini dalam struktur spindle dapat menimbulkan

beberapa permasalahan [5] misalnya menimbulkan saling pengaruh (*cross-talk*) antara komponen gaya dalam arah sumbu X, Y dan Z akibat deformasi struktural dan pengaruh gaya internal spindle. Akibatnya pengukuran gaya dimungkinkan tidak akurat.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sensor *force ring* sebagai alat ukur gaya dalam aspek permasalahan tersebut di atas sehingga aplikasi sensor *force ring* sebagai alat ukur gaya pemotongan dalam proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar terjamin keakuratannya.

METODE EKSPERIMEN

Sensor *Force Ring*

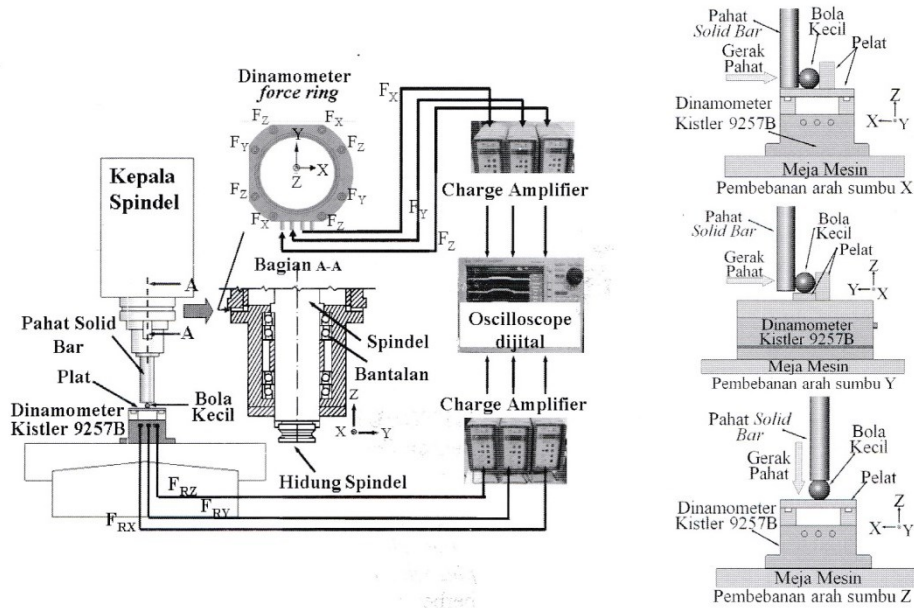
Gambar 1 memperlihatkan sensor *force ring* yang dievaluasi dalam penelitian ini. Sensor *force ring* tersusun dari delapan transduser *piezoelectric force* yang ditanam dalam bingkai berbentuk ring yang dipasang antara *front cap* spindle dan *spindle head*. Empat sensor digunakan untuk mengukur komponen gaya dalam arah sumbu Z (F_z), sedangkan empat sensor lainnya digunakan masing-masing untuk mengukur komponen gaya dalam arah sumbu Y (F_y) dan X (F_x). Berbagai sensor tersebut digabungkan dalam setiap arah gaya sehingga memungkinkan penghilangan pengaruh momen.

Kalibrasi Sensor *Force Ring*

Kalibrasi sensor *force ring* meliputi kalibrasi sensitivitas statik sensor, saling pengaruh (*cross-talk*) antar ketiga komponen gaya, dan pengaruh gaya internal spindle. Percobaan aktual pengukuran komponen gaya potong dengan menggunakan sensor *force ring* juga dilakukan, dimana adalah hasilnya dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan dinamometer standar (*table type dynamometer, Kitsler 9257B*).

