

## Rancang Bangun *Dynamometer* Untuk Pengukuran Gaya Potong Pada Proses Pembubutan

Didik Djoko Susilo, Gandung Sam Purwoko, Zainal Arifin

Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret  
Jl. Ir. Sutami No 36 A Surakarta, 57126  
e-mail: djokusus\_2010@yahoo.com

### Abstract

*Cutting force plays important rule in the machining processes. Measurement of cutting force needs specific tool called dynamometer. The price of this tool is still expensive, so the aim of this project is to develop simple dynamometer for cutting force measurement in turning process. The dynamometer would measure tangential and radial force generated by the contact between cutting tool and the workpiece. The step of dynamometer development consist of design, manufacture and calibration process. Design process was started from identifying design problem, stating design requirement and objective, concept generation, and concept evaluation. The selected concept then was drafted detailly and analyzed. After design process complete, the next step was manufacture of mechanical components and electric circuits of the dynamometer. After that, the dynamometer was assembled for calibration process. The Calibration process consist of linearity error test, hysteresis test, and repeatability error test. The result of the design is dynamometer for cutting force measurement in turning process which have dimension 190 mm x 60 mm x 60 mm. The sensor used for force measurement is strain gages. The data acquisition use Advantech USB-4716 and software PCLS ADAMVIEW32. The dynamometer can measure maximum force of 500 N for tangential and axial force. The testing of dynamometer showed linearity error for tangential and radial force was 0,71% and 1,43% respectively, hysteresis for tangential and radial force was 1,92% and 2,91% respectively and repeatability error for tangential and radial force was 3,85% and 3,96% respectively.*

**Keywords:** *Design, Cutting force, Dynamometer, Strain gauge, Calibration*

### PENDAHULUAN

Proses pembubutan merupakan salah satu proses permesinan yang cukup penting di dunia industri. Pada saat proses pembubutan berlangsung, material yang terpotong akan menghasilkan gaya potong. Besarnya gaya potong dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya kecepatan pemotongan, laju pemakanan, kedalaman pemotongan, geometri alat potong, jenis material benda kerja dan cara pendinginan benda kerja (Korkut, 2008).

Pengetahuan tentang parameter gaya potong yang terjadi dapat digunakan untuk mengkaji parameter permesinan yang lain, seperti mampu mesin material, bentuk *chip* yang terjadi, gesekan dan panas dari alat potong. Selain itu, gaya potong juga merupakan parameter yang bisa digunakan untuk mengoptimalkan proses permesinan pada proses pembubutan (Baldoukas, 2008). Sehingga penelitian tentang gaya potong merupakan hal yang cukup penting.

Perhitungan gaya potong secara teoritis tidak bisa mendapatkan hasil yang akurat karena banyak sekali parameter yang mempengaruhi besarnya gaya

potong. Selain itu, perhitungan gaya potong secara teoritis juga hanya bisa digunakan untuk mengukur gaya potong utama ( $F_c$ ).

Alat yang digunakan untuk mengukur besarnya gaya potong yang terjadi biasa disebut *dynamometer*. *Dynamometer* ini dipasangkan pada pahat potong, sehingga ketika proses pembubutan berlangsung, pahat yang memotong benda kerja akan menimbulkan reganganyang dapat dibaca melalui sistem akuisisi data. Sehingga gaya potong pada proses permesinan bisa diketahui besarnya (IIT Karagpur, 2004).

