

Identifikasi Persamaan Plant Ball and Beam Tanpa Tuas

Erwani Merry Sartika¹, T.Rudi Sarjono¹, Jeremy Jonathan¹

ABSTRACT: The equation of the ball and beam plant model has a lot of research. Generally, ball and beam plants use a lever on the part that is connected to the motor. In this paper plant ball and beam is used without a lever. The lever is changed by a circle that is moved not through the center so that it can raise and bring down the beam through the side of the circle which causes changes in the motorservo position to the movement of the ball becomes non-linear. For this reason, the equation of the existing ball and beam plant cannot be used to represent the characteristics of the plant. In this paper, ball and beam plants without levers were identified using the least square method to obtain the model equation. The least square method was successfully used to identify the model of plant ball and beam without a lever in the form of a second-order equation consisting of 2 poles and 1 zero with a validation value (loss function) of 0.1220.

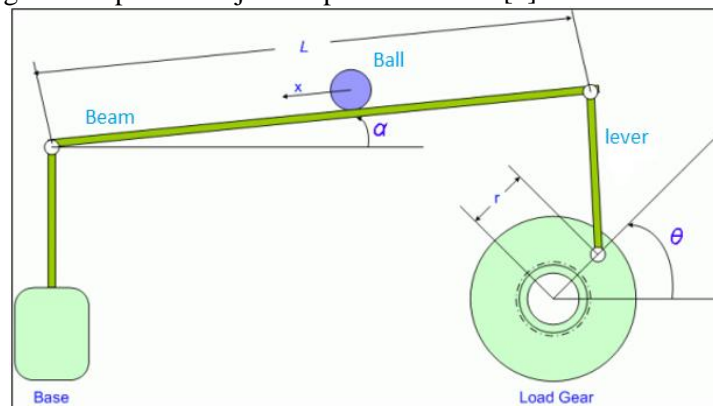
KEYWORDS: Plant ball and beam, Identification, Least Square method

ABSTRAK: Persamaan model plant ball and beam telah banyak yang meneliti. Umumnya plant ball and beam menggunakan tuas di bagian yang terhubung pada motor. Pada makalah ini digunakan plant ball and beam tanpa tuas. Tuas diubah dengan lingkaran yang digerakkan tidak melalui pusat sehingga dapat menaikkan dan menurunkan beam melalui sisi lingkaran tersebut yang menyebabkan perubahan posisi motorservo terhadap pergerakan bola menjadi tidak linier. Dengan alasan tersebut maka persamaan plant ball and beam yang sudah ada tidak dapat digunakan untuk mewakili karakteristik plant tersebut. Pada makalah ini plant ball and beam tanpa tuas diidentifikasi menggunakan metode least square untuk mendapatkan persamaan model. Metode least square berhasil digunakan untuk mengidentifikasi model plant ball and beam tanpa tuas berupa persamaan orde dua yang terdiri dari 2 pole dan 1 zero dengan nilai validasi (loss function) sebesar 0.1220.

Kata kunci: Bola tanaman dan balok, Identifikasi, metode Least Square

PENDAHULUAN

Ball and beam menjadi plant yang banyak digunakan untuk mempelajari sistem kontrol non linier dan tidak stabil. Plant ini banyak digunakan untuk verifikasi antara teori kontrol dengan implementasi praktik. Plant ball and beam menjadi model di laboratorium untuk mengajarkan rekayasa sistem kontrol karena cukup sederhana untuk dipahami [1]. Melalui pergerakan bola yang bergulir bebas pada bidang miring yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi, posisi bola dari plant ball and beam menjadi bagian yang selalu dipelajari dalam sistem kontrol. Prinsip kerja ball and beam adalah dengan menjaga keseimbangan sistem. Untuk menjaga ball and beam ini seimbang, controller harus menggerakkan motor servo agar beam menuju keadaan seimbang dan bola berada di posisi yang diinginkan seperti ditunjukkan pada Gambar 1[2].



