

Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Perangkat Kalibrasi *Load Cell* Enam Komponen

Sandro Mihradi, Andi Isra Mahyuddin, Tatacipta Dirgantara, dan Robby

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132
Telp: (022) 2504243, Fax: (022) 2534099
E-mail : sandro@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Pada penelitian sebelumnya telah dirancang *load cell* enam komponen yaitu *load cell* yang mampu mengukur tiga buah gaya (F_x , F_y dan F_z) dan tiga buah momen (M_x , M_y dan M_z). *Load cell* ini dirancang sebagai bagian dari sistem *force platform* untuk mengukur gaya reaksi tanah dari gerak berjalan manusia. Dengan asumsi massa tubuh yang akan diukur maksimum sebesar 100 kg, *load cell* dirancang untuk dapat menahan gaya lateral (F_x dan F_y) sebesar 200 N, gaya vertikal (F_z) sebesar 1000 N dan momen masing-masing $M_x = 150$ Nm, $M_y = 150$ Nm, serta $M_z = 30$ Nm. Untuk menjamin *load cell* yang dirancang dapat bekerja dengan baik, diperlukan pengujian serta kalibrasi yaitu dengan mensimulasikan tiga gaya serta tiga momen secara terukur pada *load cell* tersebut. Dalam proses kalibrasi, ketika satu komponen gaya/momen diberikan, perangkat kalibrasi yang dirancang harus mampu mengisolasi dari lima komponen gaya/momen lainnya. Pada penelitian ini dilakukan perancangan, pembuatan dan pengujian perangkat kalibrasi *load cell* enam komponen, dimana perangkat kalibrasi yang dirancang tersebut harus dapat memberikan gaya dan momen pada *load cell* dengan menggunakan mesin uji tarik Tensilon® RTF-1310. Untuk memberikan momen pada *load cell*, pada perangkat kalibrasi diterapkan mekanisme jungkat-jungkit, yaitu rangkaian batang yang terhubung dan disusun sedemikian rupa sehingga gaya vertikal yang diberikan oleh mesin uji tarik dapat dikonversi menjadi momen pada *load cell*. Perangkat kalibrasi dibuat menggunakan baja jenis DIN St37 dengan baut kelas 8,8 yang digunakan sebagai pin maupun pengencang. Perangkat kalibrasi yang dirancang mampu mengkonversi gaya vertikal dari mesin uji tarik menjadi enam komponen gaya/momen yang selanjutnya digunakan untuk proses kalibrasi *load cell*. Perangkat lunak Inventor® digunakan untuk mensimulasikan mekanisme pembebanan perangkat kalibrasi yang dirancang. Kesalahan terbesar keluaran momen hasil simulasi terhadap perhitungan analitik adalah 0,094 % dan kesalahan terbesar hasil simulasi berdasarkan ukuran aktual produk adalah 2,307%.

Keywords: *load cell* enam komponen, *force platform*, *gait analysis*, kalibrasi

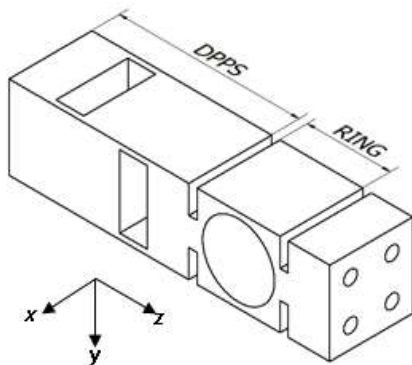
Pendahuluan

Salah satu instrumen yang sering digunakan dalam analisis gerak berjalan manusia adalah *force platform*. *Force platform* atau *force plate* adalah alat yang digunakan untuk mengukur gaya reaksi tanah ketika individu berjalan di atasnya. Bagian terpenting dari *force platform* adalah *load cell*. *Load cell* adalah sebuah *transducer* gaya yang bekerja berdasarkan prinsip deformasi sebuah material akibat adanya tegangan mekanik yang bekerja (Sutanto, 1999). *Load cell* banyak dimanfaatkan di berbagai bidang teknik mesin yang berkaitan dengan pengukuran gaya atau momen. Pada analisis gerak berjalan manusia, *load cell* beserta *force platform* digunakan untuk mengukur gaya reaksi tanah individu.

Penelitian mengenai *load cell* yang mampu mengukur gaya dalam tiga arah sudah dilakukan sebelumnya (S. Mihradi, 2011). Dalam penelitian selanjutnya, *load cell* tersebut kemudian disusun untuk membentuk suatu *force platform* yang terdiri atas pelat aluminum yang ditumpu oleh empat buah *load cell* pada keempat ujungnya. *Force platform* ini mampu mengukur gaya reaksi tanah dalam tiga arah, dan dengan mengolah data gaya-gaya yang diterima oleh keempat buah *load cell* tersebut, dapat pula dihitung momen dalam tiga arah (T. Dirgantara, 2012). Dalam perkembangannya, desain *load cell* yang lebih sederhana, namun mampu mengukur tiga gaya dan tiga momen secara langsung lebih diinginkan. Berbasis pada penelitian Joo et. al. (J. W. Joo, 2002), akhirnya dirancang *load cell* enam komponen yang mampu secara langsung mengukur tiga buah gaya (F_x , F_y dan F_z) dan tiga buah momen (M_x , M_y

dan M_z), yaitu dengan menempatkan tolok regangan (*strain gauge*) pada titik-titik yang telah ditentukan (S. Mihradi, 2013). *Load cell* yang dirancang terdiri atas *double plate-parallel structure (DPPS)* dan struktur cincin, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dengan asumsi massa tubuh yang akan diukur maksimum sebesar 100 kg, *load cell* dirancang untuk dapat menahan gaya lateral (F_x dan F_y) sebesar 200 N, gaya vertikal (F_z) sebesar 1000 N dan momen masing-masing $M_x = 150$ Nm, $M_y = 150$ Nm, serta $M_z = 30$ Nm.

