

Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Force Plate untuk Pengukuran Ground Reaction Force Pada Analisis Gerak Berjalan Manusia

Tatacipta Dirgantara, Andi I. Mahyuddin, Sandro Mihradi, Danniell P. Kristianto

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung 40132, Indonesia
tdirgantara@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Force plate adalah alat yang sering digunakan untuk mengukur gaya reaksi tanah (*ground reaction forces*) dalam analisis gait yang diperlukan di bidang rehabilitasi medik. Meskipun banyak force-plate komersial yang tersedia, harganya relatif masih belum terjangkau. Untuk itu, perlu dikembangkan sistem pengukuran dengan harga terjangkau serta keandalan tinggi. Penelitian ini menyajikan rancangan force-plate yang merupakan bagian dari pengembangan sistem analisis gerak berjalan manusia terintegrasi. Peneliti telah melakukan proses perancangan, manufaktur dan pengujian load cell 3-sumbu yang dapat mengukur gaya dalam arah vertikal, anterior-posterior, dan medial-lateral. Load-cell 3-sumbu yang dikembangkan tersebut digunakan sebagai basis perancangan force platform untuk mengukur gaya reaksi tanah yang terjadi saat gerak berjalan manusia. Makalah ini mengkaji berbagai alternatif rancangan load-cell 3-sumbu yang akan digunakan dengan menggunakan analisis elemen hingga, kemudian disimulasikan pembebanan aksial pada 3 arah sumbu yang berbeda, untuk memperoleh rancangan optimal yang lebih kompak. Alternatif rancangan force-plate menggunakan empat load-cell 3 sumbu desain terpilih dikaji untuk memperoleh desain optimum. Tahap selanjutnya adalah manufaturing load-cell dan force-plate serta rangka pengujian. Sebelum pengujian force-plate, dilakukan kalibrasi dan pengujian pembebanan masing-masing load-cell untuk memperoleh matriks kalibrasi. Matriks kalibrasi tiap load-cell diperlukan sebagai faktor kalibrasi force-plate. Pengujian pada force-plate kemudian dilakukan dengan memberikan beban aksial pada 3 sumbu berbeda mewakili beban vertikal, anterior dan medial. Hasil pengujian menunjukkan bahwa force-platform dapat mengukur gaya yang diberikan pada tiga sumbu dengan cukup akurat..

Keywords: Biomekanik, force platform, load cell, ground reaction force.

1. Pendahuluan

Gerak berjalan manusia telah menjadi salah satu fokus penelitian yang sering dilakukan pada beberapa dekade terakhir. Berbagai penelitian dilakukan untuk mengetahui bagaimana mekanisme gerak berjalan manusia [1-5]. Hasil penelitian tersebut kemudian dapat diaplikasikan pada teknologi pembuatan robot seperti manusia, teknologi animasi pada dunia perfilman, peningkatan performa atlet, dan pada diagnosis serta tindakan medis yang diberikan pada pasien yang mengalami kendala pada alat gerak nya. Tindakan medis diberikan pada pasien yang mengalami kendala pada alat gerak nya, berdasarkan pada hasil diagnosis dokter. Selama ini diagnosis dilakukan berdasarkan pengamatan kualitatif, sehingga diperlukanlah suatu metode untuk mendapatkan diagnosis berdasarkan data pengamatan kuantitatif.

Pada beberapa tahun terakhir penelitian tentang gerak berjalan manusia Indonesia telah dilakukan, baik

pengembangan sistem yang dapat menganalisis gerak berjalan manusia [6-8], maupun pengumpulan basis data gerak berjalan normal orang Indonesia [9].

Untuk melakukan validasi bahwa sistem yang dikembangkan dapat digunakan dengan ketelitian dan ketepatan yang baik, maka diperlukan alat yang dapat mengukur gaya reaksi tanah. Alat yang sering digunakan untuk mengukur gaya reaksi tanah (*ground reaction forces*) dalam analisis gait yang diperlukan di bidang rehabilitasi medik adalah force-plate.

Meskipun banyak force-plate komersial yang tersedia, namun harganya relatif masih belum terjangkau. Untuk itu, dalam penelitian ini dikembangkan sistem pengukuran dengan harga terjangkau serta keandalan tinggi. Proses perancangan, manufaktur dan pengujian load cell 3-sumbu yang dapat mengukur gaya dalam arah vertikal, anterior-posterior, dan medial-lateral telah dilakukan. Load-cell 3-sumbu yang dikembangkan tersebut digunakan sebagai basis perancangan force platform untuk mengukur gaya reaksi tanah yang terjadi saat gerak berjalan manusia.

