

## REAL TIME SISTEM IDENTIFIKASI PADA NON-LINEAR SISTEM

**Moh. Khairudin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Jurusan Pend. Teknik Mekatronika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta  
Jl. Colombo Gg. Guru, Karangmalang Yogyakarta 55281 Telp 0274 548161  
Email: moh\_khairudin@uny.ac.id

### Abstrak

*Sistem identifikasi pada sistem non-linear diperlukan untuk melakukan linearisasi sistem non-linear tersebut sehingga dapat dilakukan desain sistem kendali. Sistem identifikasi dengan hardware dilakukan melalui metode Auto Regressive Exogenous (ARX) dengan menggunakan program bantuan Matlab. Pada studi ini mengambil sistem robot lengan lentur dua-link sebagai representatif sistem non-linear. Pada pengujian ini dilakukan pengumpulan data input-output dari suatu proses data sistem robot lengan dua-link yang akan diidentifikasi. Sistem Identifikasi akan membentuk model matematik sistem dinamik berdasarkan pengukuran data. Proses identifikasi yang digunakan adalah model pendekatan stokastik dengan struktur ARX sedangkan mengestimasi harga parameter  $a_1$  dan  $b_1$  dari model ARX digunakan metode pendekatan penyelesaian persamaan linier parameter rata-rata bergerak. Dalam implementasi sebagai input ARX digunakan data yang besarnya nilai input pada masing-masing link untuk setiap motornya sedangkan output yang diukur adalah besarnya sudut angular pada setiap gerakan lengan robot untuk masing-masing link. Kesamaan antara sistem nonlinear dan linear pada output angular position menunjukkan 94 %. Hasil sistem identifikasi menunjukkan hampir menuju kesamaan antara sistem nonlinear dan sistem hasil linearisasi.*

**Kata kunci:** robot lengan lentur dua-link; sistem identifikasi; sistem non-linear

### Pendahuluan

Sistem identifikasi (SI) merupakan salah satu cara untuk melakukan validasi hasil pemodelan sistem dengan riil sistem yang ada pada hardware. Kepresisian sistem adalah hal yang penting untuk dapat menghasilkan persamaan sistem kendali yang dapat digunakan secara valid pada plant yang akan dikendalikan. Identifikasi sistem didefinisikan sebagai usaha untuk membentuk model parameter plant melalui eksperimental dengan menggunakan data input dan output sebagai hasil dari plant. Proses identifikasi sistem pada plant dapat dilakukan dengan *real time* atau langsung terhubung ke *plant* secara *on-line* maupun *off-line*.

Pada pengujian ini, plant robot lengan lentur yang non-linear akan dilinearisasikan menjadi plant dengan orde 6. Proses sistem identifikasi melalui *command ident* pada matlab.

### Tinjauan Pustaka

Model matematis pada sistem dinamik suatu plant merepresentasikan dinamika plant tersebut secara presisi atau mendekati dinamika plant yang sesungguhnya. Ada banyak langkah dalam menurunkan model dinamik suatu plant diantaranya adalah melalui sistem identifikasi pada hardware yang ada. Model dinamik suatu plant akan sangat berbeda dengan plant yang lain tergantung dari hardware yang digunakan.

Tujuan utama pada pemodelan robot lengan lentur dua link adalah untuk mencapai model yang akurat mewakili perilaku sistem yang sebenarnya. Sesuatu yang penting untuk mengenal sifat kelenturan dan karakteristik dinamik dari sistem dan membangun model matematis yang cocok. Pemodelan robot lengan lentur satu link telah banyak dipaparkan.