Sebelum *load cell* dapat digunakan, diperlukan suatu proses kalibrasi agar *load cell* dapat mengukur gaya-gaya yang diberikan dengan akurat. Dalam proses kalibrasi ini *load cell* perlu dibebani dengan beberapa komponen gaya atau momen yang akan diukur. Mengingat *load cell* yang dirancang digunakan untuk mengukur tiga komponen gaya dan tiga komponen momen, maka dalam proses kalibrasi juga diperlukan pemberian enam komponen pembebanan pada *load cell* tersebut. Mengingat proses pembebanan dalam kalibrasi *load cell* dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik, maka diperlukan perancanganudukan dan perangkat kalibrasi yang dapat mengubah gaya vertikal mesin uji tarik menjadi gaya-gaya lateral dan momen yang bekerja pada *load cell*. Hal yang juga perlu diperhatikan bahwa dalam proses kalibrasi, yaitu ketika satu komponen gaya/momen diberikan, perangkat kalibrasi yang dirancang harus mampu mengisolasi dari lima komponen gaya/momen lainnya.



Gambar 1 *Load cell* enam komponen, terdiri atas struktur *DPPS* dan cincin (S. Mihradi, 2013)

Dalam penelitian ini akan dirancang dan dibuat sistemudukan dan perangkat kalibrasi *load cell* enam komponen yang dapat dipasang pada mesin uji tarik Tensilon® RTF-1310, yang dapat mengubah gaya vertikal mesin menjadi gaya

lateral, momen lentur, dan momen puntir yang digunakan pada proses kalibrasi *load cell*. Untuk menjamin keakuratan dan keamanan rancangan, perangkat lunak *Inventor*® digunakan untuk mensimulasikan mekanisme pembebanan perangkat kalibrasi yang dirancang.

Kriteria Perancangan

Must criteria

- Faktor keamanan semua komponen yang terlibat harus lebih besar daripada 2 pada pemberian beban maksimum;
- Dudukan harus mampu menumpu *load cell* pada pemberian gaya arah x, y, dan z, serta momen arah x, y, dan z;
- Perangkat kalibrasi harus mampu mengubah gaya vertikal dari mesin uji tarik menjadi momen arah tertentu;
- Saat pembebanan satu komponen gaya/momen dilakukan, dudukan dan perangkat kalibrasi yang dirancang harus dapat mengisolasi dari komponen gaya/momen lainnya.

Wish criteria

- Terbuat dari material yang mudah dijumpai di pasar;
- Bentuk komponen-komponen yang dibuat cukup sederhana sehingga mudah dalam proses pembuatannya.

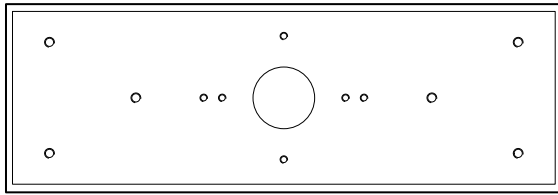
Rancangan Dudukan dan Perangkat Kalibrasi

Spesifikasi mesin uji tarik yang akan digunakan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi mesin uji tarik Tensilon®

Model	: RTF-1310
Kapasitas beban	: 10 kN
Sumber tegangan	: 100 V
Langkah	: 1100 mm
Tanggal MRF	: September 2012
Nomor seri	: R2800174

Alas mesin uji tarik memiliki beberapa lubang berdiameter 6 mm dan 8 mm, seperti ditunjukkan Gambar 2. Lubang-lubang ini yang akan dimanfaatkan sebagai sambungan dudukan dan perangkat pengujian momen.

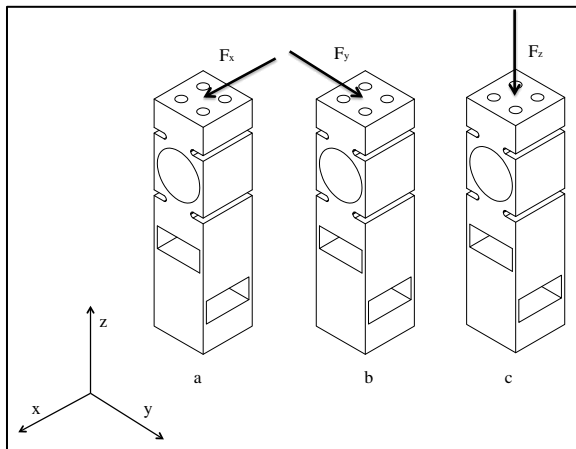


Gambar 2 Tampak atas alas mesin uji tarik

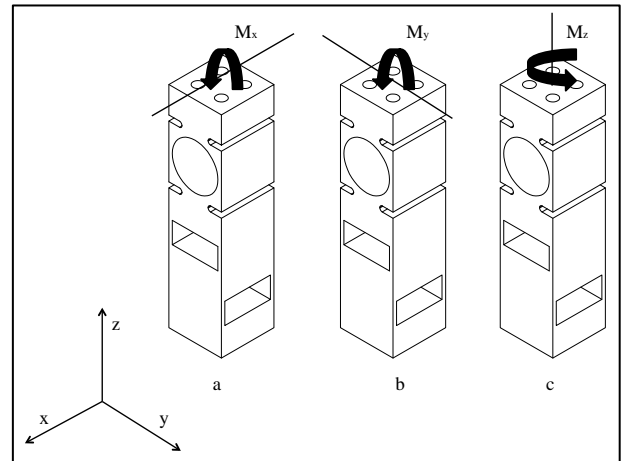
Material yang akan digunakan sebagai bahan dudukan dan perangkat kalibrasi adalah baja jenis DIN St37, yang memiliki kekuatan luluh 235 MPa, kekuatan tarik 370 MPa, dan modulus elastisitas 207 GPa, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Modulus elastisitas yang tinggi menjamin material cukup kaku, sehingga pada saat dilakukan pengujian, defleksi pada dudukan dan perangkat pengujian momen dapat ditekan sekecil mungkin.