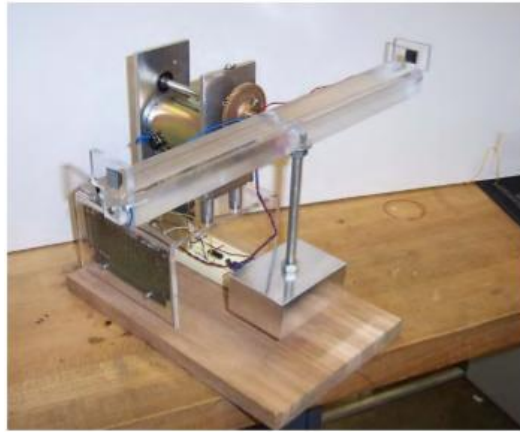
■ Gambar 1. Sistem Ball and Beam dengan tuas[2]

Plant ball and beam umumnya menggunakan tuas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dengan pendeteksi bola logam dan sensor kawat listrik yang terpasang pada beam.

Kebanyakan bola dan beam menggunakan material *stainless steel* dan menggunakan roda gigi untuk terhubung ke motor. Penurunan rumus untuk plant ball and beam yang ditunjukkan pada Gambar 1, tentunya sudah sangat banyak. Rumus yang diperoleh dari berbagai literatur juga sudah banyak ditemukan sehingga dapat dilakukan pengendalian dengan lebih mudah.

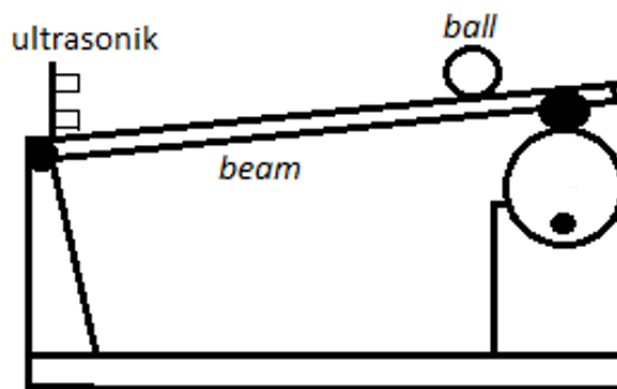
Ada banyak metode dan tipe merancang model perangkat keras plant ball and beam. Gambar 2 menunjukkan plant ball and beam yang ada di Laboratorium Robotika Berkeley. Plant mempunyai profil tipe-u yaitu motor penggerak terletak di pusat sistem, sebuah tambahan encoder yang dipasang di bagian belakang poros beam digunakan untuk mengukur sudut deviasi dari balok. Sensor diperlukan untuk menentukan posisi dan percepatan bola [3].

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Maranatha



■ **Gambar 2.** *Plant ball and beam* di Laboratorium Robotika Berkeley[3]

Pada makalah ini digunakan *plant ball and beam* yang memiliki desain yang sedikit berbeda. *Plant ball and beam* tidak menggunakan tuas dan terpasang logam berbentuk lingkaran yang bergerak tidak melalui pusat lingkaran. Motor servo dipasang pada titik yang tidak di pusat lingkaran sehingga dapat menaikkan dan menurunkan beam berdasarkan lingkaran tersebut. *Plant ball and beam* tanpa tuas tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 3.



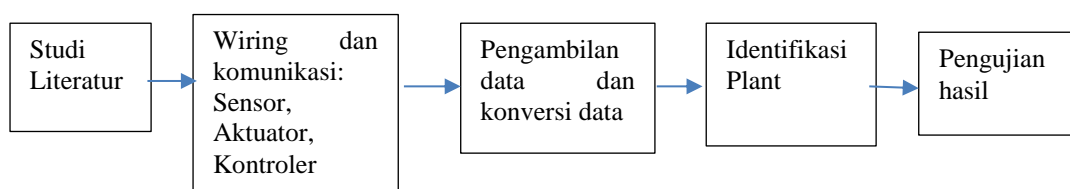
■ **Gambar 3.** *Plant Ball and Beam* tanpa tuas

Berdasarkan *plant ball and beam* tanpa tuas yang ditunjukkan pada Gambar 3, maka penurunan rumus yang sudah banyak diteliti pada berbagai literatur tidak dapat digunakan. Pengendalian tidak dapat menggunakan persamaan *plant ball and beam* yang sudah ada. Walaupun *plant ball and beam* tanpa tuas memiliki kelemahan karena daerah kerjanya terbatas (tergantung pada besarnya diameter lingkaran), namun *plant ball and beam* tanpa tuas tersebut dapat digunakan untuk mempelajari sistem pengendalian yang non linier akibat dari motor servo yang tidak dapat berputar mewakili gerak yang linier.