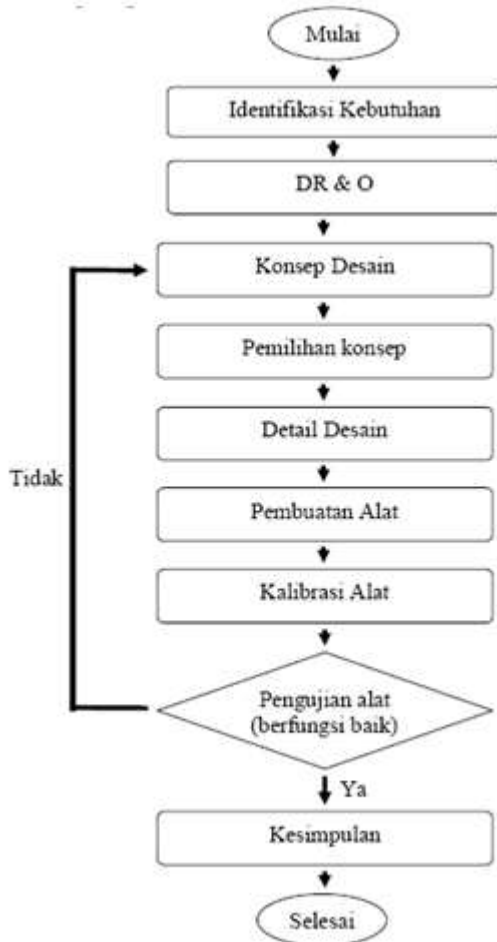
Pada saat ini, harga *dynamometer* buatan pabrik cukup mahal. Salah satu produk *universal dynamometer* tipe *piezoelektrik* buatan pabrik yang ada di pasaran merk Kistler, harganya mencapai 616 juta rupiah (PT Taharica, 2012). *Universal dynamometer piezoelektrik* ini mampu mengukur 3 arah gaya dan dapat diaplikasikan untuk pengukuran gaya potong pada mesin milling, bubut, bor maupun mesin gerinda.

Karena mahalnya *dynamometer* buatan pabrik dan adanya beberapa kelemahan perhitungan gaya potong secara teoritis, maka perlu dirancang dan dibuat

*dynamometer* sederhana yang dapat digunakan untuk melakukan pengukuran gaya potong pada proses permesinan bubut.

## METODA PERANCANGAN

Diagram alir proses perancangan *dynamometer* ditunjukkan pada gambar 1:



**Gambar 1.** Diagram alir pengerjaan tugas akhir *dynamometer*

## IDENTIFIKASI KEBUTUHAN

Dalam perancangan *dynamometer* ini kebutuhan konsumen yang harus dipenuhi dirumuskan sebagai berikut:

1. *Dynamometer* mampu membaca gaya potong arah tangensial dan aksial secara bersamaan.
2. Hasil pengukuran bisa ditampilkan pada layar komputer.
3. Center pahat bisa diatur naik turun.
4. Bisa diaplikasikan untuk pahat *carbide* maupun pahat HSS.
5. Konstruksi *dynamometer* kuat.
6. Mudah dirakit.

7. Hasil pembacaan pada komputer berupa gaya.
8. Harga pembuatan terjangkau.

Selanjutnya identifikasi kebutuhan konsumen tersebut di atas disusun menjadi *design requirement and objectives (DR&O)* yang menjabarkan kebutuhan konsumen menjadi spesifikasi produk yang lebih detail. Berikut adalah *DR&O dynamometer* :

1. *Dynamometer* mampu mengukur gaya aksial dan tangensial sampai 500 N.
2. Hasil pengukuran bisa ditampilkan di komputer dan disimpan di memori komputer.
3. Center pahat bisa diatur pada *range* 15 mm.
4. Ukuran pahat *carbide* dan HSS maksimal 10x10 mm.
5. Rakitan baut *dynamometer* tidak mudah kendor karena getaran saat pembubutan.
6. Penyetingan *dynamometer* di mesin bubut maksimal 30 menit.
7. Hasil pengukuran di komputer menampilkan gaya berupa angka dan grafik.
8. Harga pembuatan kurang dari 30 juta.

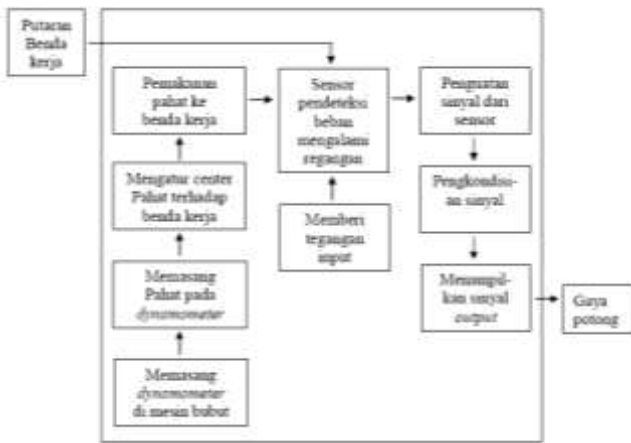
## KONSEP DESAIN

Pembangkitan konsep desain *dynamometer* diawali dengan menuliskan blok fungsi *dynamometer* dalam sebuah black box, yang selanjutnya disusun diagram blok fungsi *dynamometer*, seperti ditunjukkan pada gambar 2. dan