Tabel 2 Sifat mekanik DIN St37 (Aydin Boru, 2013)

Density, ρ	7,85	gr/cc
Modulus of Elasticity, E	207	GPa
Poisson's Ratio, ν	0,3	
Yield Tensile Strength, S_y	235	MPa
Ultimate Tensile Strength, S_u	370	MPa



Gambar 3 Indikator pemberian gaya lateral arah x (a), arah y (b), dan gaya vertikal arah z (c)

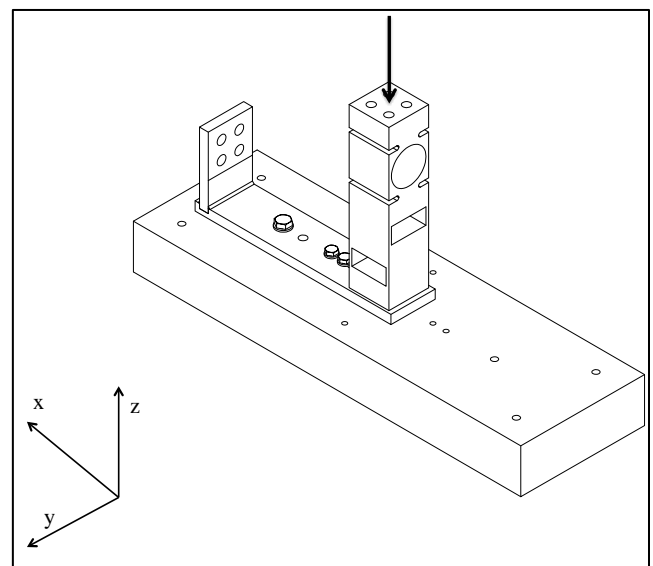


Gambar 4 Indikator pemberian momen lentur arah x (a), arah y (b), dan momen puntir arah z (c)

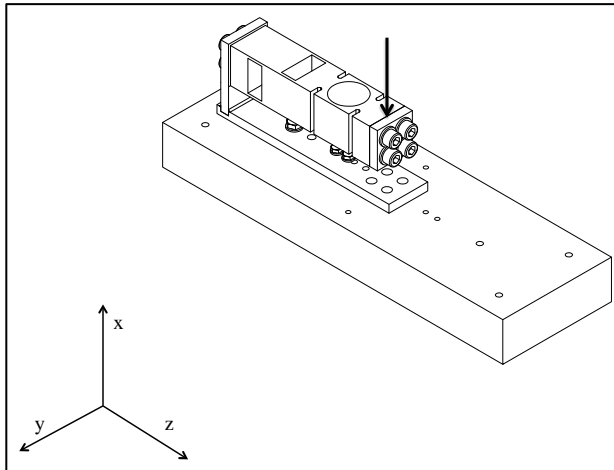
Dalam sebuah sistem *force platform*, gaya dan momen akibat pijakan kaki akan diteruskan ke *load cell* melalui pelat yang dipasang pada bagian kepala *load cell*. Oleh karena itu, dalam proses kalibrasi, pembebanan akan diberikan pada permukaan atas dari *load cell* seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Untuk kemudahan dan konsistensi penggunaan koordinat, maka semua jenis pemberian beban, gaya dan momen, mengacu pada koordinat *load cell*.

Perancangan dudukan

Ide dasar dari perancangan dudukan, khususnya untuk memfasilitasi pemberian gaya lateral (arah x dan y), berasal dari penelitian sebelumnya (S. Mihradi, 2011) yaitu dudukan *load cell* yang berbentuk L. Gambar skematik pembebanan arah z, x dan y pada *load cell* yang telah terpasang pada dudukan dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7.

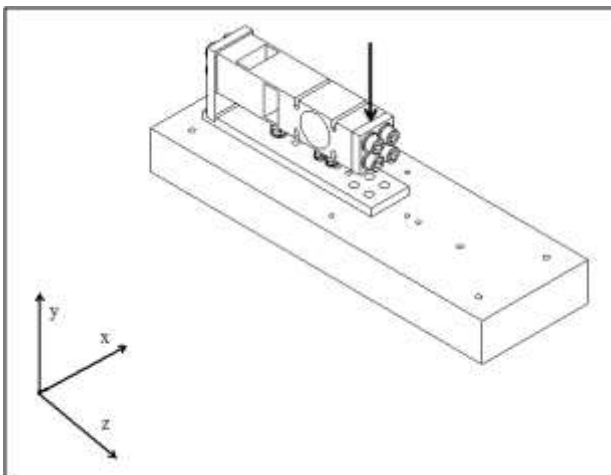


Gambar 5 Pembebanan gaya vertikal arah z



Gambar 6 Pembebanan gaya lateral arah x

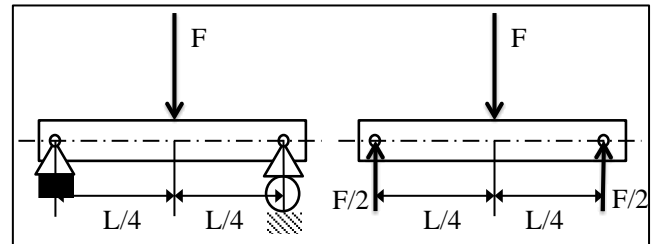
Pada pembebanan gaya arah lateral (arah x dan y), untuk mencegah terjadinya slip akibat titik tangkap gaya yang berada di tepiloading cell, maka pada kepala load cell dipasang cap berupa pelat berbentuk persegi empat seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