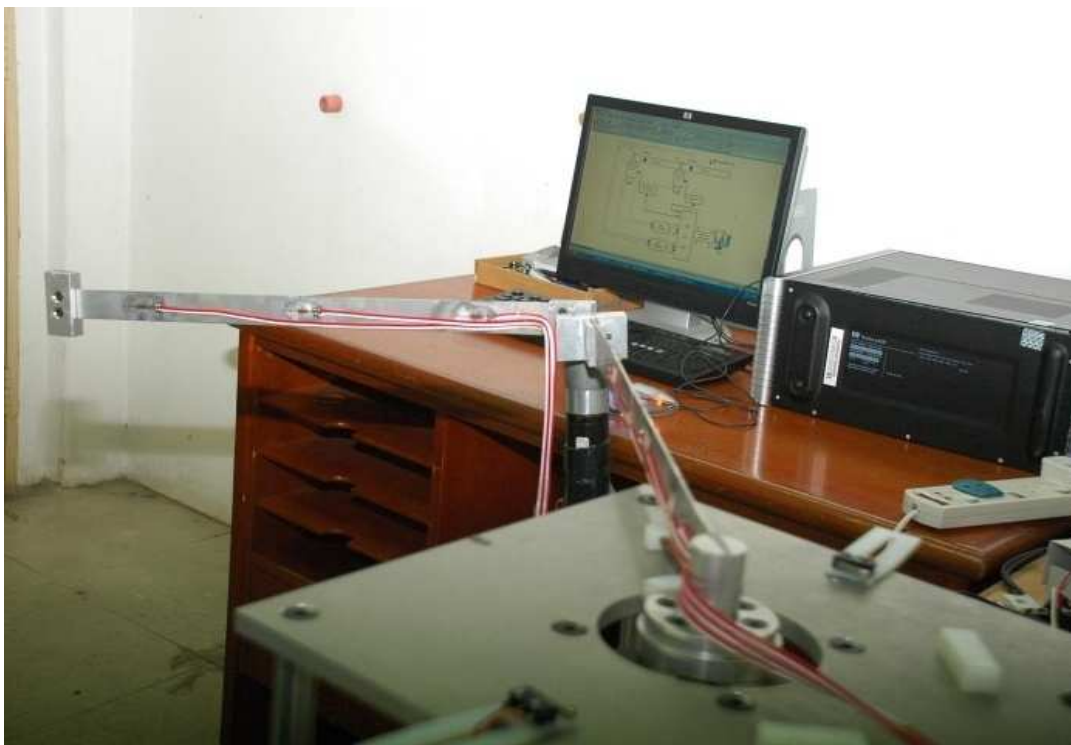
Berbagai pendekatan telah dikembangkan, yang terutama dapat dibagi menjadi dua kategori: pendekatan analisis numeric dan metode modus diasumsikan. Metode analisis numeric yang digunakan termasuk metode beda hingga dan metode elemen hingga. Kedua pendekatan telah digunakan dalam memperoleh karakterisasi dinamis robot lengan lentur satu link yang menggabungkan sistem redaman, hub inersia dan payload. Kinerja investigasi menunjukkan bahwa metode elemen hingga dapat digunakan untuk mendapatkan representasi yang baik dari system (Tokhi et al, 1997). Metode modus yang diasumsikan (AMM) mendapatkan mode perkiraan dengan menyelesaikan diferensial parsial persamaan karakteristik dinamis sistem. Biasanya persamaan diferensial dapat diperoleh dengan merepresentasikan defleksi dari robot lengan lentur sebagai penjumlahan mode. Setiap mode diasumsikan menjadi produk dari dua fungsi, satu sebagai fungsi jarak sepanjang lengan dan yang lain, sebagai koordinat yang tergantung pada waktu.

Sebelumnya studi memanfaatkan pendekatan ini untuk pemodelan robot lengan lentur satu link telah menunjukkan bahwa mode pertama cukup untuk mengidentifikasi dinamika robot lengan lentur. Hasil yang baik antara teori dan eksperimen juga telah dipaparkan (Marlins et al, 2003). Selain itu, beberapa metode lain juga telah

dipelajari. Ini termasuk pemodelan sistem robot lengan lentur satu link menggunakan algoritma particle swarm optimisation (Alam dan Tokhi, 2007) dan juga dengan prinsip Hamilton dan metode Galerkin (Pratiher dan Dwivedy, 2007).