Sensitivitas Statik Sensor

Kalibrasi sensitivitas statik dinamometer *force ring* dilakukan sebelum uji pemotongan dengan menggunakan dinamometer standar, Kitsler 9257B sebagai dinamometer acuan. Ilustrasi skematik kalibrasi dinamometer *force ring* diperlihatkan pada Gambar 2. Prinsip



a. Prinsip kalibrasi dinamometer *force ring* b. Pembebanan dinamometer dalam arah sumbu X, Y, dan Z

Gambar 2. Ilustrasi skematik kalibrasi statik dinamometer *force ring*

kalibrasi dinamometer ini adalah bahwa gaya bereaksi secara simultan pada kedua dinamometer yaitu standar dan *force ring* ketika kedua dinamometer itu diberi beban seperti dilihat pada Gambar 2.a. Gambar 2.b memperlihatkan pahat berbentuk solid silinder digunakan untuk memberikan beban kepada kedua dinamometer itu ke arah sumbu X, Y dan Z. Beban yang diberikan ke arah setiap sumbu adalah dengan cara pahat digerakkan untuk menekan pelat melalui bola kecil. Keluaran sinyal gaya-gaya F_z , F_y dan F_x dari kedua dinamometer itu dikirim ke *charge amplifier* untuk mengubah *electrical charge* menjadi *voltage* yang selanjutnya direkam menggunakan osiloskop digital.

Saling Pengaruh Komponen Gaya

Bagaimanapun, ketika dinamometer *force ring* diintegrasikan kedalam struktur spindle mesin perkakas, saling pengaruh (*cross-talk*) antara sumbu X, Y and Z akan timbul (lihat Tabel 1) yang disebabkan oleh

deformasi struktur. Saling pengaruh didefinisikan sebagai sinyal gaya yang ditangkap dari semua arah sumbu selain dalam arah sumbu dimana beban diaplikasikan. Oleh karena itu, saling pengaruh harus dilibatkan dalam kalibrasi dinamometer *force ring*. Gambar 3 memperlihatkan grafik hubungan antara beban yang diberikan pada setiap arah pembebanan dan reaksi gaya yang timbul pada sumbu X, Y dan Z, dimana adalah jelas terlihat adanya saling pengaruh gaya.

Persamaan hubungan antara beban yang diberikan pada setiap arah pembebanan dan reaksi yang timbul pada dinamometer *force ring* untuk masing-masing sumbu, X, Y, dan Z dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{matrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{matrix} = \begin{pmatrix} 7,749 & -4,461 & 0,036 \\ -5,882 & -9,186 & -0,652 \\ -0,586 & -1,399 & 9,291 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

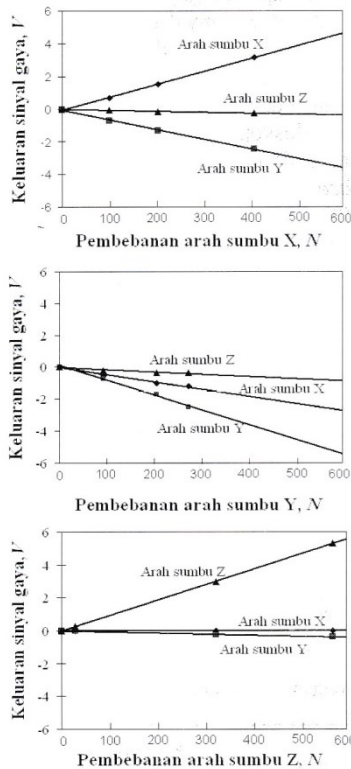
(Unit koefisien: *mV/N*)



dimana, V_x , V_y , dan V_z adalah keluaran sinyal gaya (satuan mV) dari dinamometer gaya.