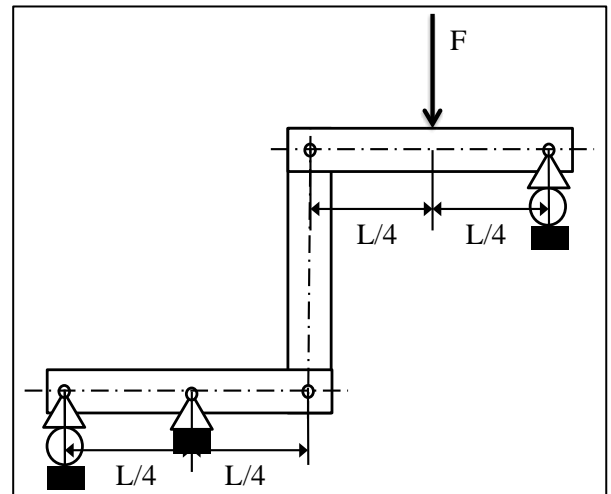
Gambar 7 Pembebanan gaya lateral arah y

Perancangan perangkat kalibrasi momen

Tantangan terbesar dari perancangan perangkat kalibrasi ini adalah bagaimana mengubah gaya vertikal yang diberikan oleh mesin uji tarik menjadi momen kopel. Kopel adalah momen yang dihasilkan akibat dua buah gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah. Misal gaya, F , diberikan dari mesin uji tarik ke arah bawah, maka melalui batang yang simetris, reaksi kedua ujung batang tersebut berupa $F/2$ ke arah yang sama, Gambar 8.

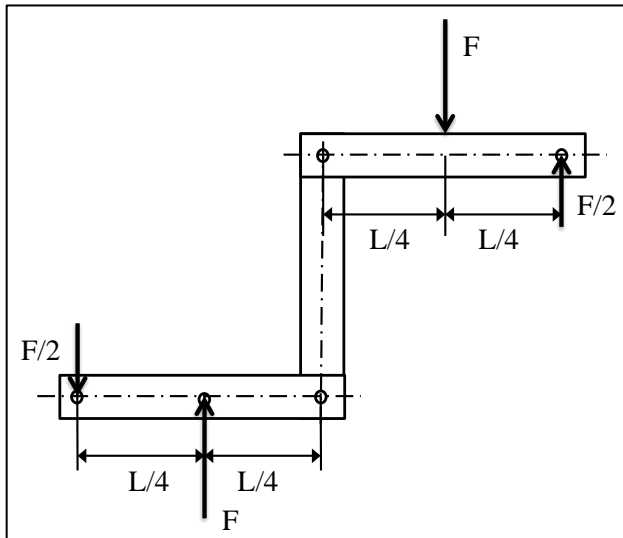


Gambar 8 Ilustrasi dan diagram benda bebas batang yang diberikan gaya F

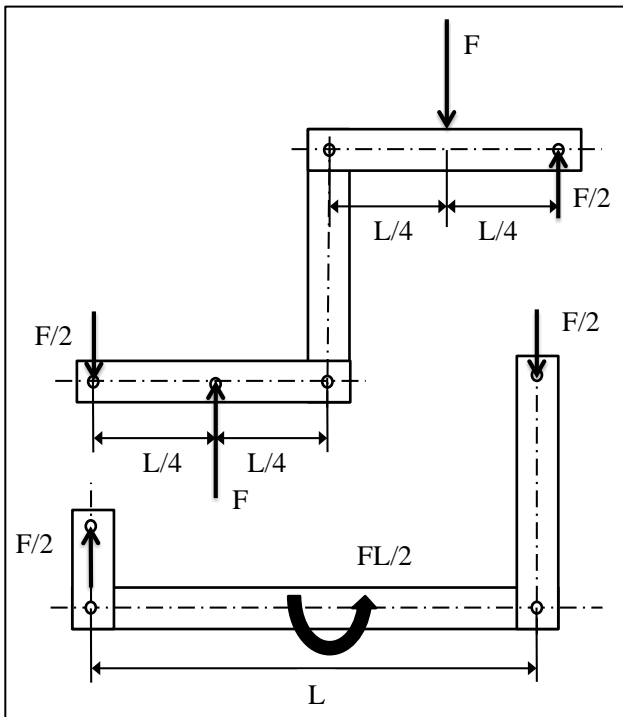


Gambar 9 Ilustrasi batang yang diberikan gaya F dengan mekanisme tambahan

Untuk mengubah gaya reaksi tumpuan $F/2$ ke arah sebaliknya maka diperlukan mekanisme tambahan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 9. Inspirasi dari mekanisme ini adalah permainan jungkat-jungkit. Jika suatu gaya diberikan pada satu sisi jungkat-jungkit, maka batang akan berotasi terhadap titik pusat rotasinya. Jika sisi yang tidak dibebani tersebut ditahan oleh suatu tumpuan rol atau pin, maka akan terjadi gaya reaksi $F/2$ yang arahnya berlawanan gaya aksi yang diberikan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 10. Melalui prinsip ini, batang-batang tambahan disediakan agar kopel dapat disalurkan pada batang horizontal (Gambar 11).