Pada pengujian ini akan dilakukan pengumpulan data *input-output* dari suatu proses data sistem robot lengan dua-link yang akan diidentifikasi. Sistem Identifikasi akan membentuk model matematik sistem dinamik berdasarkan pengukuran data. Proses identifikasi yang digunakan adalah model pendekatan stokastik dengan struktur *Auto Regressive Exogenous* (ARX) sedangkan mengestimasi harga parameter  $a1$  dan  $b1$  dari model ARX digunakan metode pendekatan penyelesaian persamaan linier parameter rata-rata bergerak. Dalam implementasi sebagai *input* ARX digunakan data yang besarnya nilai *input* pada masing-masing link untuk setiap motornya sedangkan output yang diukur adalah besarnya sudut angular pada setiap gerakan lengan robot untuk masing-masing link. Sedangkan hasilnya adalah model *plant* dalam bentuk model kontiniu. Adapun ARX adalah suatu mekanisme untuk mendapatkan suatu model estimasi berdasarkan data stokastik dengan memanfaatkan pengukuran *input-output* dari suatu *plant* yang akan diidentifikasi.

Dalam menganalisis dinamika sistem yang terjadi pada sistem non-linear, yang pertama dilakukan adalah pemodelan dari sistem robot lengan lentur dua-link (*plant*) yang akan didisain. Dalam hal ini *plant* yang akan digunakan adalah robot lengan lentur dua-link dengan asumsi gerakan pada horizontal axis. Robot lengan lentur dua-link terdiri dari empat bagian utama yaitu, dua link lengan lentur, komponen pengukur (sensor), motor dilengkapi driver motor dan processor. Pemasangan hardware pada experiment memerlukan rangkaian interface yang presisi, sehingga pada pengujian ini digunakan PCI6221 sebagai multifungsi data akuisisi pada akses input dan output dari komputer. Card PCI ini mempunyai 16 bit analog output port dan 24 digital input/output port. Gambar 1 menunjukkan robot lengan lentur dua-link yang digunakan dalam pengujian ini.



Gambar 1. Robot lengan lentur dua-link

Tabel 1 menunjukkan parameter dan karakteristik robot lengan lentur dua-link yang digunakan pada pengujian ini.

Tabel 1. Parameter dan karakteristik robot lengan lentur dua-link

Symbol	Parameter	Link-1	Link-2	Unit
$m_1, m_2$	Mass of link	0.08	0.05	kg
$\rho$	Mass density	2666.67	2684.56	$\text{kgm}^{-1}$
$EI$	Flexural rigidity	1768.80	597.87	$\text{Nm}^2$
$J_{h1}, J_{h2}$	Motor and hub inertia	$1.46 \times 10^{-3}$	$0.60 \times 10^{-3}$	$\text{kgm}^2$
$M_p$	Payload mass (maximum)	-	0.1	kg
$\bar{J}_p$	Payload inertia (maximum)	-	$0.05 \times 10^{-3}$	$\text{kgm}^2$
$l_1, l_2$	Length of link	0.5	0.5	m
	Width of link	0.03	0.025	m
	Thickness of link	$2 \times 10^{-3}$	$1.49 \times 10^{-3}$	m
$J_{o1}, J_{o2}$	Moment of inertia	$5 \times 10^{-3}$	$3.125 \times 10^{-3}$	$\text{kgm}^2$
$M_{h2}$	Mass of the centre rotor	-	0.155	kg

Lengan lentur adalah bagian utama dari sistem yang dibangun menggunakan lempeng aluminium tipis. Secara praktis, ukuran dan berat lengan seperti yang dirancang tergantung pada jenis aplikasi tertentu. Spesifikasi dari lengan manipulator yang dipertimbangkan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Sensor yang digunakan dalam pengujian ini adalah encoder yang dipasang pada poros motor dan sensor regangan pada material lengan di sepanjang lengan robot. Dua encoders, HEDL-5540 dan HEDS-5540 dengan 500 hitungan per putaran digunakan untuk mengukur posisi sudut dari link-1 dan link-2. Perangkat antarmuka terdiri dari PCIQUAD04 dengan 4 saluran input digunakan sebagai pendeteksi dan interfacing dengan sistem real-time. Di sisi lain, pengukur regangan digunakan untuk pengukuran defleksi dari link. Pengukur regangan menggunakan rangkaian jembatan wheatstone untuk mengkonversi perubahan resistensi terhadap tegangan output pada sensor strain-gauge. Untuk robot lengan lentur dua-link, dua pengukur regangan ditempatkan pada posisi 10 cm dari letak motor pada kedua link untuk mendapatkan input sensor yang bagus.