Tabel 1. *Cross-talk* yang timbul antara sumbu X, Y, dan Z

Dinamometer Standar	Dinamometer <i>Force Ring</i>			
	Pembebanan (N)	Keluaran sinyal gaya (V)		
		V_x	V_y	V_z
Arah sumbu X (F_x)	0	0	0	0
	102	0.697	-0.713	-0.065
	206	1.530	-1.295	-0.158
Arah sumbu Y (F_y)	0	0	0	0
	94	-0.548	-0.704	-0.228
	206	-1.013	-1.744	-0.363
Arah sumbu Z (F_z)	0	0	0	0
	29	0.006	-0.232	2.960
	571	0.021	-0.356	5.334



Gambar 3. Grafik hubungan antara beban yang diberikan dan reaksi yang timbul pada setiap sumbu X, Y, dan Z

force ring. Sedangkan F_x , F_y , dan F_z adalah beban yang diberikan pada setiap sumbu, dimana diukur dengan menggunakan dinamometer gaya acuan (*table dynamometer*, Kitsler 9257B).

Untuk mendapatkan keluaran gaya (dalam satuan N) untuk setiap sumbu X, Y, dan Z ketika dinamometer *force ring* digunakan untuk mengukur gaya, maka matrik pada Persamaan 1 harus diinversikan. Persamaan berikut ini adalah hasil dari inversi persamaan matrik tersebut, yaitu :

$$\begin{matrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{matrix} = \begin{pmatrix} 0,094 & -0,045 & -0,0035 \\ -0,060 & -0,079 & -0,005 \\ -0,003 & -0,0147 & 0,107 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

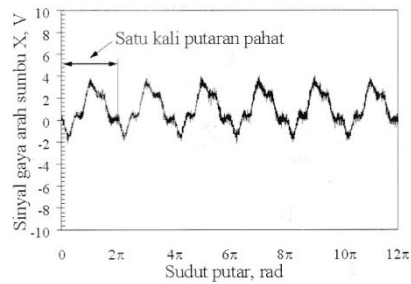
(Unit koefisien: N/mV)

dimana, F_x , F_y , dan F_z adalah keluaran nilai gaya terkalibrasi pada sumbu X, Y, dan Z masing-masing. Sedangkan V_x , V_y , dan V_z adalah sinyal gaya (satuan mV) pada sumbu X, Y, dan Z masing-masing, yang diperoleh dari pengukuran gaya dengan sensor *force ring*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Sinyal Gaya Dinamometer *Force Rin*

Untuk mengukur komponen gaya pemotongan (F_x , F_y , dan F_z) dengan sistem pengukuran yang dipakai, maka berikut ini ada dua permasalahan yang harus diselesaikan. Pertama, sinyal *error* yang timbul akibat inersia massa dari sistem spindel pahat. Contoh tipikal sinyal *error* komponen gaya dalam



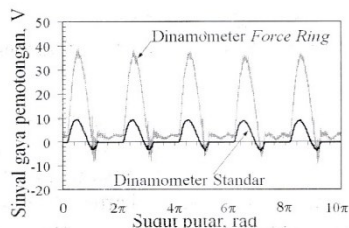
Gambar 4. Contoh gaya arah sumbu X terukur selama pahat berputar *idle* atau sebelum pemotongan (putaran pahat 300 rpm)



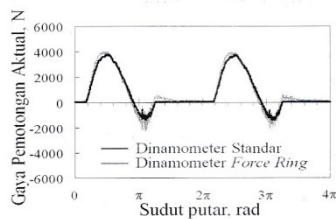
arah sumbu X diidentifikasi seperti pada Gambar 4, dimana adalah sinyalnya mengalami sinkronisasi terhadap putaran spindel dan sinkronisasi ini berulang selama putaran spindel tanpa beban (*idle spindle rotation*). Tipikal sinyal *error* ini juga terjadi dalam arah sumbu Y dan Z. Supaya sinyal *error* terkompensasi, maka sinyal gaya harus diukur selama putaran spindel tanpa beban (*idle*) atau sebelum pemotongan dan hasilnya dikurangkan dengan sinyal gaya yang diukur selama proses pemotongan.