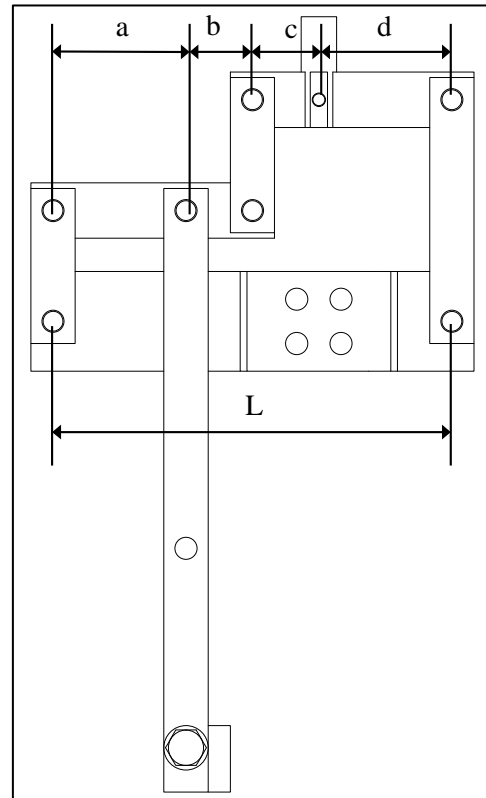


Gambar 10 Diagram benda bebas batang yang diberikan gaya F dengan mekanisme tambahan



Gambar 11 Diagram benda bebas pembentukan kopel dengan batang-batang tambahan

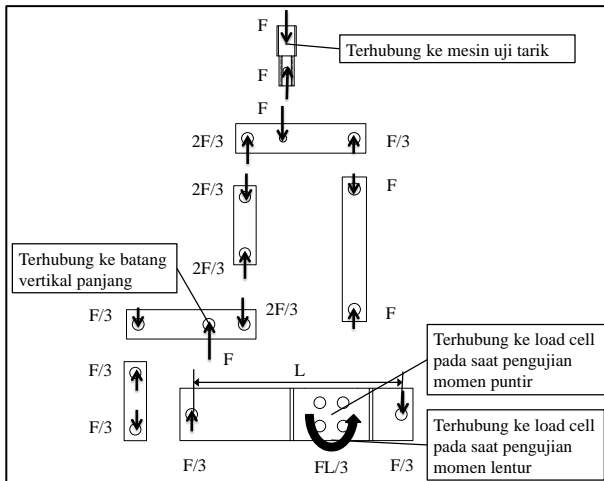
Pada batang horizontal inilah kepala *load cell* akan dipasang, sehingga momen kopel dapat tersalurkan ke *load cell*. Susunan batang-batang perangkat kalibrasi momen dan dimensinya ditunjukkan pada Gambar 12. Pada perancangan ini dipilih $a = d = 60$ mm, $c = d = 30$ mm, dan $L = 180$ mm. Konfigurasi ini akan menghasilkan momen kopel sebesar $FL/3$.



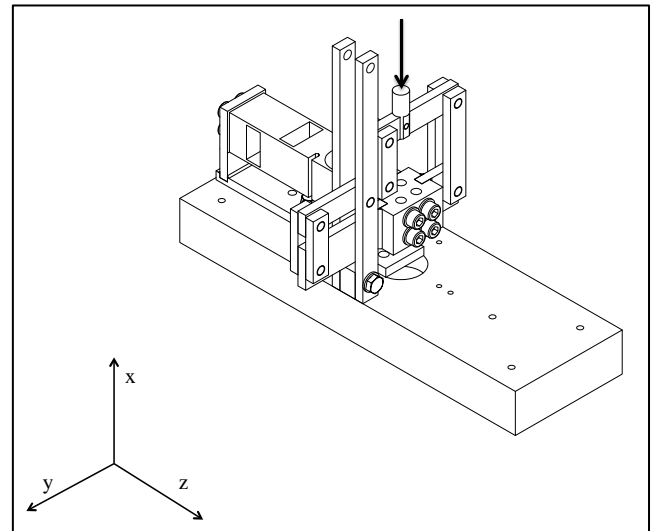
Gambar 12 Susunan batang-batang perangkat kalibrasi momen (dimensi utama)

Dengan panjang $L = 180$ mm, maka gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan momen lentur $M = 150$ Nm, adalah sebesar 2.500 N. Diagram benda bebas dari perangkat kalibrasi ini ditunjukkan pada Gambar 13. Pada akhirnya konfigurasi pembebanan momen lentur (M_x dan M_y) dan momen puntir (M_z) pada *load cell* yang telah terpasang pada perangkat kalibrasi momen ditunjukkan pada Gambar 14, 15, dan 16.