Dalam makalah ini dikaji berbagai alternatif rancangan load-cell 3-sumbu yang akan digunakan dengan menggunakan analisis elemen hingga, kemudian disimulasikan pembebanan aksial pada 3 arah sumbu yang berbeda, untuk memperoleh rancangan optimal yang lebih kompak.

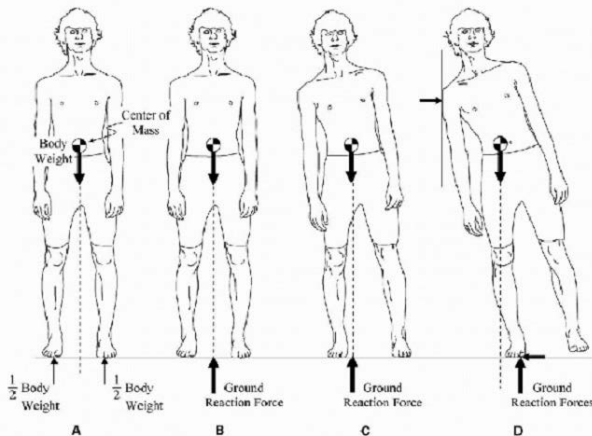
Alternatif rancangan force-plate menggunakan empat load-cell 3 sumbu desain terpilih dikaji untuk memperoleh desain optimum.

Tahap selanjutnya adalah manufaktur load-cell dan force-plate serta rangka pengujian. Sebelum pengujian force-plate, dilakukan kalibrasi dan pengujian pembebanan masing-masing load-cell untuk memperoleh matriks kalibrasi. Matriks kalibrasi tiap load-cell diperlukan sebagai faktor kalibrasi force-plate.

Pengujian pada force-plate kemudian dilakukan dengan memberikan beban aksial pada 3 sumbu berbeda mewakili beban vertikal, anterior dan medial.

2. Ground Reaction Force

Pada seseorang yang berdiri tegak simetrik (Gambar 1a), gaya berat akibat gravitasi pada tubuh orang tersebut, akan ditumpu sama rata oleh kedua kaki. Gaya yang terbagi sama rata ini, dapat direpresentasikan oleh suatu gaya tunggal yang disebut sebagai Ground Reaction Force (GRF). Pada posisi berdiri tegak simetrik, GRF ini besarnya akan sama dengan gaya berat dan lokasinya terletak di sekitar sumbu simetri dari kedua kaki yang menumpu ke tanah (Gambar 1b).

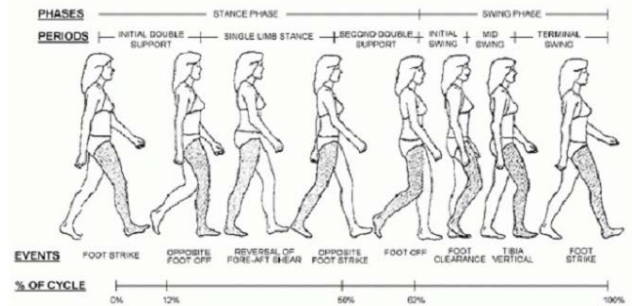


Gambar 1. Posisi GRF terhadap pusat massa manusia [10]

Ketika seseorang mencondongkan badannya ke satu sisi, misalnya ke arah kanan (Gambar 1c), akan timbul GRF akibat gaya berat badan orang tersebut, namun posisinya semakin bergeser menjauh dari sumbu simetri kedua kaki. Vektor GRF yang muncul tetap segaris dengan vektor gaya berat. Dapat dikatakan bahwa posisi GRF seseorang akan berubah sesuai dengan sikap badan orang tersebut.

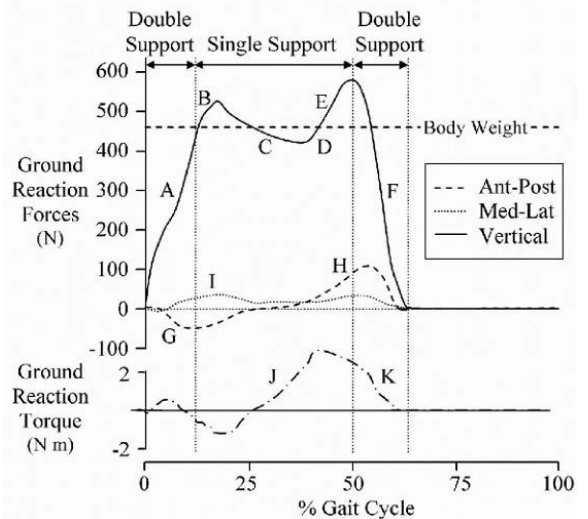
Hal yang berbeda terjadi ketika seseorang semakin mencondongkan badannya ke kanan dengan hanya