Kedua, saling pengaruh (*cross talk*) sinyal gaya yang mempengaruhi pengukuran komponen gaya pemotongan. Untuk mengatasi masalah ini, besaran *cross talk* diidentifikasi oleh kalibrasi statik seperti dijelaskan sebelumnya dan ketiga komponen gaya aktual F_x , F_y , dan F_z adalah diestimasi oleh hubungan pengukuran tiga sinyal gaya (V_x , V_y , dan V_z) berdasarkan Persamaan 2.

Gambar 5 memperlihatkan contoh gaya pemotongan dalam arah sumbu X dari pemesinan *slotting* yang diukur oleh dinamometer standar dan *force ring* sebelum dan sesudah kompensasi.



a. Sebelum kompensasi



b. Sesudah kompensasi

Gambar 5. Contoh gaya pemotongan arah sumbu X dari pemesinan *slotting* sebelum dan sesudah kompensasi. (kecepatan putar pahat 300 rpm, kecepatan makan 30mm/min, tebal pemotongan 4mm, diameter pahat 20mm, jumlah *cutting edge* 1, material benda kerja S50C, dan *dry cutting*)

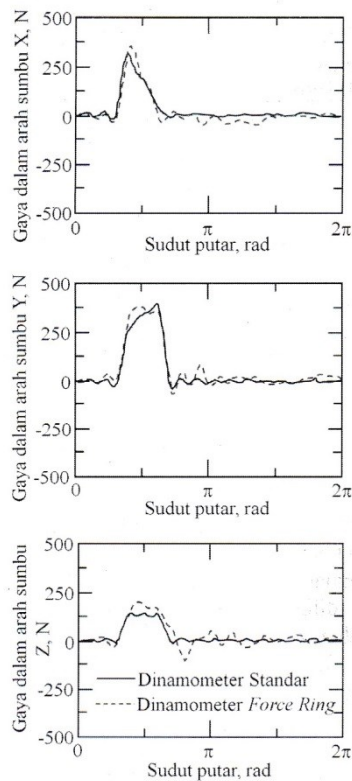
Sinyal gaya pemotongan orijinal yang diukur dengan dinamometer *force ring* jelas terlihat tidak sama dengan yang diukur dengan dinamometer standar (lihat Gambar 5.a). Hal ini diidentifikasi karena pengaruh *cross-talk* dan gaya internal spindel dalam pengukuran gaya dengan dinamometer *force ring*. Setelah dilakukan kompensasi terhadap pengaruh-pengaruh tersebut maka gaya pemotongan aktual yang diukur dengan dinamometer *force ring* terlihat mirip dengan gaya yang diukur dengan dinamometer standar (lihat Gambar 5.b).

Perbandingan Kinerja antara Force Ring dan Dinamometer Standar

Untuk membandingkan unjuk kerja pengukuran antara sensor *force ring* dan dinamometer standar (Kitsler 9257B), percobaan proses pemesinan aktual dilakukan untuk mengukur komponen gaya pemotongan secara simultan. Keluaran sinyal gaya dari kedua alat ukur tersebut selanjutnya dilewatkan pada filter *low pass* (200 Hz) supaya grafik sinyal pengukuran mudah dibaca sebelum dicatat oleh dijital osiloskop. Percobaan pemesinan dilakukan pada proses pemotongan *slot milling* dan *face milling* baja karbon medium (JIS:S50C) dengan pahat HSS *end mill* yang mempunyai satu mata pisau (*cutting edge*). Kondisi pemotongan yang lain dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi pemotongan untuk percobaan pemesinan aktual

Pemesinan	Slot Milling	Face Milling
Material benda kerja	Steel, JIS S50C	
Pahat potong	End-mill dia.20, 1 cutting edge	Face-Mill dia 100, 1 cutting edge
Kecepatan putar pahat	500 rpm	750 rpm
Kecepatan makan	40mm/min	100mm/min
Tebal pemotongan aksial	4 mm	1 mm
Cairan pendingin	Kering (<i>dry cutting</i>)	