**Gambar 2.** Black box fungsi *dynamometer*.

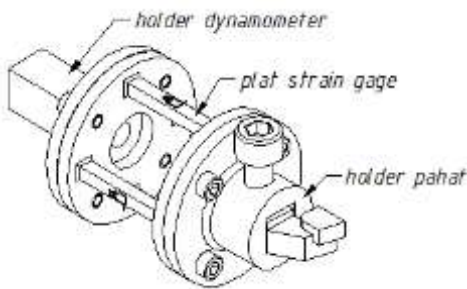
Selanjutnya fungsi *dynamometer* tersebut di atas diuraikan lagi kedalam sub fungsi dan sub-sub fungsi yang menggambarkan bagaimana sebuah *dynamometer* berperilaku untuk mengukur gaya potong pada proses pembubutan, sebagaimana diuraikan dalam gambar 3 berikut ini.



**Gambar 3.** Blok fungsi dan sub fungsi konsep dynamometer.

Pembangkitan konsep dilakukan menggunakan metode morfologi, sehingga diperoleh empat konsep disain *dynamometer* berikut ini:

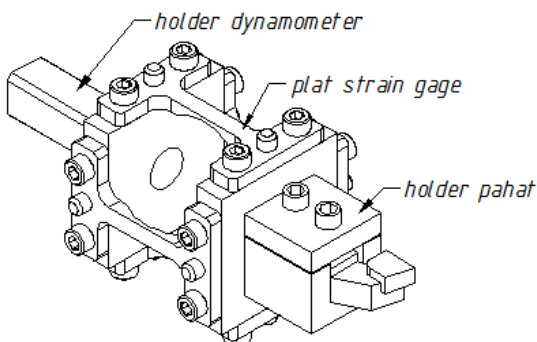
*Konsep 1 :*



**Gambar 4.** Konsep 1 *dynamometer*

Pada konsep 1 ini, sensor *strain gage* dipasang pada empat elemen regangan yang dilas sehingga tidak bisa dibongkar pasang.

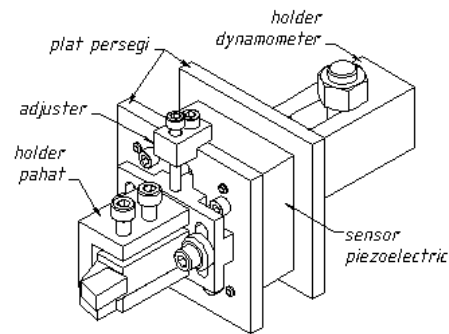
*Konsep 2 :*



**Gambar 5.** Konsep 2 *dynamometer*

ada konsep 2, sensor *strain gauge* dipasang pada plat bentuk H yang dibaut sehingga bisa dibongkar pasang.

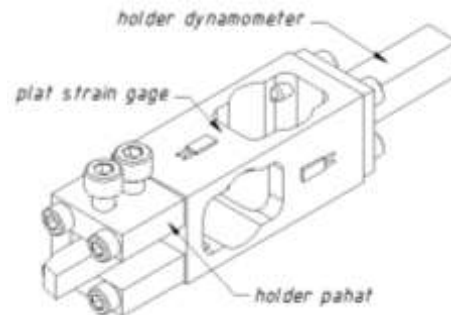
*Konsep 3*



**Gambar 6.** Konsep 3 *dynamometer*

Pada konsep 3, menggunakan sensor piezo elektrik yang dipasang diantara dua plat persegi.

*Konsep 4 :*



**Gambar 7.** Konsep 4 *dynamometer*

Pada konsep 4, sensor *strain gage* diletakkan pada batang aluminium dengan letak yang berbeda sehingga bisa lebih sensitif.

### PEMILIHAN KONSEP

Metode pemilihan konsep desain *dynamometer* ini menggunakan metode PUGH atau perbandingan relative antar konsep desain. Sebelum dibandingkan terlebih dahulu disusun kriteria-kriteria yang akan dibandingkan. Masing-masing kriteria diberi bobot sesuai dengan kepentingan kriteria tersebut terhadap disain *dynamometer*. Dalam evaluasi ini pembobotan menggunakan skala 5. Selanjutnya dipilih salah satu konsep desain sebagai referensi. Konsep-konsep yang lain dibandingkan dengan konsep referensi untuk

masing-masing kriteria penilaian. Jika satu konsep lebih baik dari referensi maka diberi nilai (+), jika sama baik diberi nilai (S), atau jika lebih buruk diberi nilai (-). Hasil pemilihan konsep ini ditunjukkan pada tabel 1 berikut ini.