Persamaan model dari *plant ball and beam* tanpa tuas tentunya sangat dibutuhkan agar sistem kontrol dari *plant ball and beam* tanpa tuas tersebut dapat digunakan. Pada penelitian ini akan dicari persamaan model dari *plant ball and beam* tanpa tuas melalui proses identifikasi sistem. Melalui hasil dari identifikasi sistem *plant ball and beam* tanpa tuas tersebut, diharapkan persamaan model yang mewakili sistem ini dapat diperoleh dan dapat digunakan untuk mengendalikan sistem.

METODOLOGI

Pada metodologi penelitian dilakukan dalam beberapa tahap diantara yaitu studi literatur, wiring dan setting komunikasi, pengambilan data dan konversi data, identifikasi sistem, dan diakhiri dengan pengujian hasil. Diagram blok metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.



■ **Gambar 4.** Diagram Blok Metodologi Penelitian Identifikasi Sistem Ball and Beam tanpa Tuas

Pada studi literatur akan dipelajari tentang berbagai informasi tentang jenis-jenis plant ball and beam, berbagai metode sistem identifikasi, data sheet sensor/aktuator, penggunaan kontroler dan motor servo yang akan digunakan. Pengkabelan/wiring dan setting komunikasi pada sensor, aktuator, dan kontroler dilakukan untuk mendapatkan data posisi bola. Setelah seluruh proses hardware berhasil dilakukan, pengambilan data mulai dapat dilakukan. Proses pengambilan data dilakukan berulang-ulang untuk memastikan kebenaran dan kesalahan data yang diperoleh. Data yang diperoleh perlu dikonversi agar sesuai dengan posisi bola (satuan yang ditentukan). Data digunakan untuk mengidentifikasi persamaan plant ball and beam tanpa tuas melalui proses pemilihan metode. Pengujian dilakukan dengan pemilihan orde *plant* yang berbeda untuk menentukan hasil identifikasi yang terbaik.