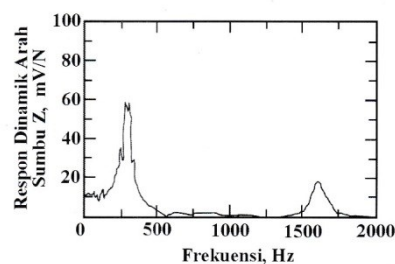
Gambar 6. Perbandingan gaya yang diukur dengan dinamometer *force ring* dan standar pada proses pemessinan *slot milling* dengan pahat *end mill*

Gambar 6 memperlihatkan hasil pengukuran komponen gaya pada proses pemessinan *slot milling* dengan parameter pemotongan seperti tersaji pada Tabel 2. Dari gambar ini jelas terlihat bahwa komponen gaya yang diukur dengan sensor *force ring* adalah mirip dengan sinyal gaya yang diukur oleh dinamometer standar. Walaupun demikian, komponen gaya yang diukur dengan dinamometer *force ring* adalah agak berfluktuasi utamanya dalam arah sumbu Z. Hal ini mengindikasikan frekuensi natural dinamometer *force ring* lebih rendah dibandingkan dinamometer standar, khususnya dalam arah sumbu Z. Indikasi ini diperoleh berdasarkan hasil tes respon dinamik dinamometer *force ring* dalam arah sumbu Z (lihat Gambar 7), dimana tes ini

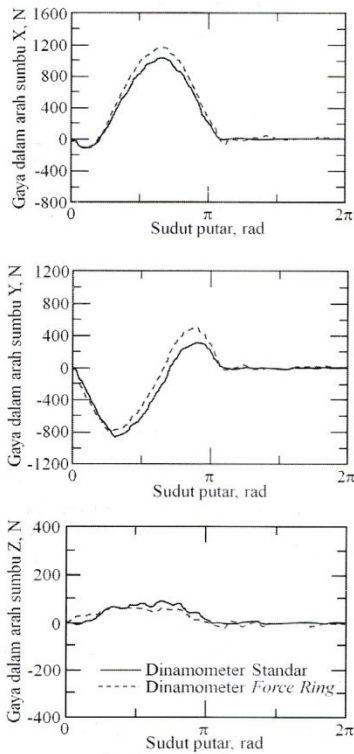
dilakukan dengan cara yaitu titik pemotongan dalam arah sumbu Z dieksitasi dengan menggunakan suatu *impulse hammer* dan sinyal luaran dari dinamometer *force ring* dan *accelerometer* yang dipasang pada *hammer* diukur dengan menggunakan osiloskop. Selanjutnya *frequency respond function* dihitung menggunakan analisis frekuensi. Dari Gambar 7 itu terlihat bahwa frekuensi natural dinamometer *force ring* dalam arah sumbu Z adalah nilainya 250 Hz, dimana adalah nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan frekuensi natural dinamometer standar yaitu 3.5 kHz [6]. Tapi disisi lain ini juga mengindikasikan bahwa sensitifitas sensor *force ring* lebih baik dibandingkan dinamometer standar.

Percobaan pemessinan aktual berikutnya adalah proses *rough face milling*. Gambar 8 memperlihatkan hasil pengukuran komponen gaya pada proses *face milling* material benda kerja S50C dengan lebar 48 mm dan menggunakan pahat potong dengan diameter 100mm. Dalam gambar ini, komponen gaya yang diukur dengan dinamometer *force ring* adalah juga mirip dengan komponen gaya yang diukur oleh dinamometer standar. Serupa pada kasus proses pemessinan *slot milling*, komponen gaya diukur dengan dinamometer *force ring* utamanya dalam arah sumbu Z, adalah juga terlihat agak berfluktuasi.

Hasil lainnya adalah keakuratan pengukuran rata rata gaya pemotongan dari dinamometer *force ring* adalah $\pm 10\%$. Hasil yang diperoleh ini akan menjadi acuan dalam aplikasi dinamometer *force ring* untuk pengukuran komponen gaya pada pemessinan bubut dengan sistem pahat putar.