**Tabel 1.** Pemilihan konsep terbaik

No	Kriteria	Bobot	Alternatif Konsep			
			1	2	3	4
1	Mampu membaca gaya aksial dan Tangensial secara bersamaan	4	REFERENSI	S	S	-
2	Gaya potong bisa tersimpan dan terbaca di komputer	4		S	S	S
3	Center pahat bisa diatur naik turun	3		S	S	S
4	Bisa dipasang pahat carbide dan HSS	4		S	S	S
5	Konstruksi dynamometer kuat	4		-	+	+
6	Mudah dirakit	2		S	S	S
7	Output berupa gaya	4		S	S	S
8	Harga pembuatan terjangkau	4		-	-	+
Jumlah (+) dikalikan bobot			0	0	4	12
Jumlah (-) dikalikan bobot			0	8	-4	0
Nilai akhir			0	-8	0	12
Lanjutkan			tidak	tidak	tidak	ya

Keterangan bobot :

- 0 : tidak penting
- 1 : kurang penting
- 2 : cukup penting
- 3 : penting
- 4 : sangat penting

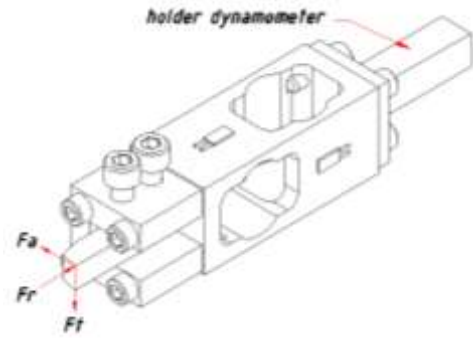
Berdasarkan tabel 1 di atas, konsep terbaik terdapat pada konsep 4 karena mendapatkan poin penilaian yang paling tinggi dibandingkan dengan konsep lainnya.

**ANALISA TEGANGAN KONSEP TERPILIH**

Setelah dipilih konsep terbaik, maka selanjutnya menghitung dilakukan analisa kekuatan terhadap rancangan dynamometer konsep terpilih. Analisa kekuatan dilakukan menggunakan *software* catia V5R14. Setting parameter analisa kekuatan sebagai berikut:

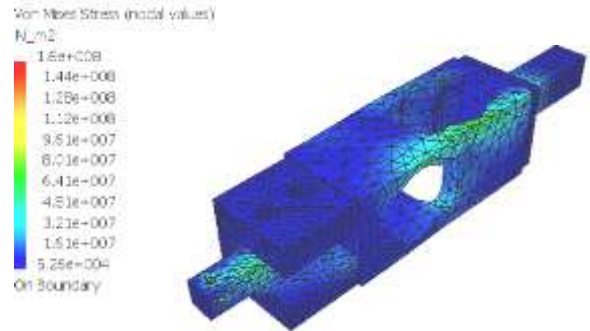
1. Beban terletak di ujung pahat yaitu arah tangensial (Ft) 625 N, arah aksial (Fa) 625 N dan arah radial (Fr) 625 N. Beban 625 N berdasarkan pada beban maksimal *dynamometer* sebesar 500 N dikali dengan angka keamanan 1,25.
2. Material yang akan digunakan adalah Alumunium 6061.
3. *Holder dynamometer* digunakan sebagai tumpuan *dynamometer*.

Setting ini ditunjukkan pada gambar 8 berikut ini.



**Gambar 8.** Setting pembebanan pada dynamometer

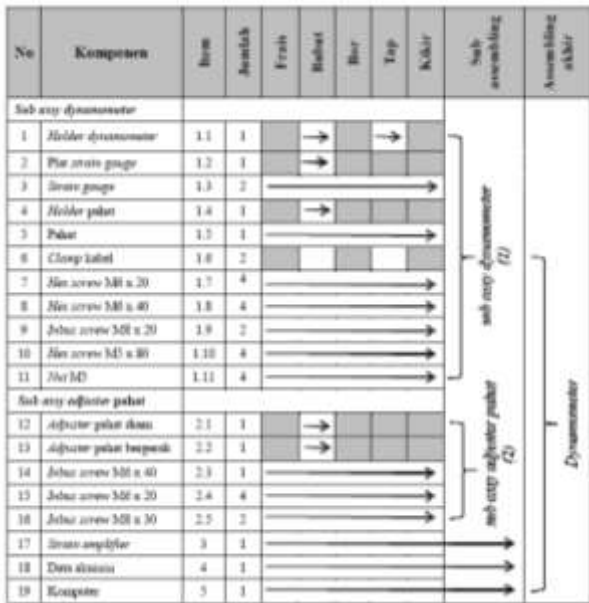
Hasil analisa kekuatan ditunjukkan pada gambar 9 berikut ini.