Motor DC telah digunakan sebagai aktuator ke lengan lentur. Dua motor DC yaitu RE-40 dan RE-35 diproduksi oleh Maxon motor yang digunakan untuk memindahkan link-1 dan link-2. Beberapa keuntungan yang didapatkan dengan menggunakan motor sebagai aktuator pada robot lengan ini adalah sebagai berikut: (a) Motor memberikan rating daya dan tegangan nominal 150 W / 24 V untuk motor penggerak link-1 dan 90 W / 24 pada motor penggerak link-2. (b) Berat 0,48 kg pada motor-1 dan 0,34 kg pada motor-2. (c) Kecepatan nominal motor 6930 rpm pada motor-1 dan 6420 rpm untuk motor-2.

Selanjutnya pada motor, servo-amplifier ADS 4-Q-DC digunakan untuk mengontrol arus ke motor DC sebagai penentu kecepatan dan torsi motor.

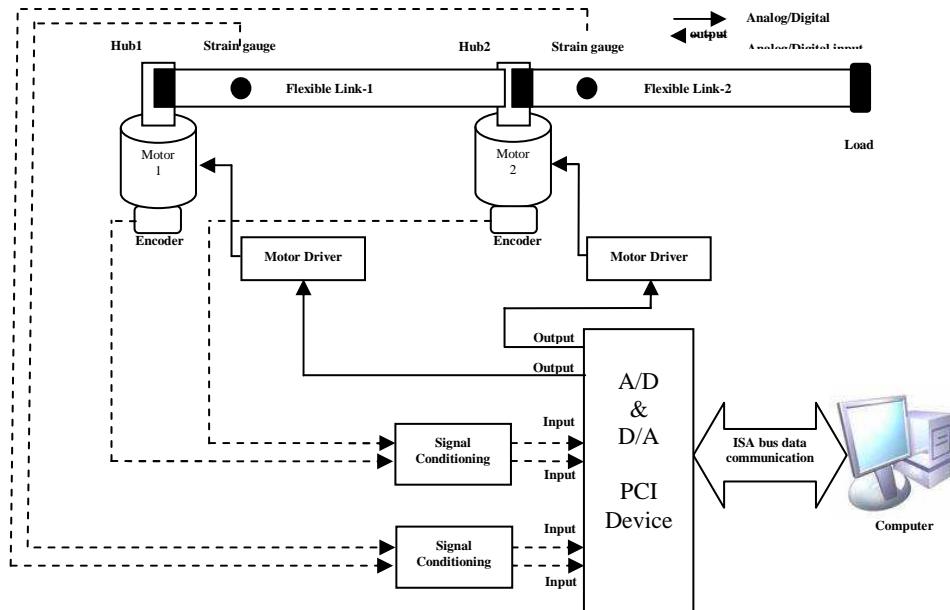
Dalam karya ini, Matlab Real-Time toolbox digunakan untuk real-time interfacing dan sistem kendali. Prosesor yang digunakan untuk pengujian ini adalah Pentium (R) Dual CPU E2140 dengan kecepatan 1,60 GHz. Akuisisi data dan kendali yang dicapai melalui pemanfaatan PCI6221 input/ output yang menyediakan antarmuka langsung antara prosesor, aktuator dan sensor melalui rangkaian elektronika pengkondisi sinyal SCC-AI untuk input analog, SCC-AO untuk output analog dan SCC-SG untuk pengukur regangan (strain-gauge). Pengujian ini membutuhkan dua-analog output untuk kedua motor dan empat input analog dari encoders dan pengukur regangan untuk kedua link. Gambar 2 menunjukkan diagram skematik pada pengujian ini.

## Metode Pengujian

Sistem nonlinier robot lengan lentur dua-link merupakan sistem terdistribusi-parameter yang dapat diuraikan melalui model matematika dimensi terbatas. Metode desain sistem pengendali sering membutuhkan waktu komputasi yang banyak bila sistemnya adalah sistem dengan kompleksitas tinggi. Dalam prakteknya, pengurangan orde pada model sistem digunakan untuk memudahkan terhadap keterbatasan komputasi (Ho dan Tu, 2006). Pada bagian ini, sistem identifikasi digunakan untuk membangun sebuah model linier dari sistem nonlinier. Sistem dengan model linier dan pembatasan ketidakpastian dapat digunakan untuk sintesis sistem kendali. Sebuah model nonlinear dari manipulator fleksibel telah diturunkan berdasarkan metode modus asumsi (M. Khairudin, dkk., 2010). Meskipun model teoritis sulit untuk benar-benar menggambarkan perilaku dinamis dari sistem, selanjutnya hasil sistem identifikasi ini sebagai landasan dalam mendesain sistem kendali.