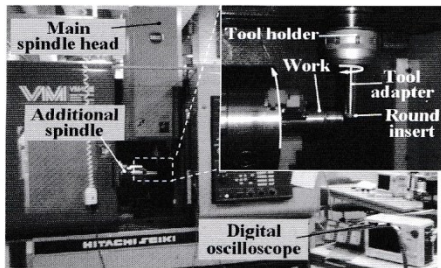
Gambar 7. Contoh tes respon dinamik dari dinamometer *force ring* dalam arah sumbu Z



Gambar 8. Perbandingan gaya yang diukur dengan dinamometer Force Ring dan Standar pada pemesinan face milling

Aplikasi Dinamometer Force Ring untuk Pengukuran Gaya Potong pada Pemesinan Bubut dengan Sistem Pahat Berputar

Untuk mengaplikasikan sistem pengukuran sensor force ring dalam rangka mendapatkan gaya pemotongan pada proses pemesinan bubut dengan sistem pahat

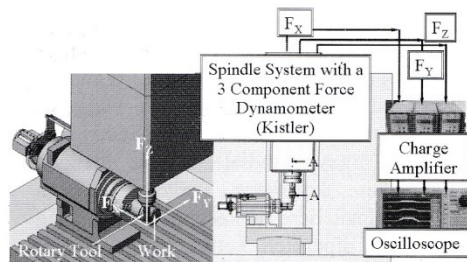


Gambar 9. Peralatan penelitian proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar

Tabel 3. Kondisi pemotongan proses pemesinan dengan sistem pahat putar

Material benda kerja	Plain Carbon Steel (JIS:S45C) Diameter=50mm	
Pahat	Jenis: RPMT 1604 MO-BB (Kyocera)	
	Material: PVD Coated Cermet Geometri: Normal rake dan relief angle $\alpha=11^{\circ}$, Diameter D=16 mm	
Kecepatan putar pahat N_T, min^{-1}	0 ~ 4000	
Kecepatan potong $V_W, \text{m/min}$	60 ~ 160	
Gerak makan $f, \text{mm/rev}$	0.1 ~ 0.25	
Depth of cut a, mm	0.5; 1	
Sudut Inklinasi $i, \text{deg.}$	0	
Sudut Offset $\theta, \text{deg.}$	0	
Cairan Pendingin	Kering (Dry)	
Arah putaran pahat	CW; CCW	

berputar, satu set percobaan dilakukan pada Mesin Center Vertikal, Hitachi Seiki VM-3. Setup peralatan yang digunakan dalam percobaan dapat dilihat pada Gambar 9. Satu spindle tambahan diletakkan pada meja mesin, dimana benda kerja dicekam pada spindle tersebut sehingga benda kerja dapat berputar layaknya proses pemesinan bubut. Pahat sisipan (insert) yang terbuat dari PVD Coated Cermet (diameter 16mm) dan mempunyai sudut geram normal 11° digunakan dalam penelitian ini. Pahat sisipan tersebut dicekam oleh adapter pahat khusus dan selanjutnya dipasang pada spindle Mesin Center Vertikal yang putarannya dapat diubah dengan pemrograman kontrol numerik (NC programming). Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon sedang (Plain Carbon Steel, JIS: S45C). Selanjutnya kondisi pemotongan utama dirangkum dalam Tabel 3.