**Gambar 9.** Hasil simulasi kekuatan dynamometer.

Gambar 9 menunjukkan tentang tegangan yang terjadi saat pembebanan. Daerah paling kritis berwarna hijau dengan tegangan sebesar  $6,41 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>. Sedangkan *yield strength* untuk material *dynamometer* Aluminium alloy 6061 sebesar  $9,5 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>. Sehingga *dynamometer* masih mengalami deformasi elastis karena tegangan yang terjadi lebih kecil dari *yield strength*.

Selanjutnya disusun gambar detail konsep *dynamometer* terpilih untuk dilakukan proses pembuatan pada *workshop*. Sebagai panduan proses pembuatan disusunlah *flow of process* pembuatan dynamometer seperti disajikan pada gambar 10 sebagai berikut ini.



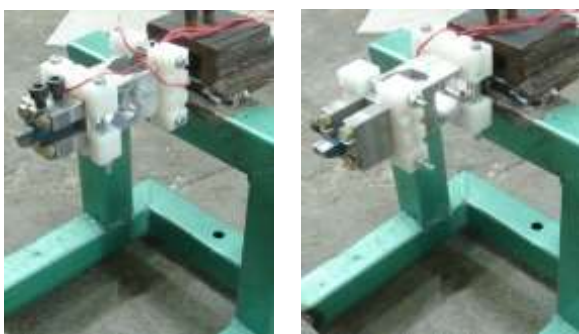
**Gambar 10.** Flow of Process pembuatan dynamometer.

Sistem konfigurasi data akuisisi dynamometer menggunakan rangkaian jembatan wheatstone quarte bridge, strain amplifier, dan ADC Advantech USB-4716. Software untuk pembacaan data menggunakan PCLS-Adamview 32.

**Hasil dan Pembahasan**

**PROSES KALIBRASI**

Proses kalibrasi dynamometer menggunakan alat bantu berupa jig agar dynamometer bisa dikalibrasi arah tangensial dan arah aksial seperti terlihat di gambar 11



(a) (b)

**Gambar 11** (a). Kalibrasi gaya tangensial, (b). Kalibrasi gaya aksial.

Proses pembebanan dilakukan dengan memberi beban pada ujung dynamometer dengan beban bertambah dari 0-50 kg dan beban berkurang dari 50-0 kg. Masing-masing pembebanan diulang sebanyak 5 kali. Sehingga bisa diketahui linearity error, histerisis dan repeatability error.

Linearity Error adalah penyimpangan maksimal pada kurva kalibrasi terhadap garis lurus yang menghubungkan output tanpa beban dan output beban maksimal dari dynamometer. Hasil kalibrasi liniarity error disajikan pada tabel 2 dan 3 berikut ini.

**Tabel 2.** Linearity error gaya tangensial

x	y = 2.076 X + 171.3	V rata-rata	penyimpangan
0	171.3	170.8	0.5
5	181.68	182.2	0.52
10	192.06	192.2	0.14
15	202.44	203	0.56
20	212.82	212.6	0.22
25	223.2	223.8	0.6
30	233.58	233.4	0.18
35	243.96	243.8	0.16
40	254.34	253.6	0.74
45	264.72	265	0.28
50	275.1	275.6	0.5

Berdasarkan tabel 2 tersebut dapat diperoleh linearity error untuk gaya tangensial dengan penyimpangan maksimal sebesar 0,74 milivolt.

**Tabel 3.** Linearity error gaya aksial

x	y = 2.055 X + 623.3	V rata-rata	penyimpangan
0	623.3	622	1.3
5	633.575	634.4	0.825
10	643.85	643.4	0.45
15	654.125	655.6	1.475
20	664.4	664.8	0.4
25	674.675	675.4	0.725
30	684.95	684	0.95
35	695.225	695.4	0.175
40	705.5	705.4	0.1
45	715.775	715.8	0.025
50	726.05	726	0.05

Berdasarkan tabel 3 tersebut dapat diperoleh linearity error untuk gaya aksial dengan penyimpangan maksimal sebesar 1,475 milivolt.