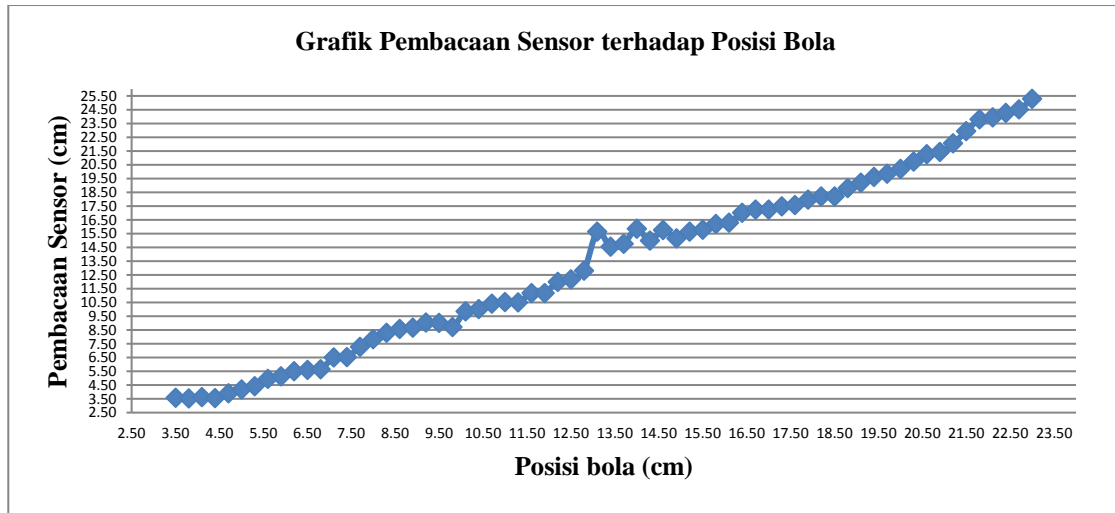
PROSES IDENTIFIKASI PLANT

Sistem *ball and beam* tanpa tuas terdiri dari sensor ultrasonik HY-SRF05, *beam* yang pergerakannya dikendalikan oleh *servomotor* AM8111[4], dan bola seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem *ball and beam* akan dikendalikan oleh mikrokontroler arduino UNO[5][6] dan Programmable Logic Controller (PLC) Beckhoff CX9020[7]. Mikrokontroler digunakan untuk mengambil data posisi bola dari sensor ultrasonik HY-SRF05, sedangkan PLC digunakan untuk menggerakkan motor AM8111. Mikrokontroler arduino UNO diprogram agar dapat membaca posisi bola pada *beam*. Arduino UNO dilengkapi dengan *ethernet shield* agar dapat berkomunikasi dengan PLC. Protokol komunikasi yang digunakan adalah protokol modbus. PLC mengolah data dari mikrokontroler arduino UNO untuk menggerakkan *servomotor* AM8111 (PLC sebagai *master* dan mikrokontroler sebagai *slave*).

Setelah seluruh hardware terpasang, dilakukan pengambilan data posisi bola. Bola hanya dapat dideteksi oleh sensor ultrasonik dari jarak 3 cm sampai dengan 23 cm di depan (66 *sample*). Data posisi bola diambil, dan data ditampilkan oleh mikrokontroler arduino UNO. Pengambilan data dilakukan 4 kali, kemudian di rata-rata untuk dijadikan data acuan posisi bola terhadap pembacaan mikrokontroler seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 5.

■ **Tabel 1.** Data rata-rata pembacaan sensor ultrasonik terhadap posisi bola

No	Sensor				Rata-rata (X)	Pengukuran Penggaris (Y cm)		No	Sensor				Rata-rata (X)	Pengukuran Penggaris (Y cm)
	1	2	3	4					1	2	3	4		
1	4,14	3,52	3,38	3,28	3,58	3,50		33	17,17	16,66	13,66	15,03	15,63	13,10
2	3,53	3,53	3,59	3,43	3,52	3,80		34	15,19	14,93	14,05	14,05	14,56	13,40
3	3,38	4,16	3,33	3,59	3,62	4,10		35	15,64	15,53	14,36	13,50	14,76	13,70
4	3,43	3,53	3,48	3,74	3,55	4,40		36	16,41	15,64	15,95	15,40	15,85	14,00
5	3,74	3,74	3,95	4,21	3,91	4,70		37	15,33	15,40	14,36	14,83	14,98	14,30
6	4,19	4,34	4,09	4,05	4,17	5,00		38	15,53	15,84	15,84	15,84	15,76	14,60
7	4,24	4,84	4,24	4,34	4,42	5,30		39	15,79	15,22	14,78	14,83	15,16	14,90
8	4,97	5,07	5,02	4,71	4,94	5,60		40	15,64	15,24	15,64	16,00	15,63	15,20
9	5,02	5,17	5,17	5,17	5,13	5,90		41	16,05	16,00	15,28	15,74	15,77	15,50
10	5,21	5,43	5,53	5,83	5,50	6,20		42	16,71	16,16	16,28	15,59	16,19	15,80
11	5,48	5,67	5,78	5,48	5,60	6,50		43	16,05	16,45	16,16	16,47	16,28	16,10
12	5,64	5,52	5,88	5,53	5,64	6,80		44	17,07	17,53	17,07	16,41	17,02	16,40
13	6,19	6,34	6,50	6,95	6,50	7,10		45	17,02	17,28	17,48	17,17	17,24	16,70
14	6,19	6,55	6,90	6,50	6,54	7,40		46	17,59	17,02	17,28	17,12	17,25	17,00
15	7,00	6,86	7,31	7,88	7,26	7,70		47	17,28	17,53	17,64	17,48	17,48	17,30
16	7,78	7,97	7,67	7,88	7,83	8,00		48	17,38	17,38	18,14	17,33	17,56	17,60
17	8,12	8,64	8,19	8,19	8,29	8,30		49	18,00	18,05	18,09	17,69	17,96	17,90
18	8,59	8,53	8,48	8,64	8,56	8,60		50	18,19	18,16	18,29	18,16	18,20	18,20
19	8,79	8,64	8,48	8,79	8,68	8,90		51	18,19	18,24	18,16	18,16	18,19	18,50
20	9,16	8,83	9,21	8,90	9,03	9,20		52	18,50	19,12	18,71	18,91	18,81	18,80
21	9,21	8,59	9,10	9,16	9,02	9,50		53	19,07	19,62	18,97	19,07	19,18	19,10
22	8,59	8,48	9,31	8,43	8,70	9,80		54	19,33	19,62	20,14	19,33	19,61	19,40
23	9,60	9,72	10,07	9,97	9,84	10,10		55	19,38	19,48	20,29	20,19	19,84	19,70
24	10,28	10,17	9,81	9,76	10,01	10,40		56	20,81	20,14	20,00	19,79	20,19	20,00
25	10,38	10,28	10,43	10,53	10,41	10,70		57	20,86	20,66	20,76	20,66	20,74	20,30
26	10,48	10,53	10,33	10,79	10,53	11,00		58	21,59	20,95	21,47	21,07	21,27	20,60
27	10,64	10,48	10,22	10,69	10,51	11,30		59	21,38	21,12	21,88	21,36	21,44	20,90
28	11,34	10,74	11,36	11,26	11,18	11,60		60	21,98	21,88	22,24	22,12	22,06	21,20
29	10,95	11,24	10,95	11,60	11,19	11,90		61	21,78	23,52	24,22	22,19	22,93	21,50
30	12,02	12,17	12,12	11,66	11,99	12,20		62	22,34	24,79	25,05	23,05	23,81	21,80
31	12,33	11,91	12,31	12,12	12,17	12,50		63	24,03	24,64	23,52	23,53	23,93	22,10
32	12,83	12,59	12,93	12,88	12,81	12,80		64	24,79	23,52	24,38	24,38	24,27	22,40
33	17,17	16,66	13,66	15,03	15,63	13,10		65	23,98	24,72	23,52	25,81	24,51	22,70
34	15,19	14,93	14,05	14,05	14,56	13,40		66	24,90	24,38	26,28	25,60	25,29	23,00