Gambar 10. Ilustrasi skematik sistem pengukuran gaya dalam proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar



Gambar 10 memperlihatkan suatu ilustrasi skematik dari sistem pengukuran gaya dalam proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar. Komponen gaya yang diukur ada tiga, yaitu gaya tangensial atau gaya potong utama, F_z , dimana merupakan gaya aksi akibat benda kerja berputar dalam arah tangensial. Gaya aksial, F_x adalah komponen gaya longitudinal yang bereaksi dalam arah paralel terhadap sumbu putar benda kerja. Dan gaya radial, F_y adalah komponen gaya yang bereaksi dalam arah radial benda kerja. Sedangkan gaya resultan, F_R adalah dirumuskan sebagai berikut:

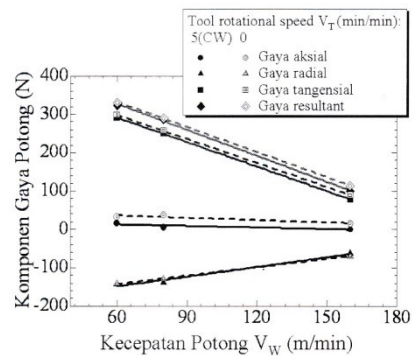
$$F_R = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (3)$$

Ketiga komponen gaya tersebut di atas kemudian diukur dengan menggunakan dinamometer *force ring*. Sinyal gaya-gaya yang dibaca oleh sensor dinamometer dikirim ke *charge amplifier* sebelum dicatat dengan menggunakan osiloskop digital. Untuk mendapatkan komponen gaya aktual, sinyal gaya-gaya ini kemudian diolah seperti dijelaskan pada sub-bagian pengolahan sinyal gaya dinamometer *force ring*.

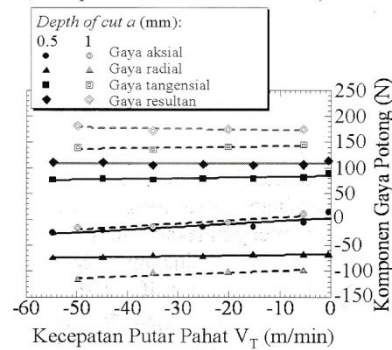
Hasil pengukuran komponen gaya-gaya menggunakan dinamometer (sensor) *force ring* pada proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12. Gambar 11 memperlihatkan grafik hubungan antara kecepatan potong dan komponen gaya pemotongan pada kondisi kecepatan putar pahat 0 (pahat tidak berputar) dan 5m/min, tebal pemotongan (*depth of cut*) 0,5mm, kecepatan makan 100mm/min, dan tanpa cairan pendingin (*dry cutting*). Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa gaya potong utama (gaya tangensial) dan gaya radial menurun dengan peningkatan kecepatan potong dari 60 sampai 160m/min ketika pahat tidak berputar, $V_T=0$ m/min (pemesinan bubut konvensional). Sedangkan perubahan gaya radial seiring dengan peningkatan kecepatan potong adalah konstan. Hasil dengan kecenderungan yang sama juga diperoleh ketika pahat diputar dengan kecepatan, $V_T=5$ m/min. Hal ini dipahami bahwa peningkatan kecepatan potong memicu suhu pemotongan meningkat

sehingga menyebabkan pelemahan material benda kerja akibat dari peningkatan suhu pemotongan. Hasil ini dapat memicu suatu penurunan komponen gaya pemotongan [7].

Gambar 12 memperlihatkan grafik hubungan antara tebal pemotongan (*depth of cut*) dan komponen gaya pemotongan selama proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar. Dari gambar ini terlihat bahwa gaya potong utama dan gaya radial yang diperoleh dalam kasus tebal pemotongan sama dengan 1mm adalah lebih besar dibandingkan dalam kasus tebal pemotongan 0,5mm. Hal ini dipahami bahwa peningkatan nilai tebal pemotongan juga diikuti oleh peningkatan *undeformed chip cross-section area*. Oleh karena itu, faktor ini memicu peningkatan komponen gaya pemotongan seiring dengan



Gambar 11. Pengaruh kecepatan potong terhadap komponen gaya potong. (Kondisi pemotongan: $a = 0,5$ mm, kecepatan makan = 100mm/min)



Gambar 12. Pengaruh *depth of cut* terhadap komponen gaya potong. (Kondisi pemotongan: $V_w = 160$ m/min, $f = 0,1$ mm/rev, arah putaran pahat CCW)



peningkatan tebal pemotongan. Bagaimanapun juga, komponen gaya aksial agak menurun ketika besaran tebal pemotongan diubah dari 0,5 menjadi 1mm.