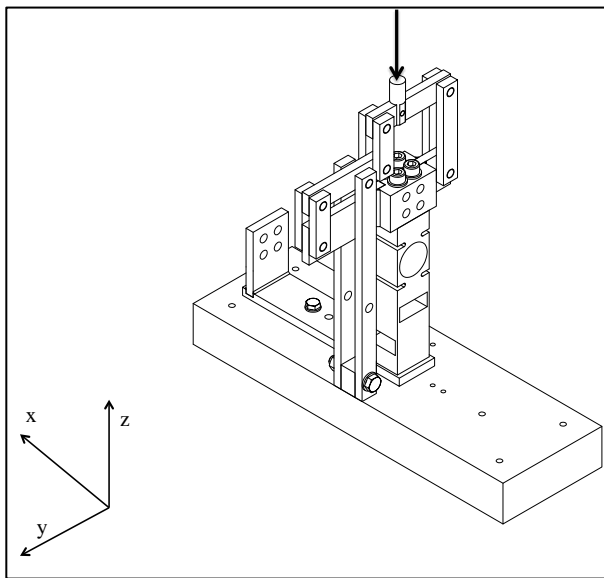
Setelah dimensi utama perangkat kalibrasi telah ditentukan, penentuan dimensi lainnya seperti ketebalan dan lebar batang kemudian dilakukan dengan mempertimbangkan diantaranya faktor keamanan, kemudahan produksi, dan faktor biaya. Karena adanya keterbatasan ruang, maka perhitungan ini tidak dimasukkan dalam tulisan ilmiah ini.



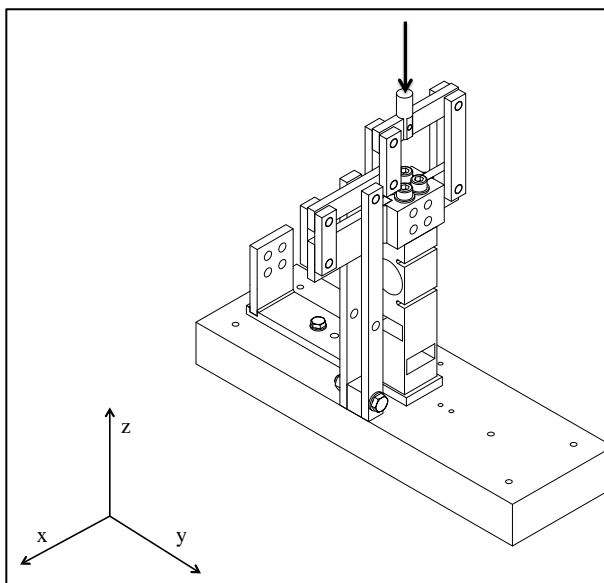
Gambar 13 Diagram benda bebas perangkat kalibrasi



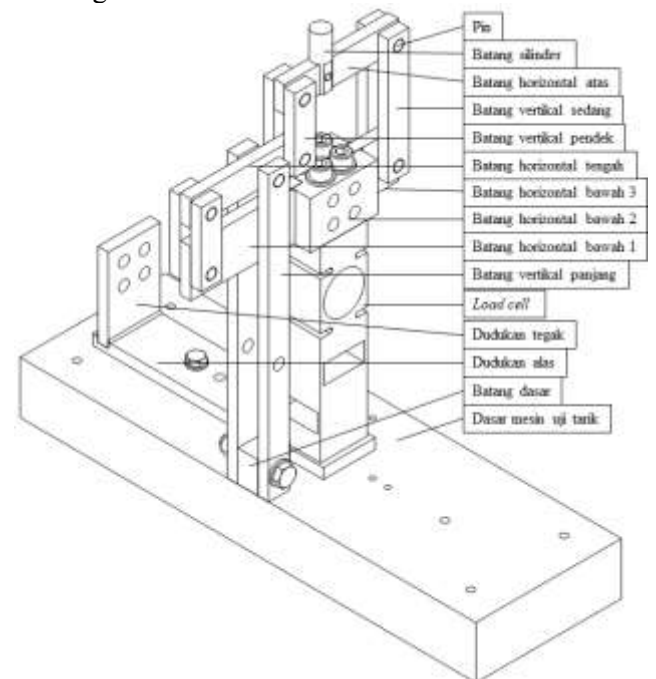
Gambar 16 Konfigurasi pembebanan M_z



Gambar 14 Konfigurasi pembebanan M_x



Gambar 15 Konfigurasi pembebanan M_y



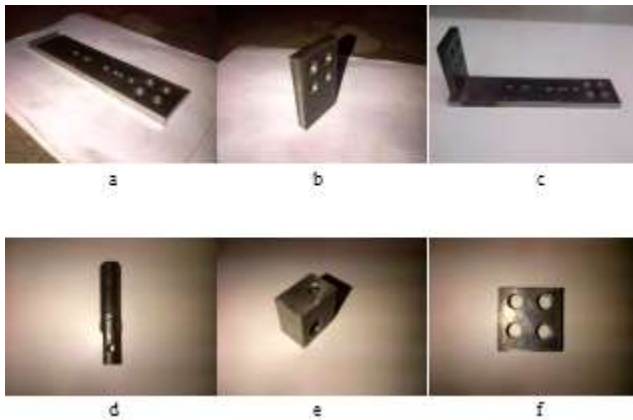
Gambar 17 Elemen-elemen penyusun dudukan dan perangkat kalibrasi beserta terminologinya.