Dengan menggunakan software matlab dan juga pemilihan data sinyal input akan dilakukan sistem identifikasi pada sistem nonlinear untuk mendapatkan data stimulasi dan respon sehingga didapatkan model linier sistem. Sistem linear kemudian dapat dimanfaatkan untuk pengembangan algoritma kontrol sistem pada robot

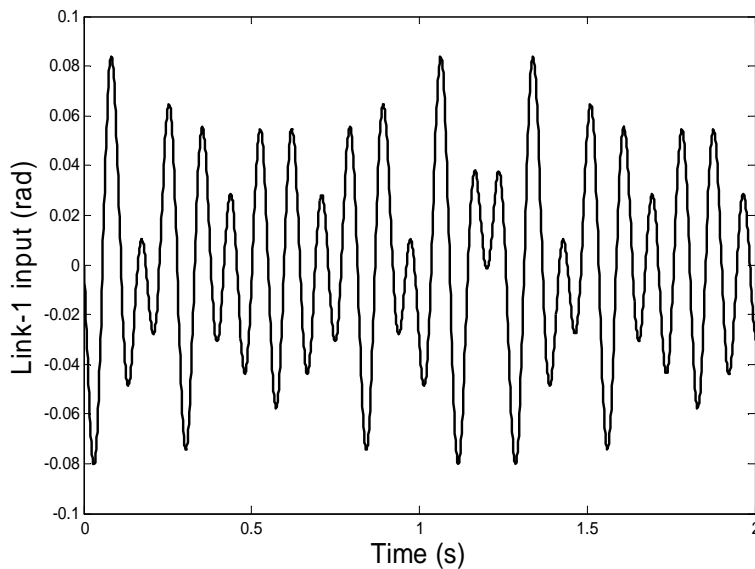
lengan lentur dua-link. Kasus vibrasi yang terjadi pada robot lengan robot paling banyak terjadi vibrasi pada mode satu dan mode dua.



Gambar 2. Skematik robot lengan lentur dua-link

**Hasil dan Pembahasan**

Pada pengujian ini input yang digunakan dalam sistem identifikasi adalah sinyal multisine yang terdiri dari sinusoid dengan amplitudo dan frekuensi sehingga membentuk sinyal yang akurat sebagai input. Dalam karya ini, sinyal secara teliti disesuaikan untuk memberikan kecepatan operasi yang rendah dan akurat untuk melakukan identifikasi sistem nonlinier. Pada proses sistem identifikasi ini menggunakan model input dengan bentuk multisine input. Dengan menggunakan model multisine input yang sesuai dengan amplitudo dan frekuensinya maka diharapkan akan didapatkan model yang sesuai dengan sistem dinamika pada model non-linear. Gambar 3. menunjukkan sinyal input multisine yang digunakan dalam pengujian ini.



Gambar 3. Sinyal Input Multisine

Berdasarkan input dan output data, dengan menggunakan teknik kuadrat terkecil untuk melakukan identifikasi parameter dari model fungsi alih. Untuk sistem tanpa payload, model order-enam diidentifikasi dari link-1 yang berhubungan keluaran hub posisi sudut ke input tegangan diperoleh sebagai

