

RANCANG BANGUN *DYNAMOMETER* UNTUK PENGUKURAN GAYA POTONG MESIN BUBUT

Gandung Sam P.¹, Didik Djoko S.², Zainal Arifin²

¹Program Sarjana Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

²Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

Cutting force
Dynamometer
Strain gauge
Calibration

Abstract :

The aim of this project is to develop dynamometer for cutting force measurement in turning process. The dynamometer measured tangential and radial force using strain gauge sensor.

The step of dynamometer development consist of design, manufacturing and calibration process. Design process was started from identified customer need, arranged design requirement and objective, arranged design concept and appointed the best concept. The best concept was drafted detailly and was analyzed its stress. After design process complete, electrical and mechanical device of dynamometer was made. After that, the dynamometer was assembled for calibration process.

Calibration process consist of linearity error, hysteresis and repeatability error. 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. Repeatability error for tangential and radial force was 3,85% and 3,96% respectively. Dynamometer dimension was 190 mm x 60 mm x 60 mm. The dynamometer can measure maximum force of 500 N for tangential and axial force.

PENDAHULUAN

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

Pengetahuan mengenai pengaruh parameter pemotongan terhadap gaya potong dapat digunakan untuk mengetahui tentang mekanisme pemotongan diantaranya *machinability* dari material, bentuk *chip* yang terjadi, gesekan dan panas dari alat potong. Selain itu, gaya potong merupakan pengukuran yang bisa digunakan untuk mengoptimalkan proses permesinan di mesin bubut (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 dinamakan *dynamometer*. *Dynamometer* dipasangkan pada pahat potong, sehingga ketika proses pembubutan berlangsung, pahat yang memotong benda kerja akan menimbulkan regangan dari sensor pada

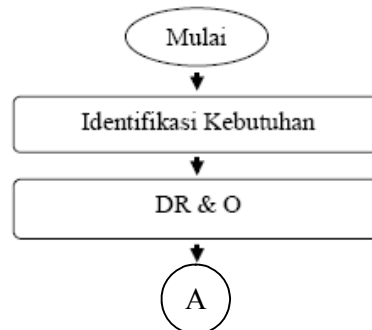
dynamometer. Regangan dari sensor pada *dynamometer* akan dibaca oleh komputer melalui sistem akuisisi data. Sehingga gaya potong pada proses permesinan bisa diketahui besarnya (IIT Karagpur, 2004).

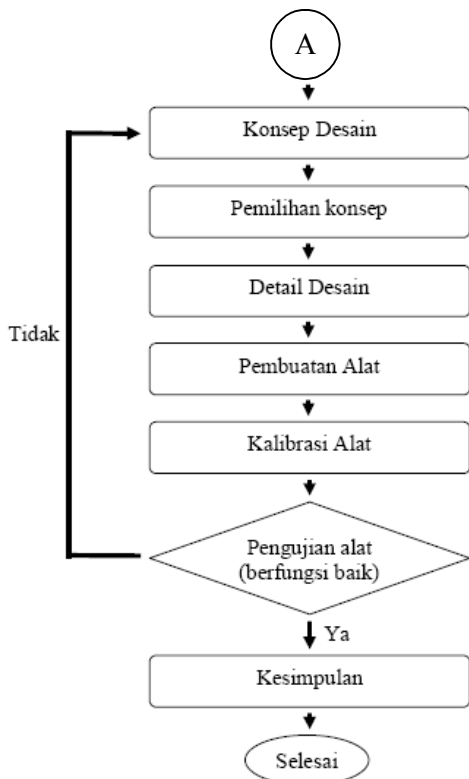
Harga *dynamometer* buatan pabrik cukup mahal. Salah satu *universal dynamometer piezoelektrik* buatan pabrik yang ada di pasaran merk Kistler, harganya mencapai 616 juta rupiah (PT Taharica, 2012). *Universal dynamometer piezoelektrik* ini bisa mengukur 3 arah gaya yang bisa digunakan untuk pengukuran gaya potong di mesin milling, mesin bubut, mesin bor maupun mesin gerinda.