Berdasarkan hasil pengukuran gaya pemotongan dari pemesinan bubut sistem pahat putar di atas maka dapat disimpulkan bahwa dinamometer *force ring* adalah sensitif terhadap perubahan gaya pemotongan di bawah perubahan kondisi pemesinan yang meliputi kecepatan potong, kecepatan putar pahat, dan *depth of cut*. Oleh karena itu, ini membuktikan bahwa dinamometer *force ring* handal digunakan untuk mengukur komponen gaya pemotongan pada proses pemesinan bubut dengan sistem pahat berputar.

KESIMPULAN

Dari evaluasi *force ring dynamometer* untuk mengukur gaya pemotongan dalam proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Terjadi sinkronisasi *cross-talk* dan sinyal *error* dengan putaran spindel mesin ketika sensor *force ring* diintegrasikan dalam struktur spindel mesin perkakas.
2. Setelah dilakukan proses kompensasi *cross-talk* dan sinyal *error*, sinyal gaya pemotongan yang diukur oleh *force ring dynamometer* adalah mirip dengan sinyal gaya yang diukur dengan dinamometer standar (*table dynamometer*, Kistler 9257B) pada kasus proses pemesinan *slot milling* dan *face milling*.
3. Keakuratan pengukuran rata-rata gaya pemotongan dari dinamometer *force ring* adalah $\pm 10\%$.
4. Hasil pengukuran komponen gaya pada proses pemesinan bubut dengan sistem pahat putar menggunakan *force ring dynamometer* menunjukkan bahwa dinamometer ini sensitif terhadap perubahan gaya pemotongan di bawah perubahan kondisi pemesinan meliputi kecepatan potong, kecepatan putar pahat, dan *depth of cut*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Eksperimen yang disajikan dalam tulisan ini dilakukan di Lab. CIM Kobe University dalam rangka proyek kerjasama penelitian "The Spinning Tool Turning" dengan Mori Seiki Co. Ltd. Saya mengucapkan terima kasih kepada Prof. Moriwaki, Prof. Shibusaka, K. Okura dan Gregory Hyatt yang berkontribusi atas kesuksesan proyek penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Klocke, F. & Eisenblatter, G., 1997, "Dry Cutting", *Annals of the CIRP*, Vol. 46 (2), 519-526.
- [2]. Klocke, F., Gerschwiler, K., Lung, D., Stegen, A., Fritsch, R., & Essel, I., 2007, "Approaches to high-speed cutting of titanium-based materials", *Proceeding of the 6th International Conference on High Speed Machining*, San Sebastian, Spain, 21-22 March, 207-211.
- [3]. Uhlmann, E., Fuentes, J.A.O., & Keuncke, M., 2008, "Analysis and application of CBN coated cutting tools", *Proceedings of the 7th International Conference The Coatings in Manufacturing Engineering*, Chalkidiki, Greece, 1-3 October, 83-91.
- [4]. Harun, S., Shibusaka, T., & Moriwaki, T., 2009, "Cutting Temperature Measurement in Turning with Actively Driven Rotary Tool", *Journal of Key Engineering Materials*, Vol. 389-390, 138-143.
- [5]. Byrne, G., Dornfield, D., Inasaki, I., Ketteler, G., Konig, W., & Teti, R., 1995, "Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application", *Annals of the CIRP*, Vol. 44 (2), 541-567.
- [6]. KISTLER, 2009, "Catalogue of Precise Measuring Systems for Metal-Cutting", Kistler Group, Switzerland.
- [7]. Trent, E.M. & Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", 4th edition, Butterworth-Heinemann, London.