Dari proses kalibrasi di atas diperoleh Linearity error untuk gaya tangensial sebesar 0,71% dan gaya aksial sebesar 1,43%.

Histerisis adalah perbedaan antara dua pembacaan output dynamometer dengan beban yang sama. Pembacaan output pertama didapatkan dengan meningkatkan beban mulai dari beban nol sampai beban maksimal. Pembacaan output yang kedua didapatkan dengan mengurangi beban dari beban maksimal sampai beban nol. Hasil kalibrasi untuk histerisis disajikan pada tabel 4 dan 5 berikut ini.

**Tabel 4.** Histerisis gaya tangensial

Beban (kg)	Pembebanan bertambah (milivolt)	Pembebanan berkurang (milivolt)	Penyimpangan (milivolt)
0	172	173	1
5	184	185	1
10	194	195	1
15	205	205	0
20	215	217	2
25	225	227	2
30	235	236	1
35	245	247	2
40	255	257	2
45	267	267	0
50	277	278	1

**Tabel 5.** Histerisis gaya aksial

Beban (kg)	Pembebanan bertambah (milivolt)	Pembebanan berkurang (milivolt)	Penyimpangan (milivolt)
0	172	173	1
5	184	185	1
10	194	195	1
15	205	205	0
20	215	217	2
25	225	227	2
30	235	236	1
35	245	247	2
40	255	257	2
45	267	267	0
50	277	278	1

Berdasarkan tabel 4 dan 5 di atas diperoleh Histerisis untuk pengukuran gaya tangensial sebesar 1,92% dan gaya aksial sebesar 2,91%.

*Repeatability error* adalah kemampuan alat ukur untuk menampilkan *output* yang sama jika digunakan untuk pengukuran yang dilakukan secara berulang-ulang. Hasil kalibrasi *dynamometer* untuk *repeatability error* disajikan pada tabel 6 dan 7 di bawah ini.

**Tabel 6.** *Repeatability error* gaya tangensial

Beban (kg)	V maksimal (milivolt)	V minimal (milivolt)	Penyimpangan (milivolt)
0	172	170	2
5	184	180	4
10	194	190	4
15	205	201	4
20	215	211	4
25	225	222	3
30	235	232	3
35	245	242	3
40	255	251	4
45	267	262	4
50	277	274	3

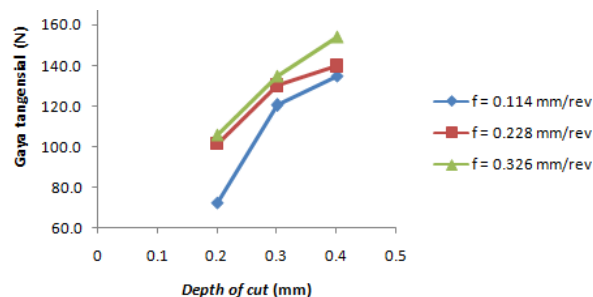
**Tabel 7.** *Repeatability error* gaya aksial

beban (kg)	V maksimal (milivolt)	V minimal (milivolt)	penyimpangan (milivolt)
0	624	621	3
5	636	633	3
10	645	642	3
15	657	654	3
20	667	663	4
25	678	674	4
30	685	683	2
35	697	694	3
40	707	704	3
45	718	715	3
50	728	724	4

Berdasarkan tabel 6 dan 7 di atas diperoleh *Repeatability error* untuk gaya tangensial sebesar 3,85% dan gaya aksial sebesar 3,96%.

### PENGUJIAN DYNAMOMETER

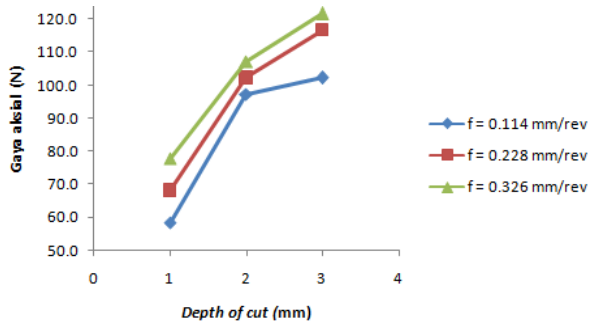
Pengujian *dynamometer* dilakukan pada mesin bubut menggunakan material EMS 45 dengan ukuran Ø20 mm x 100 mm dan pahat carbide ISO 6. Parameter permesinan yang digunakan dengan putaran 460 rpm, *feeding* 0,114 ; 0,228 ; 0,326 mm/putaran dan *depth of cut* 0,2 ; 0,3 ; 0,4 mm.