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

DIAGRAM ALIR

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





Gambar 1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir *dynamometer*

IDENTIFIKASI KEBUTUHAN

Dalam perancangan *dynamometer* ini ada kebutuhan konsumen yang harus dipenuhi diantaranya adalah :

1. *Dynamometer* mampu membaca gaya potong arah tangensial dan aksial secara bersamaan.
2. Hasil pengukuran bisa ditampilkan di komputer.
3. Center pahat bisa diatur naik turun.
4. Bisa dipasang pahat *carbide* maupun pahat HSS.
5. Konstruksi *dynamometer* kuat.
6. Mudah dirakit.
7. Hasil pengukuran di komputer berupa gaya.
8. Harga pembuatan terjangkau.

Setelah menyusun identifikasi kebutuhan, kemudian menyusun *design requirement and*

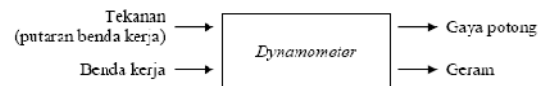
objectives (DR&O) yang menjabarkan kebutuhan konsumen menjadi spesifikasi produk yang lebih detail. Berikut adalah *DR&O dynamometer* :

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 kendur 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

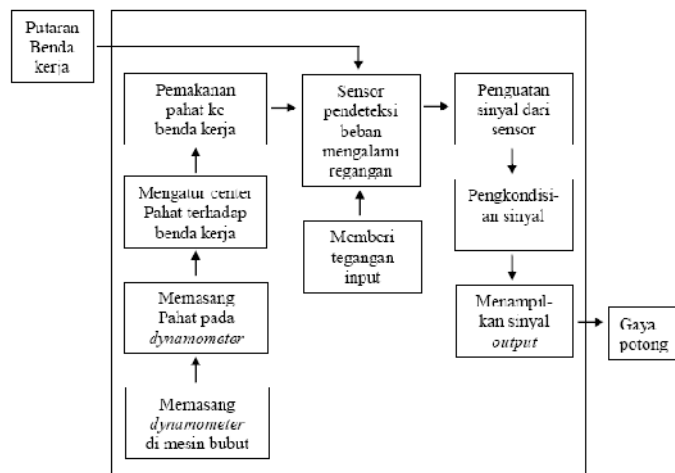
Pemecahan masalah konsep desain yang kompleks membutuhkan pembagian masalah tersebut yang menjadi sub-masalah yang lebih sederhana. Pemecahan dilakukan dengan membuat kotak hitam (*black box*).

Secara umum, *black box* terdiri dari tiga unsur yaitu aliran bahan, energi dan sinyal. Pada perancangan *dynamometer*, *black box* terdapat aliran energi yaitu perubahan dari tekanan karena putaran benda kerja menjadi gaya potong. Aliran bahan *dynamometer* dari benda kerja yang dibubut menjadi geram (*chip*) seperti dijelaskan gambar 2.



Gambar 2. *Black box dynamometer*

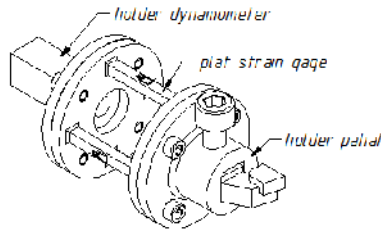
Langkah berikutnya yaitu membuat *black box* menjadi sub fungsi yang lebih spesifik seperti dijelaskan di gambar 3.



Gambar 3. Sub fungsi *dynamometer*

Setelah sub fungsi *dynamometer* selesai, maka dilanjutkan dengan membuat matrik morfologi. Dengan matrik morfologi, akan didapatkan beberapa konsep desain dari *dynamometer* yaitu :

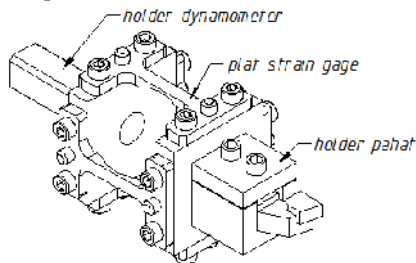
Konsep 1 :



Gambar 4. Konsep 1 *dynamometer*

Pada konsep 1, sensor *strain gauge* dipasang pada batang yang dilas sehingga tidak bisa dibongkar pasang.