Tabel 4.14 menunjukkan perbandingan dimensi utama rancangandengan produk aktual. Seperti terlihat pada tabel, kesalahan terkecil pada produk yaitu pada a sebesar 0,083 %, sedangkandimensi utama yang

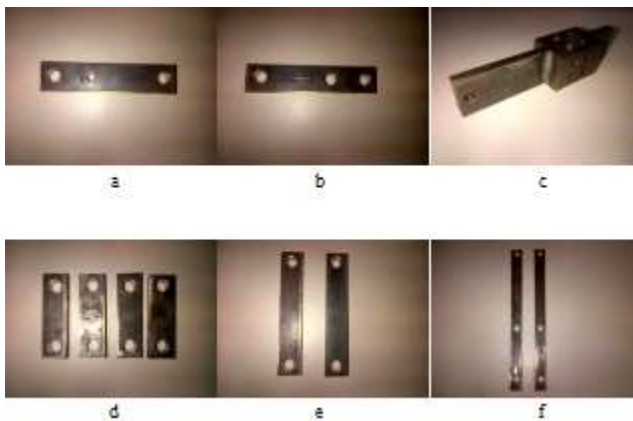
memiliki kesalahan terbesar adalah L, yaitu sebesar 1,653%. Perbedaan harga L tersebut kemungkinan besar disebabkan proses freis dan pengelasan batang horizontal bawah (Gambar 19.c) yang kurang sempurna.

Simulasi Pengujian Pembebanan

Perangkat lunak Autodesk Inventor® digunakan untuk mensimulasikan pemberian gaya dan momen pada perangkat kalibrasi dan mengukur reaksi yang ditimbulkannya.



Gambar 18 Elemen:udukan alas (a),udukan tegak (b),udukan (c),batang silinder (d),batang dasar (e), dan batang persegi pengaman saat pengujian gaya lateral (f)



Gambar 19 Elemen: batang horizontal atas (a), batang horizontal tengah (b), batang horizontal bawah (c), batang-batang vertikal pendek (d), batang-batang vertikal sedang (e), batang-batang vertikal panjang (f)

Untuk mengetahui berapa gaya atau momen yang diberikan pada *load cell*, dalam simulasi yang dilakukan, kepala *load cell* seolah-olah dijadikan sebagai tumpuan dari perangkat kalibrasi. Dengan demikian, reaksi tumpuan yang dihitung dalam simulasi ini merupakan gaya atau momen yang diberikan pada *load cell*.

Tabel 3 Perbandingan dimensi rancangan dan produk

	Rancangan	Produk	ϵ
a (mm)	60,00	59,95	0,08%
b (mm)	30,00	29,91	0,32%
c (mm)	30,00	30,08	0,25%
d (mm)	60,00	59,85	0,25%
L (mm)	180,00	177,03	1,65%

Secara umum, reaksi gaya pada kepala *load cell* akibat pemberian gaya vertikal dan lateral memberikan hasil yang sama dengan gaya yang diberikan. Hal ini terjadi karena gaya-gaya input tersebut langsung diberikan pada kepala *load cell*, hal yang tidak terjadi pada pengujian momen.

Untuk pengujian momen lentur (M_x dan M_y), masukan gaya vertikal yang diberikan oleh mesin uji tarik adalah 2.500 N, dengan harapan reaksi momen yang terjadi pada kepala *load cell* adalah 150.000 Nmm. Untuk momen punter (M_z), masukan yang diberikan adalah 500 N, dengan harapan keluaran yang terjadi adalah 30.000 Nmm.

Hasil dan Pembahasan

Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6 menunjukkan perbandingan perhitungan analitik, hasil simulasi dengan ukuran desain, dan hasil simulasi berdasarkan ukuran aktual produk. Kesalahan pada keluaran gaya dihitung terhadap masukan gaya sedangkan kesalahan pada keluaran momen dihitung terhadap keluaran momen yang diinginkan. Dari tabel-tabel tersebut terlihat bahwa saat pembebanan momen diberikan, perangkat kalibrasi berhasil mengisolasi *load cell* dari komponen gaya dan momen lainnya yang tidak diinginkan. Gaya atau momen lainnya yang tidak diinginkan besarnya sangat kecil dan tidak lebih besar dari 0,34%.

Tabel 7 menunjukkan rangkuman perbandingan keluaran momen, antara yang diinginkan dari rancangan, hasil simulasi dengan ukuran desain, dan hasil simulasi berdasarkan ukuran aktual produk. Kesalahan, ϵ , dihitung terhadap rancangan. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa berdasarkan simulasi yang dilakukan, perbedaan keluaran momen dengan yang diinginkan sangat kecil terjadi, yaitu kurang dari 0,13%. Sedangkan bila simulasi dilakukan berdasarkan ukuran aktual produk, kesalahan terbesar hanya sebesar 2,3%.

Tabel 4 Perbandingan keluaran perhitungan analitik, simulasi, dan produk saat pembebanan M_x

Keluaran	Masukan F = 2.500 N				
	Analitik	Simulasi	ϵ	Produk	ϵ
F_x (N)	0,0	-0,1	0,003%	-0,2	0,007%

Fy (N)	0,0	-1,5	0,060%	-0,1	0,005%
Fz (N)	0,0	2,4	0,094%	-4,4	0,174%
Mx (Nmm)	150000,000	149904,880	0,063%	147196,490	1,869%
My (Nmm)	0,000	41,885	0,028%	7,644	0,005%
Mz (Nmm)	0,000	1,356	0,001%	-2,613	0,002%

Tabel 5 Perbandingan keluaran perhitungan analitik dan simulasi saat pembebanan M_v

Keluaran	Masukan F = 2.500 N				
	Analitik	Simulasi	ϵ	Produk	ϵ
Fx (N)	0,0	-2,2	0,086%	1,1	0,042%
Fy (N)	0,0	0,2	0,008%	-0,1	0,003%
Fz (N)	0,0	3,4	0,137%	8,3	0,334%
Mx (Nmm)	0,000	57,504	0,038%	58,636	0,039%
My (Nmm)	150000,00	149858,49	0,094%	146539,09	2,307%
Mz (Nmm)	0	0	%	0	%
Mz (Nmm)	0,000	0,096	0,000%	-5,015	0,003%