bertumpu pada satu kaki saja, seperti terlihat pada Gambar 1d. Vektor gaya berat dan vektor GRF menjadi tidak segaris yang dapat menyebabkan kondisi menjadi tidak setimbang. Agar setimbang kembali, diperlukan gaya dalam arah horizontal yang mampu mengatasi momen yang ditimbulkan oleh gaya berat dan GRF. Gaya dalam arah horizontal ini bisa didapatkan dengan memberikan tambahan tumpuan di bahu kanan. Adanya tambahan tumpuan ini menyebabkan adanya GRF dalam arah horizontal yang menyetimbangkan gaya horizontal pada bahu tersebut.



Gambar 2. Gerak berjalan pada manusia [10]

Ketika orang berjalan (Gambar 2), terjadi pergerakan titik pusat massa, sehingga menyebabkan nilai GRF bervariasi. Variasi nilai GRF ini dapat diuraikan dalam tiga sumbu gaya komponen GRF, yaitu GRF vertikal, GRF anterior-posterior, dan GRF medial. Harga GRF sebagai fungsi dari siklus berjalan manusia dapat dilihat pada gambar 3. Dapat dilihat bahwa komponen gaya yang dominant adalah gaya vertikal.



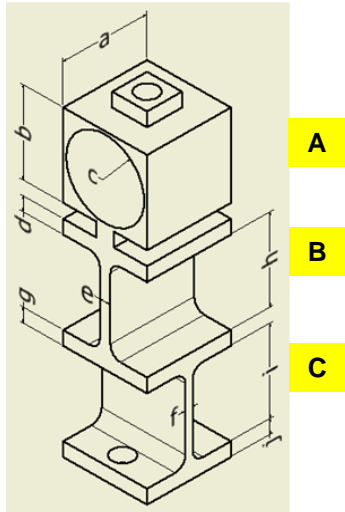
Gambar 3. Variasi Nilai GRF [10]

3. Rancangan Load Cell

Spesifikasi *force plate* yang dirancang pada penelitian ini adalah:

1. Mampu mengukur nilai GRF dalam arah vertikal, medial-lateral, maupun anterior-posterior dengan akurat.

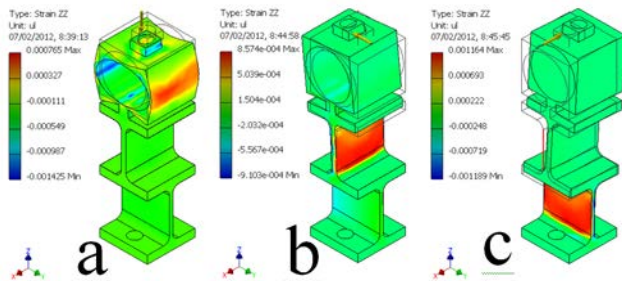
2. Proses pembuatan mudah
3. Bahan material banyak tersedia di pasaran
4. Keterbuatan tiap komponennya tinggi
5. Mudah dipasang
6. Memiliki overload protection untuk mencegah kerusakan pada loadcell
7. Mampu dipakai untuk subjek dengan berat maksimal 100kg.



Gambar 4. Desain load cell 3 sumbu terpilih

Setelah melalui tahap perancangan konseptual dan perancangan rinci, dengan mempertimbangkan beberapa konfigurasi geometri loadcell yang mungkin dibuat, akhirnya dipilih satu geometri loadcell yang dapat mengukur gaya dalam arah 3 sumbu seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.

Simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa bagian load cell paling atas hanya sensitif mengukur gaya vertikal (gambar 5a), sementara bagian tengah dan bawah masing-masing hanya sensitif mengukur gaya arah *antero-posterior* (gambar 5b) dan arah *medio-lateral* (gambar 5c)



Gambar 5. Simulasi numerik pembebanan load cell dalam arah 3 sumbu

Pada tahap selanjutnya, loadcell tersebut kemudian dimanufaktur dengan material Al 6061. Dimensi loadcell hasil manufaktur ditampilkan pada tabel 1. Dapat dilihat bahwa dengan proses manufaktur biasa,

cukup sulit untuk memperoleh loadcell yang identik.