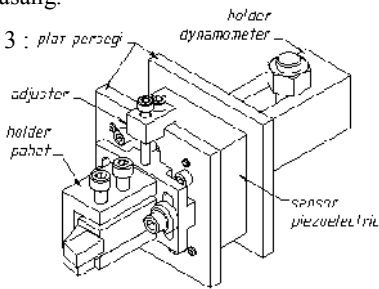
Konsep 2 :



Gambar 5. Konsep 2 *dynamometer*

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

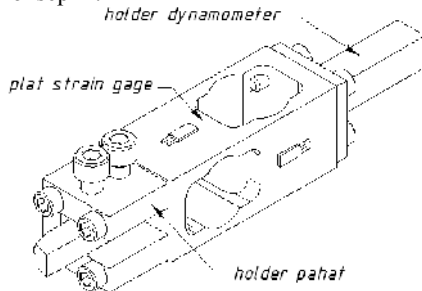
Konsep 3 :



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 gauge* diletakkan pada batang aluminium dengan letak yang berbeda sehingga bisa lebih sensitif.

PEMILIHAN KONSEP

Metode pemilihan konsep desain *dynamometer* ini menggunakan metode perbandingan relatif sehingga menghasilkan tiga penilaian yaitu lebih baik (+), sama baik (S) atau lebih buruk (-). Seperti dijelaskan pada tabel 1.

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 <i>carbide</i> dan HSS	4		S	S	S
5	Konstruksi <i>dynamometer</i> 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 :

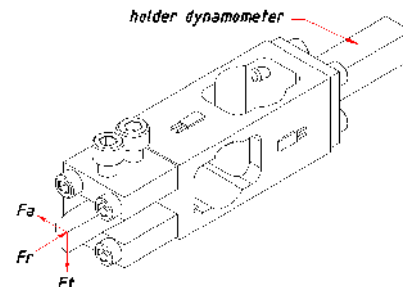
- 0 : tidak penting - 3 : penting
- 1 : kurang penting - 4 : sangat penting
- 2 : cukup penting

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

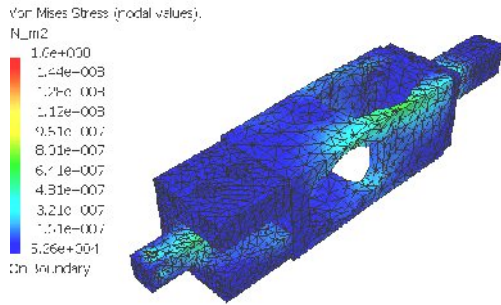
ANALISA TEGANGAN KONSEP TERPILIH

Setelah dipilih konsep terbaik, maka selanjutnya menghitung kekuatan dari *dynamometer* menggunakan *software* catia V5R14. Gambar 8 menjelaskan tentang parameter yang dimasukkan yaitu :

1. Beban terletak di ujung pahat yaitu arah tangensial (F_t) 625 N, arah aksial (F_a) 625 N dan arah radial (F_r) 625 N. Beban 625 N berdasarkan pada beban maksimal *dynamometer* sebesar 500 N dikali dengan angka keamanan 1,25.
2. *Holder dynamometer* digunakan sebagai tumpuan *dynamometer*.



Gambar 8. Ilustrasi pembebanan



Gambar 9. Hasil simulasi Catia V5R14

Gambar 9 menjelaskan tentang tegangan yang terjadi saat pembebanan. Daerah paling kritis

berwarna hijau dengan tegangan sebesar $7,48 \times 10^7$ N/m². Sedangkan *yield strength* untuk material *dynamometer* Aluminium alloy 6061 sebesar $9,5 \times 10^7$ N/m². Sehingga *dynamometer* masih mengalami deformasi elastis karena tegangan yang terjadi lebih kecil dari *yield strength*.

PEMBUATAN KOMPONEN MEKA-NIK DYNAMOMETER

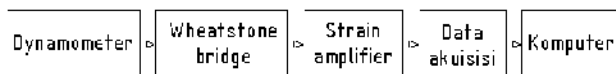
Pembuatan komponen mekanik dijelaskan dalam *flow of process* dari *dynamometer* seperti tabel 2.