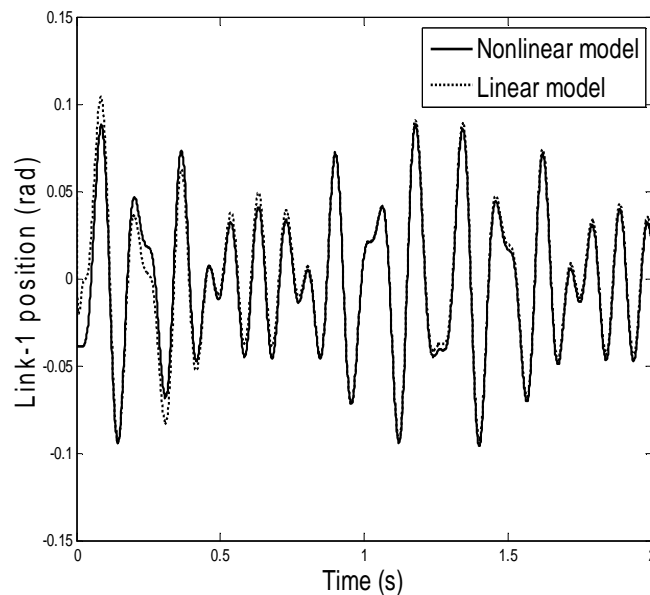
$$G_{11}(s) = \frac{-58.9s^5 - 807s^4 - 3301.1s^3 - 3330s^2 + 1991.8s + 3605.9}{s^6 + 21.7s^5 + 196s^4 + 926.9s^3 + 2261.3s^2 + 2292.1s + 704}$$

dan fungsi alih untuk link-2 dengan keadaan tanpa beban adalah

$$G_{21}(s) = \frac{-84.1s^5 - 840.9s^4 - 2571.1s^3 - 2782.5s^2 - 1080.3s - 91.2}{s^6 + 10.9041s^5 + 50.9482s^4 + 113.1691s^3 + 112.1175s^2 + 47.4569s + 6.8364}$$

Dengan prosedur yang sama maka didapatkan model matematika yang berupa fungsi alih untuk robot lengan lentur dua-link dengan kondisi membawa beban.

Tingkat akurasi dan validasi model dilakukan dengan cara penerapan model dan memverifikasi hasil pemodelan dengan membandingkan output yang diprediksi dan output dari sistem nonlinier. Gambar 4 menunjukkan output sistem yang diprediksi dan output sistem nonlinier untuk respon hub posisi sudut link-1 robot lengan lentur dari manipulator. Kedua output yang ditemukan hampir sama dengan tingkat pencocokan dari 94%. Selain itu, output sistem yang diprediksi dan output sistem nonlinier dari posisi hub sudut link-2 robot lengan lentur dari manipulator dengan derajat kesamaan hingga 96%. Keakuratan model selanjutnya diverifikasi dengan respon sistem pada tiap link. Dengan demikian, telah didapatkan model yang dapat digunakan untuk mendesain sistem kendali.



Gambar 4. Perbandingan Model linier dan model non-linear pada lengan-1.

## Kesimpulan

Hasil sistem identifikasi menunjukkan kesamaan hingga mencapai yang mendekati akurat antara sistem hasil identifikasi (sistem linear) dengan sistem nonlinier. Sehingga sistem linear ini dapat digunakan secara masif dalam desain sistem kendali yang berbasis model maupun berbasis analisis matematika.

**Daftar Pustaka**

- Alam, M. S. and Tokhi, M. O. (2007). Design of a Command Shaper for Vibration Control of Flexible Systems: A Genetic Algorithm Optimisation Approach. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 26(4): 295–310.
- Ho, M. T. and Tu, Y. W. (2006). Position Control of a Single-Link Flexible Manipulator using  $H_\infty$  Based PID Control. *IEE Proc. Control Theory and Applications*, 153(5): 615-622.
- Khairudin, M., Mohamed, Z., Husain, A. R. and Ahmad, A. (2010). Dynamic Modelling and Characterisation of a Two-Link Flexible Robot Manipulator. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 29(3): 207-219.
- Martin, J. M., Mohamed, Z., Tokhi, M. O., Sa da Costa, J. and Botto, M. A. (2003). Approaches for Dynamic Modelling of Flexible Manipulator Systems. *IEE Proc. Control Theory Application*. 150(4): 401-411.
- Pratiher, B. and Dwivedy, S. K. (2007). Non-Linear Dynamics of a Flexible Single Link Cartesian Manipulator. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 42: 1062- 1073.
- Tokhi, M. O. and Azad, A. K. M. (1997). Design and Development of an Experimental Flexible Manipulator System. *Robotica*.15(3): 283-292.