**Gambar 12.** Pengujian gaya tangensial

Berdasarkan perhitungan gaya tangensial  $F_c = K_c \times f \times a$ , besarnya gaya tangensial dipengaruhi oleh *depth of cut* (*a*), *feeding* (*f*) dan gaya potong spesifik (*K<sub>c</sub>*). Besarnya *feeding* dan *depth of cut* berbanding lurus dengan gaya potong. Semakin besar *feeding* dan *depth of cut*, maka gaya potong juga semakin besar. Pada gambar 12 terlihat bahwa, apabila *depth of cut* semakin besar, maka gaya potong juga semakin besar. apabila *feeding* semakin besar, maka gaya potong juga semakin besar. sehingga hasil pengujian

menunjukkan bahwa *dynamometer* berfungsi dengan baik untuk pengukuran gaya potong arah tangensial.



**Gambar 13.** Pengujian gaya aksial

Pada gambar 13 untuk pengukuran gaya potong arah aksial terlihat bahwa, apabila *depth of cut* semakin besar, maka gaya potong juga semakin besar. apabila *feeding* semakin besar, maka gaya potong juga semakin besar. Sehingga hasil pengujian menunjukkan bahwa *dynamometer* berfungsi dengan baik untuk pengukuran gaya potong arah tangensial.

## KESIMPULAN

Berdasarkan proses rancang bangun *dynamometer* ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. *Dynamometer* mampu mengukur gaya tangensial dan aksial di mesin bubut secara bersamaan.
2. Spesifikasi *dynamometer* :
  - Dimensi : 190 x 60 x 60 mm.
  - Menggunakan sensor *strain gauge* 120 ohm.
  - Gaya potong maksimal 500 N.
3. Hasil kalibrasi *dynamometer* :
  - *Linearity error* untuk gaya tangensial sebesar 0,71 % dan gaya aksial sebesar 1,43 %.
  - Histerisis untuk gaya tangensial sebesar 1,92 % dan gaya aksial sebesar 2,91 %.
  - *Repeatability error* untuk gaya tangensial sebesar 3,85 % dan gaya aksial sebesar 3,96 %.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baldoukas, A. K., Soukatzidis, F. A., Demosthenous, G. A., and Lontos, A. E., 2008, *Experimental investigation of the effect of cutting depth, tool rake angle and workpiece material type on the main cutting force during a turning process*, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering.
- Chiles, V., Lissaman, A. J., and Martin, S. J., 1996, *Principles of Engineering Manufacture*,

Butterworth-Heinemann, Oxford.

Dieter, G. E., 1991. *Engineering Design: a materials and processing approach*, McGraw-Hill, Singapore.

Indian Institute of Technology Kharagpur, India, 2011, *dynamometer for measuring cutting force*.

International Towing Tank Conference, 2002, *Sample Work Instructions Calibration of Load Cells*.

Korkut, I., and Boy, M., 2008, *Experimental Examination of Main Cutting Force and Surface Roughness Depending on Cutting Parameters*, Journal of Mechanical Engineering 54, hal. 531 – 328

Kyowa Electronic Instrument Co. Ltd. Tokyo, 2012, *What's a strain gage*.

Pal, B., Kumar, A., Madan, S., Ahmad, S., and Govil, A. K., 2010, *Establishment of Traceability for Strain Measuring Data Acquisition System in Terms of Voltage*, Journal of metrology society of India, Volume 25 No. 2

Purwanto, D., *Rancang Bangun Load Cell Sebagai Sensor Gaya Pada Sistem Uji*, Peneliti Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur – BPPT

Rao, J. N. M., Reddy, A. C. K., and Rao, P. V. R., 2010, *Design and fabrication of new type of dynamometer to measure radial component of cutting force and experimental investigation of optimum burnishing force in roller burnishing process*, Indian Journal of Science and Technology, Volume 3 No. 7

Ulrich, K. T., and Eppinger, S. D., 2001, *Perancangan dan Pengembangan Produk*, Salemba Teknika, Jakarta.

Yaldız, S., and Ünşar, F., 2006, *A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning*, Journal of Measurement, Volume 39