■ **Gambar 5.** Grafik pembacaan sensor ultrasonik terhadap posisi bola

Hubungan antara pembacaan sensor ultrasonik dan pembacaan posisi bola perlu ditentukan dalam bentuk persamaan agar dapat dikonversi secara otomatis oleh mikrokontroler arduino UNO. Melalui grafik yang ditampilkan pada Gambar 5, maka dipilih metode regresi linier untuk memperoleh persamaan hubungan antara pembacaan sensor ultrasonik dan posisi bola. Persamaan regresi linier yang digunakan ditunjukkan pada Persamaan 2 dengan gradien/kemiringan ditunjukkan pada Persamaan 1 [8]. Hasil perhitungan berdasarkan data dan disubstitusikan ke dalam Persamaan 2, maka diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 4. Persamaan 4 yang diperoleh memiliki koefisien korelasi 0,9952484 yang dihitung menggunakan Persamaan 3. Nilai koefisien korelasi yang dihasilkan dari metode regresi linier mendekati 1, yang berarti penentuan regresi linier sudah tepat. X sebagai pembacaan sensor ultrasonik dan Y sebagai posisi bola. Persamaan 4 yang diperoleh digunakan sebagai rumus di dalam mikrokontroler arduino UNO untuk diolah oleh PLC dalam mengendalikan *servomotor* AM8111.

$$m = \frac{(N\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(N\sum X^2) - (\sum X)^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$Y = c + mX \dots\dots\dots(2)$$

$$r_{xy} = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \dots\dots\dots(3)$$

c = *Intersep coefficient* atau *intersep* yaitu jarak titik acuan dengan titik potong garis regresi dengan sumbu Y.

m = *slope coefficient* atau *slup* yang menyatakan atau menunjukkan kemiringan garis regresi terhadap sumbu X.

Y = variabel terikat.

X = variabel bebas.

N = banyak data yang di ambil

$$Y = 1.25 + 0.90X \dots\dots\dots(3)$$

Proses selanjutnya adalah proses identifikasi plant ball and beam, yaitu dengan mengambil data input output dari keluaran *servomotor* AM8111 dan bacaan posisi bola oleh mikrokontroler arduino UNO. Metode identifikasi yang digunakan adalah *Least Square*. Plant ball and beam tanpa tuas yang digunakan, memiliki motor servo yang menggerakkan lingkaran tidak pada titik pusat sehingga membentuk pergerakan yang tidak linier. Oleh sebab itu metode *least square* dipilih karena metode ini memiliki *gain adaptation* agar dapat mengidentifikasi plant ball and beam tanpa tuas tersebut. Persamaan 4 adalah persamaan metode *Least Square* yang digunakan [9].