Tabel 6 Perbandingan keluaran perhitungan analitik dan simulasi saat pembebanan M_z

Keluaran	Masukan F = 500 N				
	Analitik	Simulasi	ϵ	Produk	ϵ
Fx (N)	0,0	-0,4	0,072%	-0,5	0,095%
Fy (N)	0,0	0,0	0,007%	0,1	0,028%
Fz (N)	0,0	0,0	0,002%	0,0	0,002%
Mx (Nmm)	0,000	1,668	0,006%	4,426	0,015%
My (Nmm)	0,000	19,674	0,066%	33,383	0,111%
Mz (Nmm)	30000,000	30010,439	0,035%	30019,089	0,064%

Tabel 7 Rangkuman perbandingan keluaran momen

Keluaran	Rancangan	Simulasi	ϵ	Produk	ϵ
Mx (Nmm)	150000,00	149862,61	0,092%	147196,49	1,869%
My (Nmm)	150000,00	149810,82	0,126%	146539,09	2,307%
Mz (Nmm)	30000,000	30015,036	0,050%	30019,089	0,064%

Kesimpulan

Perancangan dan pembuatan perangkat kalibrasi *load cell* enam komponen telah berhasil dilakukan dalam penelitian ini. Perangkat kalibrasi dapat mengubah gaya vertikal mesin uji tarik menjadi gaya lateral, momen lentur, dan momen punter pada *load cell*. Perangkat kalibrasi juga terbukti dapat mengisolasi *load cell* dari komponen lainnya saat satu komponen gaya/momen diberikan. Dalam hal pembebanan momen, perangkat kalibrasi juga terbukti dapat memberikan momen lentur dan puntir kepada *load cell* sesuai dengan harga yang diinginkan dengan perbedaan terbesar 2,3%.

Referensi

A. R. Holowenko, *Dynamics of Machinery*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1995.

Aydin Boru, *Comparison Table (GOST 8731 - 8732 81 DIN 17121, 1629, 1630)*, Aydiun Group, Istanbul, 2013.

Christopher L. Vaughan, Brian L. Davis, dan Jeremy C. O'Connor, *Dynamics of Human Gait*, Edisi 2, Kiboho Publishers, Western Cape, 1999.

Duane Knudson, *Fundamentals of Biomechanics*, Edisi 2, Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2007.

Engineers Garage, *Load Cell*, (Online), (<http://www.engineersgarage.com/articles/load-cell>, diakses 1 September 2013).

H. Hatze, The meaning of the term: "Bio-mechanics.", *Journal of Biomechanics*, 7:189-190, 1974.

J. W. Joo, K.S. Na, dan D.I. Kang, Design and Evaluation of A Six-Component Load Cell, *Measurement*, 32:125-133, 2002.

John McLester dan Peter St. Pierre, *Applied Biomechanics: Concepts and Connections*, Thomson Wadsworth, California, 2008.

M. Hetényi, *Handbook of Experimental Stress Analysis*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1950.

M. P. Murray dan D. R. Gore, (1981), Gait of Patients with Hip Pain or Loss of Hip Joint Motion, Dalam J. Black dan J. H. Dumbleton (Editor), *Clinical Biomechanics: A Case History Approach*, Churchill Livingstone, New York, 1981.

Michael W. Whittle, *An Introduction to Gait Analysis*, Edisi 4, Elsevier Ltd., Philadelphia, 2007.

National Instruments, *Strain Gauge Measurement - A Tutorial*, National Instruments Corporation, 1998.

R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, Edisi 8, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2011.

Richard G. Budynas dan J. Keith Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Edisi 8, McGraw-Hill Company Inc., 2006.

Ronald L. Huston, *Principles of Biomechanics*, Taylor & Francis Group, LLC, Florida, 2009.

Roy B. Davis dan Kenton R. Kaufman, Kinetics of Normal Walking, Dalam Jessica Rose dan James G. Gamble (Editor), *Human Walking*, Edisi 3, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2006.

S. Mihradi, A. I. Mahyuddin, T. Dirgantara, A. W. Suwirya, Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Load Cell 3-Axis untuk Pengukuran Ground Reaction Force pada Force Platform, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X (SNTTM X)*, Malang, 2011, pp. 817 – 824.

S. Mihradi, T. Dirgantara, R. Pratama, A. I. Mahyuddin, Design of a Six-Component Load-Cell for Single Pedestal Force Platform to Measure GRF in Gait Analysis, *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bangkok, February, 2013.

Scale Manufacturers Association, *Load Cell Application and Test Guideline*, Scale Manufacturers Association, Ohio, 2010.

Sutanto, *Teknik Instrumentasi*, Universitas Indonesia Press, Jakarta, 1999.

T. Dirgantara, A.I. Mahyuddin, S. Mihradi, D.P. Kristianto, Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Force Plate untuk Pengukuran Ground Reaction Force pada Analisis Gerak Berjalan Manusia, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI)*, Yogyakarta, 2012, pp. 2195 – 2199.

Taufiq Rochim, *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Volume 2, Penerbit ITB, Bandung, 2006.

V. T. Inman, H. J. Ralston, dan F. Todd, *Human Walking*, Williams & Wilkins, Baltimore, 1981.

Vladimir Medved, *Measurement of Human Locomotion*, CRC Press LLC, Florida, 2001.

Wahyu Kuntjoro, *Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill Education, 2005.

William D. Callister, Jr., dan David G. Rethwisch. *Material Science and Engineering: An Introduction*. Edisi 7, John Wiley & Sons Inc., New York, 2007.