Tabel 2. *Flow of process dynamometer*

No	Komponen	Item	Jumlah	Frais	Bubut	Bor	Tap	Kikir	Sub assembling	Assembling akhir		
<i>Sub assy dynamometer</i>												
1	Holder dynamometer	1.1	1		→			→	sub assy dynamometer (1)	Dynamometer		
2	Plat strain gauge	1.2	1		→							
3	Strain gauge	1.3	2	→								
4	Holder pahat	1.4	1		→							
5	Pahat	1.5	1	→								
6	Clamp kabel	1.6	2									
7	Hex screw M6 x 20	1.7	4	→								
8	Hex screw M6 x 40	1.8	4	→								
9	Inbus screw M8 x 20	1.9	2	→								
10	Hex screw M5 x 80	1.10	4	→								
11	Nut M5	1.11	4	→								
<i>Sub assy adjuster pahat</i>												
12	Adjuster pahat diam	2.1	1		→				sub assy adjuster pahat (2)			
13	Adjuster pahat bergerak	2.2	1		→							
14	Inbus screw M6 x 40	2.3	1	→								
15	Inbus screw M6 x 20	2.4	4	→								
16	Inbus screw M8 x 30	2.5	2	→								
17	Strain amplifier	3	1	→								
18	Data akuisisi	4	1	→								
19	Komputer	5	1	→								

PEMBUATAN KOMPONEN ELEK-TRIK DYNAMOMETER

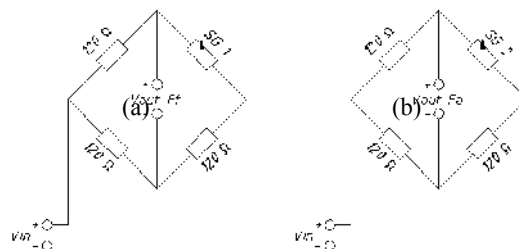
Dynamometer membutuhkan beberapa rangkaian elektrik agar gaya potong yang dihasilkan saat proses pembubutan bisa ditampilkan di komputer. Rangkaian elektrik *dynamometer* dijelaskan pada gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian elektrik *dynamometer*

WHEATSTONE BRIDGE

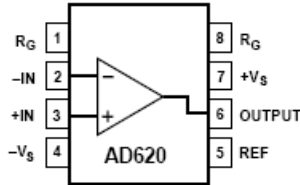
Rangkaian *wheatstone bridge* untuk *dynamometer* menggunakan rangkaian *quarter bridge* seperti dijelaskan pada gambar 11.



Gambar 11 (a). *Wheatstone bridge* gaya tangensial (b). *Wheatstone bridge* gaya aksial

STRAIN AMPLIFIER

Voltase yang keluar dari *wheatstone bridge* memiliki nilai hanya sekitar 2-5 milivolt. Sehingga perlu dikuatkan dengan *strain amplifier* agar perubahan voltasenya bisa terbaca di komputer. IC yang digunakan adalah AD620 dengan kemampuan penguatan sampai 1000 kali seperti terlihat di gambar 12.



Gambar 12. IC AD620

AKUISISI DATA

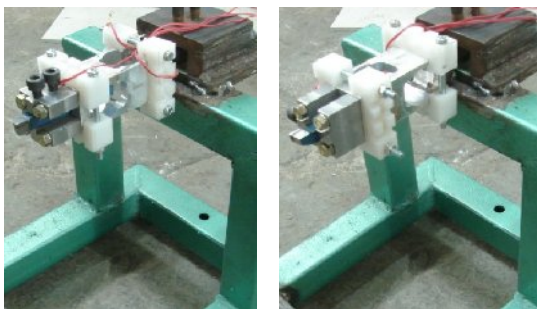
Output voltase yang keluar dari *strain amplifier* merupakan sinyal analog. Agar *output* tegangan bisa ditampilkan di komputer, dibutuhkan akuisisi data untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital. *Hardware* akuisisi data yang digunakan adalah Adventech USB-4716 seperti terlihat di gambar 13. Sedangkan *software* akuisisi data yang digunakan adalah PCLS-ADAMVIEW32.



Gambar 13. Data Akuisisi

PROSES KALIBRASI

Proses kalibrasi digunakan untuk mengkonversi dari voltase ke gaya. Selain itu, dengan kalibrasi bisa ditentukan *linearity error*, histerisis dan *repeatability error*. Proses kalibrasi *dynamometer* menggunakan alat bantu berupa jig agar *dynamometer* bisa dikalibrasi arah tangensial dan arah aksial seperti terlihat di gambar 14.