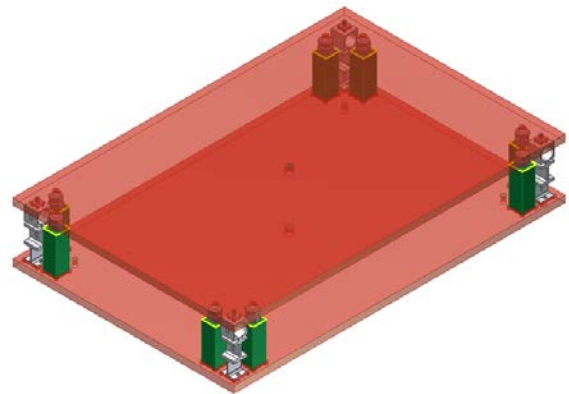
Tabel 1. Dimensi desain dan hasil pengukuran masing-masing load cell (L1-L4)

PARAMETER (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	Desain Loadcell (mm)
a	24.02	24.08	24.31	24.18	24
b	24.05	23.81	23.81	24.36	24
c	21.985	21.93	21.985	21.945	22.4
d	4.11	4.32	4.33	4.27	4
e	3.031	3.2	3.52	3.21	3
f	2.81	2.31	2.37	2.24	2
g	4.35	4.17	4.06	4.33	4
h	23.85	23.88	23.83	23.8	24
i	23.46	23.74	23.51	23.48	24
j	4.16	4.03	4.22	4.05	4

4. Rancangan Force Plate

Harga force plate komersial yang mahal menjadi alasan utama pengembangan force plate ini. Walaupun terjangkau ada beberapa syarat yang harus dipenuhi dalam perancangan force plate ini.

Ketika subjek berjalan di atas force plate, maka diharapkan force plate cukup lebar sehingga kedua kaki dapat berada di area force plate. Force plate juga harus didesain cukup panjang untuk memastikan ada satu kaki subjek yang menjejak pada force plate ketika subjek berjalan di lintasan. Dalam penggunaannya, force plate dipasang rata dengan ketinggian lantai agar subjek yang berjalan di atasnya dapat berjalan secara alami. Dengan demikian perlu dirancang forceplate dengan desain yang kompak.



Gambar 6. Desain force plate terpilih

Setelah melalui proses perancangan konseptual dan perancangan rinci, diperoleh desain force plate terpilih seperti yang ditampilkan pada gambar 6. Dalam desain ini, digunakan empat buah load cell 3 sumbu yang dipasang pada setiap pojok force plate. Pada pojok itu pula dipasang batang penahan beban berlebih.

Force plate yang dirancang pada penelitian ini, diharapkan mampu menahan beban maksimum 1000 N pada arah vertikal. Diasumsikan beban maksimum ini tercapai ketika ada subjek dengan berat maksimum 100 kg yang menggunakan force plate ini. Adapun

beban maksimum yang bekerja tidak boleh membuat loadcell sebagai komponen utama force plate, mengalami deformasi plastis. Beban yang bekerja pada force plate harus kurang dari 3800 N pada arah vertikal, kurang dari 681 N pada arah anterior, dan kurang dari 264 N pada arah medial. Hal ini untuk memastikan deformasi plastis tidak terjadi.

Material yang digunakan pada desain force plate alternatif 2 ini adalah Al 6061 dan Al 5083. Al 6061 digunakan pada komponen loadcell dan overload protection karena memiliki sifat mekanik yang cukup baik. Al 5083 digunakan pada komponen top plate dan bottom plate.

5. Pengujian Load Cell

Agar dapat mendeteksi gaya, maka pada load cell dipasang strain gauge yang kemudian dihubungkan dengan rangkaian jembatan Wheatstone. Load cell kemudian diberi beban dalam arah tiga sumbu, dan diperoleh data perubahan tegangan sebagai fungsi dari masing-masing arah gaya pada rangkaian jembatan Wheatstone segmen A, segmen B dan segmen C. Data tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh matriks kalibrasi sebagai berikut:

$$\{V\} = [A]\{F\} \tag{1}$$

$$\begin{Bmatrix} V_{\text{segmen A}} \\ V_{\text{segmen B}} \\ V_{\text{segmen C}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{\text{Vertikal}} \\ F_{\text{Anterior}} \\ F_{\text{Medial}} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