$$\hat{y}(t+n) = -\hat{a}_0 y(t) - \hat{a}_1 y(t+1) + \dots - \hat{a}_{n-1} y(t+(n-1)) + \hat{b}_0 u(t) + \hat{b}_1 u(t+1) + \dots + \hat{b}_m u(t+m)$$

$$= \hat{\theta}^T \phi(t)$$

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_0 \ \hat{a}_1 \ \dots \ \hat{a}_{n-1}, \hat{b}_0 \ \hat{b}_1 \ \dots \ \hat{b}_m]$$

$$\phi(t)^T = [-y(t) \ -y(t+1) \ \dots \ -y(t+n-1), u(t) \ u(t+1) \ \dots \ u(t+m)]$$

$$e(t+1) = y(t+1) - \hat{y}(t+1)$$

$$F(0) = \frac{1}{\delta} I ; \ 0 < \delta \ll 1$$

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi(t)^T F(t)}{1 + \phi(t)^T F(t)\phi(t)}$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t+1)\phi(t)e(t+1) \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

$\hat{y}(t+1)$ = estimasi data *output*

$\hat{\theta}^T$ = vektor parameter

\hat{a}_n dan \hat{b}_m = parameter estimasi pole dan zero

$\phi(t)^T = [-y(t), u(t)]$ = vektor pengukuran

$y(t)$ = nilai data *output*

$u(t)$ = nilai data *input*

$e(t+1)$ = *error*

$y(t+1)$ = data *output*

$F(t)$ = *gain adaptation*

I = matriks identitas

$F(t+1)$ = prediksi *gain adaptation*

$\hat{\theta}(t+1)$ = prediksi vektor parameter estimasi

Validasi parameter sistem menentukan suatu model bisa diterima ataupun tidak. Validasi yang digunakan pada identifikasi *plant ball and beam* tanpa tuas adalah *Loss Function* seperti ditunjukkan pada Persamaan 5. Nilai *loss function* berfungsi sebagai indikator untuk mengestimasi model. Akurasi model ditunjukkan oleh nilai *loss function* terkecil [9].

$$V = \det \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e e^T \right) \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan :

V = *Loss Function*

N = panjang data

e = *error*

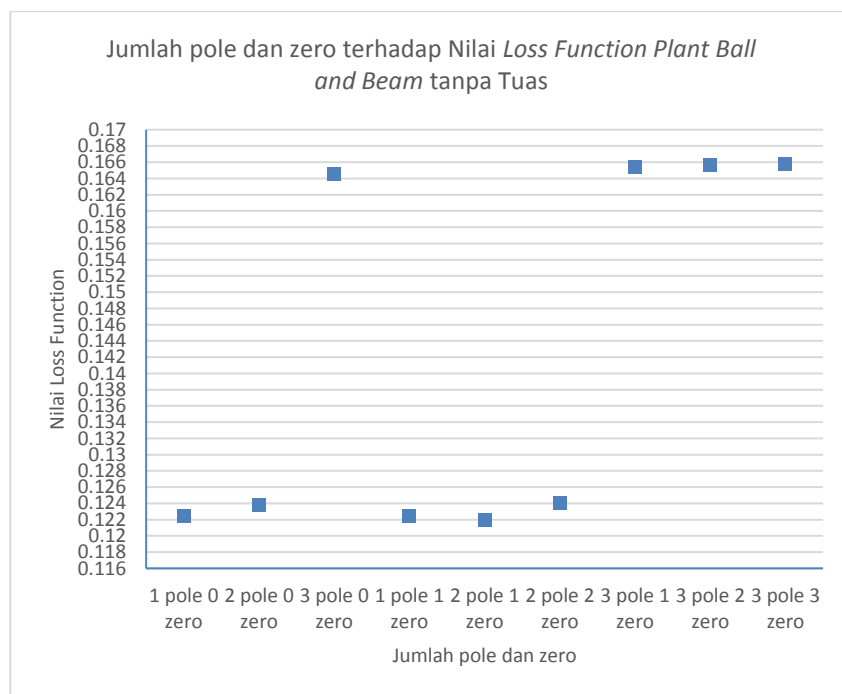
PENGUJIAN HASIL

Pada percobaan *plant ball and beam* tanpa tuas diberi *input* berupa *step* dari *servomotor* AM8111 (posisi servo dari 138 ke 86), kemudian *output* posisi bola akan dideteksi oleh sensor ultrasonik yang dibaca datanya lewat mikrokontroler arduino UNO. Data *input* dan *output* ini selanjutnya akan digunakan untuk mengidentifikasi *plant ball and beam* tanpa tuas yang digunakan pada penelitian ini.