(a) (b)

Gambar 14 (a). Kalibrasi gaya tangensial, (b). Kalibrasi gaya aksial

Proses pembebanan dilakukan dengan memberi beban di ujung *dynamometer* dengan beban bertambah dari 0 - 50 kg dan beban berkurang dari 50 - 0 kg. Masing-masing diulang selama 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*.

Tabel 3. 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

Tabel 3 menjelaskan tentang linearity error untuk gaya tangensial dengan penyimpangan maksimal sebesar 0,74 milivolt.

Tabel 4. 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	675.1	0.425
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

Tabel 4 menjelaskan tentang linearity error untuk gaya aksial dengan penyimpangan maksimal sebesar 1,475 milivolt.

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.

Tabel 5. 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 menjelaskan tentang histerisis untuk gaya tangensial dengan penyimpangan maksimal sebesar 2 milivolt.

Tabel 6. Histerisis gava 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

Tabel 6 menjelaskan tentang histerisis untuk gaya aksial dengan penyimpangan maksimal sebesar 2 milivolt.

Histerisis untuk 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.

Tabel 7 menjelaskan tentang repeatability error untuk gaya tangensial dengan penyimpangan maksimal sebesar 4 milivolt.

Tabel 7. 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 8 menjelaskan tentang repeatability error untuk gaya aksial dengan penyimpangan maksimal sebesar 4 milivolt.

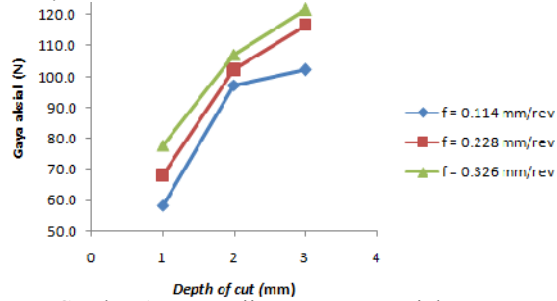
Tabel 8. Repeatability error gaya aksial

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

Repeatability error untuk gaya tangensial sebesar 3,85% dan gaya aksial sebesar 3,96%.

PENGUJIAN DYNAMOMETER

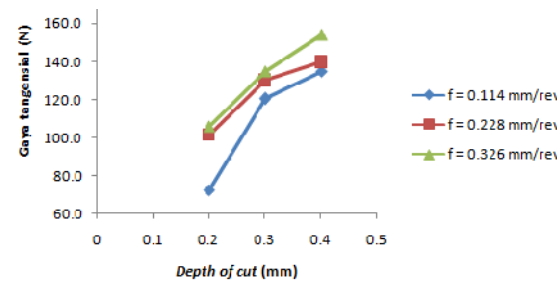
Pengujian dynamometer dilakukan di mesin bubut dengan menggunakan material EMS 45 dengan ukuran Ø20 mm x 100 mm dan pahat carbide ISO 6. Parameter permesinan yang digunakan dengan putaran 460 rpm, feeding 0,114 ; 0,228 ; 0,326 mm/putaran dan depth of cut 0,2 ; 0,3 ; 0,4 mm.



Gambar 15. 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_c). Besarnya feeding dan depth of cut berbanding lurus dengan gaya potong. Semakin besar feeding dan depth of cut, maka gaya potong juga semakin besar.

Gambar 15 menjelaskan 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.



Gambar 16. Pengujian gaya aksial

Gambar 16 menjelaskan tentang pengaruh variasi feeding dan depth of cut terhadap besarnya gaya aksial. Semakin besar feeding dan depth of cut, maka gaya aksial juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan rumus perhitungan gaya potong.

Berdasarkan gambar 15 dan gambar 16, besarnya gaya tangensial lebih besar daripada gaya aksial dengan parameter permesinan yang sama. Hal ini sesuai dengan teori yang ada yang menjelaskan bahwa besarnya gaya tangensial lebih besar daripada gaya aksial.

KESIMPULAN

Proses rancang bangun dynamometer ini didapatkan beberapa kesimpulan yaitu :

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 Teknik, Jakarta.

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