dan

$$\{F\} = [C]\{V\} \tag{3}$$

dengan $[C] = [A]^{-1}$

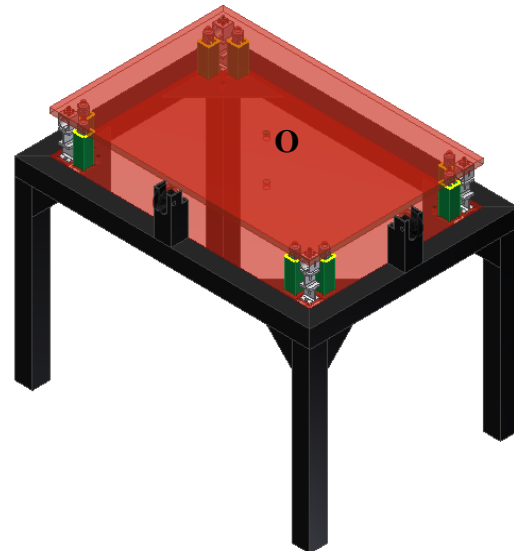
Tabel 2: matriks kalibrasi masing-masing load cell

	A			C		
L1	3.041	0.067	0.813	0.3294	-0.0007	-0.0031
	1.49	28.225	0.017	-0.0174	0.0355	0.0002
	0.2145	0.4025	86.355	-0.0007	-0.0002	0.0116
L2	2.5515	0.716	0.163	0.3984	-0.0101	-0.0009
	1.6275	28.285	0.762	-0.0229	0.0359	-0.0004
	0.024	0.343	64.8	0.0000	-0.0002	0.0154
L3	2.6655	0.48	1.021	0.3770	-0.0065	-0.0040
	0.5395	27.41	0.2095	-0.0074	0.0366	0.0000
	0.352	0.6875	95.445	-0.0013	-0.0002	0.0105
L4	3.444	0.3365	0.846	0.2919	-0.0035	-0.0050
	1.179	27.56	0.263	-0.0125	0.0364	0.0000
	0.242	0.493	49.28	-0.0013	-0.0003	0.0203

Hasil kalibrasi ditampilkan pada tabel 2. Dapat dilihat

bahwa matriks yang diperoleh adalah matriks dengan nilai dominan berada pada diagonal matriks, yang menunjukkan bahwa setiap segmen hanya sensitif untuk satu arah beban tertentu saja.

6. Pengujian Force Plate



Gambar 7. Rig pengujian force plate

Proses pengujian force plate dilakukan dengan memasang force plate pada rig pengujian, seperti pada gambar 7. Beban diberikan pada titik O yang merupakan centroid dari permukaan atas force plate dengan menggunakan beban pemberat. Untuk gaya vertikal, beban langsung digantungkan pada titik O, sementara untuk gaya anterior dan medial, digunakan kabel dan katrol yang dipasang pada dua sisi rig sehingga saat beban pemberat dipasang, gaya horizontal yang terjadi pada force plate.

Proses kalibrasi Force Plate hampir sama dengan proses kalibrasi load cell. Pada penelitian ini force plate diberi beban gaya dalam arah tiga sumbu, dan diperoleh hubungan antara gaya yang diberikan (F_i) dan gaya yang diukur pada masing-masing loadcell (F_u).

$$\{\Sigma F_u\} = [G]\{F_i\} \tag{4}$$

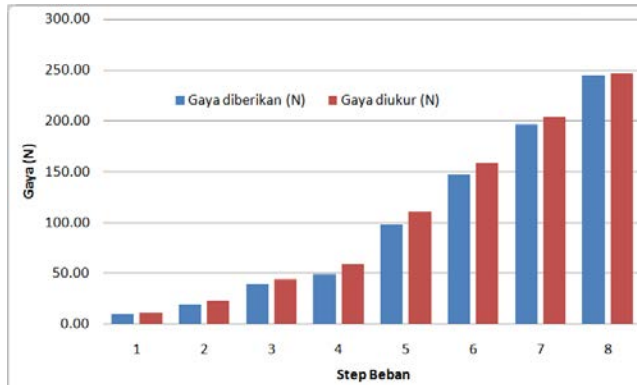
$$\{F_i\} = [H]\{\Sigma F_u\} \tag{5}$$

Hasil kalibrasi Force Plate ditampilkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa matriks- matriks ini juga adalah matriks diagonal, yang menunjukkan bahwa force plate ini juga dapat mengukur gaya dalam tiga arah secara independen.