■ **Tabel 2.** Tabel hasil identifikasi menggunakan Metode *Least Square* berdasarkan variasi orde dan nilai validasinya.

No	orde pole dan zero	Nilai awal	Persamaan yang diperoleh	validasi
1	1 pole dan 0 zero	$a_0 = 1 ; b_0 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+1) = 1,0963y(t) + 0,0579 u(t)$	0,1225
2	2 pole dan 0 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; b_0 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+2) = 0,7938 y(t) + 0,3903 y(t+1) + 0,0948 u(t)$	0,1238
3	3 pole dan 0 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; a_2 = 1 ; b_0 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+3) = 0,7938 y(t) + 0,4215 y(t+1) + 0,0302y(t+2) + 0,0941 u(t)$	0,1646
4	1 pole dan 1 zero	$a_0 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+1) = 1,0964y(t) + 0,0290 u(t) + 0,029u(t+1)$	0,1225
5	2 pole dan 1 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+2) = 0,7937 y(t) + 0,3906 y(t+1) + 0,0474 u(t) + 0,0474 u(t+1)$	0,1220
6	2 pole dan 2 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; b_2 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+2) = 0,7937 y(t) + 0,3906 y(t+1) + 0,0316 u(t) + 0,0316 u(t+1) + 0,0316 u(t+2)$	0,1241

6	3 pole dan 1 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; a_2 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+3) = 0,7935 y(t) + 0,4216 y(t+1) + 0,0298 y(t+2) + 0,0471 u(t) + 0,0471 u(t+1)$	0,1654
7	3 pole dan 2 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; a_2 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; b_2 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+3) = 0,7934 y(t) + 0,4217 y(t+1) + 0,0297 y(t+2) + 0,0314 u(t) + 0,0314 u(t+1) + 0,0314 u(t+2)$	0,1657
8	3 pole dan 3 zero	$a_0 = 1 ; a_1 = 1 ; a_2 = 1 ; b_0 = 1 ; b_1 = 1 ; b_2 = 1 ; b_3 = 1 ; \delta = 1$	$y(t+3) = 0,7934 y(t) + 0,4217 y(t+1) + 0,0297 y(t+2) + 0,0235 u(t) + 0,0235 u(t+1) + 0,0235 u(t+2) + 0,0235 u(t+3)$	0,1658

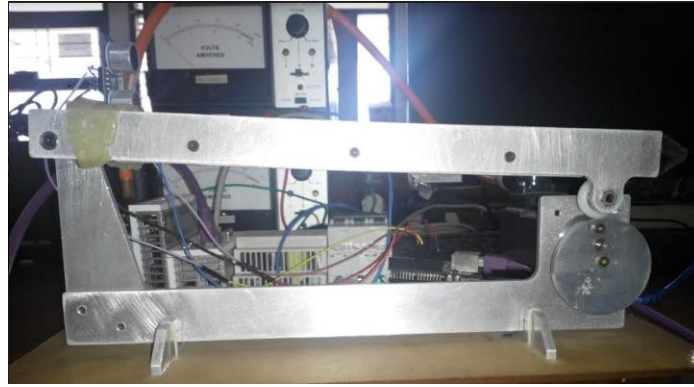


■ **Gambar 6.** Hubungan Jumlah pole dan zero terhadap Validasinya (nilai *Loss Function*) pada Plant ball and beam tanpa Tuas

Metode *Least Square* digunakan pada beberapa variasi jumlah pole dan zero untuk proses identifikasi *plant ball and beam* tanpa tuas. Tabel 2 merupakan hasil identifikasi untuk berbagai orde (variasi pole dan zero) dari data *output* data posisi bola bila diberikan *input step*. Pada Tabel 2 dan Gambar 6 ditampilkan nilai validasi hasil identifikasi menggunakan metode *Loss function*, dan dapat disimpulkan bahwa hasil identifikasi yang terbaik adalah model persamaan untuk model dengan 2 pole dan 1 zero. Persamaan 6 adalah persamaan yang dipilih sebagai hasil identifikasi plant ball and beam tanpa tuas karena memiliki nilai validasi yang paling kecil yaitu 0,122.

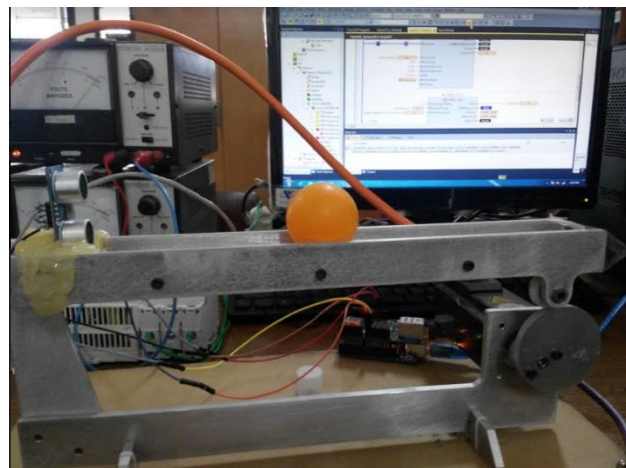
$$y(t+2) = 0.7937 y(t) + 0.3906 y(t+1) + 0.0474 u(t) + 0.0474 u(t+1) \dots \dots \dots (6)$$

Gambar 7 adalah *plant ball and beam* tanpa tuas yang digunakan pada penelitian ini untuk di identifikasi model persamaannya. Pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa plant terbuat dari logam yang dirancang penempatan servomotor-nya tidak pada pusat lingkaran logam, agar dapat menggerakkan *beam* tanpa menggunakan tuas lagi.



■ **Gambar 7.** Plant Ball and Beam tanpa Tuas yang digunakan

Gambar 7 adalah plant real ball and beam tanpa tuas yang digunakan pada penelitian ini dan proses pengambilan datanya. Plant menggunakan bola ping-pong sebagai bola yang akan diseimbangkan dan sensor ultrasonik yang terpasang tegak lurus pada *beam*. Komputer digunakan untuk pemrograman arduino Uno dan PLC, pengolahan data, dan lain-lain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



■ **Gambar 8.** Plant Ball and Beam tanpa Tuas dan Proses Pengambilan Data

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan identifikasi *plant ball and beam* tanpa tuas menggunakan metode Least Square. Identifikasi dilakukan dengan menggunakan data real dari sensor ultrasonik mewakili posisi bola dan sinyal kontrol dari PLC. Proses konversi antara jarak bola dengan hasil pembacaan sensor ultra melalui arduino UNO berhasil dilakukan menggunakan regresi linier dengan koefisien korelasi sebesar 0,9952484. Identifikasi menggunakan metode *Least Square* dengan orde plant yang dipilih adalah orde dengan 2 pole dan 1 zero, karena menghasilkan nilai validasi yang paling kecil yaitu 0,1220. Untuk selanjutnya hasil identifikasi yang diperoleh dapat digunakan untuk mengendalikan bola *plant ball and beam* tanpa tuas sehingga menjadi stabil dengan memanfaatkan persamaan yang telah diperoleh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Senthilkumar, "Performance Analysis of MIMO Ball and Beam System using Intelligent Controller," pp. 19–25, 2012.
- [2] W. Wang, "Control of a Ball and Beam System," 2007.
- [3] J. H. Wang Guanghui, Tian Yantao, Hong Wei, "Stabilization and Equilibrium Control of Super Articulated Ball and Beam System," in *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2000, pp. 3290–3293.
- [4] B. N. A. Technology, "Synchronous servomotor AM8100," 2018.
- [5] H. Santoso, *Panduan Praktis Arduino*. .
- [6] B. S. Else Orlanda Merti Wijaya, "PENGENDALI PID BERBASIS ARDUINO UNO," *J. Tek. Elektro*, vol. Volume 08, pp. 53–61, 2018.
- [7] B. N. A. Technology, "PC-based Control for Robotics in Handling , Production and Assembly," .
- [8] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2015.
- [9] G. Z. Ioan D. Landau, *Digital Control Systems. Design, Indentification and Implementation*. Springer, 2006.