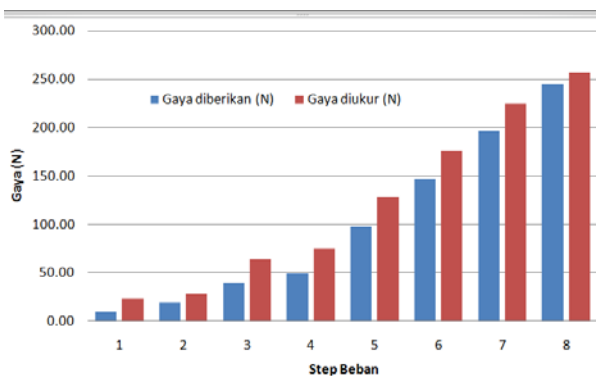
Tabel 3: matriks kalibrasi force plate

G			H		
0.764	0	0	1.309	0	0
0	0.054	0	0	18.52	0
0	0	0.163	0	0	6.135

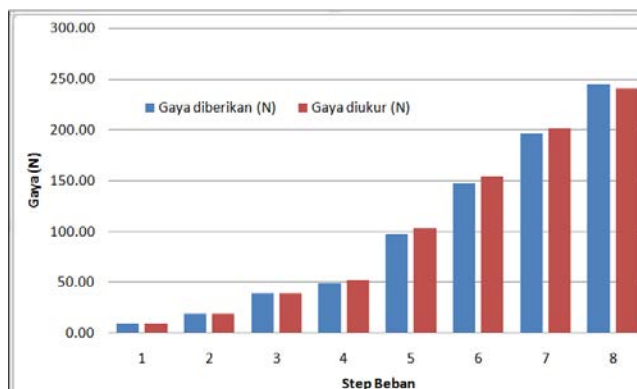
Pengujian selanjutnya dilakukan untuk membandingkan gaya yang diberikan dengan gaya yang diukur pada setiap arah. Gambar 4-6 menunjukkan hasil perbandingan gaya yang diberikan (berwarna biru) dengan gaya yang diukur (berwarna merah) untuk gaya dalam arah vertikal, anterior dan medial. Dapat dikatakan bahwa sistem force plate yang diuji pada penelitian ini dapat mengukur gaya-gaya dalam tiga arah dengan hasil yang baik.



Gambar 4. Perbandingan gaya vertikal yang diberikan dengan gaya vertikal yang diukur pada force plate



Gambar 5. Perbandingan gaya anterior yang diberikan dengan gaya anterior yang diukur pada force plate



Gambar 6. Perbandingan gaya medial yang diberikan dengan gaya medial yang diukur pada force plate

7. Simpulan

Force plate yang mampu mengukur gaya pada tiga sumbu secara simultan, menggunakan loadcell 3 sumbu, telah berhasil dirancang, dimanufaktur, dirakit dan diuji pada penelitian ini, dengan memperhatikan

keterbuatannya di bengkel lokal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa force plate dapat mengukur gaya yang diberikan pada tiga sumbu dengan cukup akurat.

8. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh hibah riset ITB tahun 2012

9. Rujukan

1. M. W. Whittle, *Gait Analysis: an Introduction*, 4th Edition, Elsevier, 2007.
2. R. L. Huston, *Principle of Biomechanics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2009.
3. D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 3rd Edition, John Wiley and Son Inc., New York, 2009.
4. V. Medved, *Measurement of Human Locomotion*, CRC Press, New York, 2001.
5. J.G. Richards, "The measurement of human motion: a comparison of commercially available systems", *Human Movement Science*, 18, pp. 589–602, 1999.
6. A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, T. Dirgantara, N.Juliyad, U. Purba, "Development of an Affordable System for 2D Kinematics and Dynamics Analysis of Human Gait," in C. Quan, K. Qian, A. Asundi, F. S. Chau, Editors, 4th ICEM, Singapore, Nov. 2009. - Proc. of SPIE Vol. 7522, 75222L, 2010
7. A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, T. Dirgantara, P. N. Maulido, "Gait Parameters Determination by 2D Optical Motion Analyzer System", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 83, pp. 123 – 129, 2011
8. T. Dirgantara A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, "Development of Affordable Optical Based Gait Analysis System" *ASEAN Engineering Journal PART A: Mechanical, Manufacturing and Aerospace Vol 2 no 1*, 2012
9. A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, T. Dirgantara, M. Moeliono, T. Prabowo, P. N. Maulido,, "Development of Indonesian Gait Database using 2D Optical Motion Analyzer System", *ASEAN Engineering Journal 2012* (accepted for publication)
10. Rose, J., & Gamble, J. G., *Human Walking*, 3rd Edition. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006.