

## Perencanaan dan Pembuatan Sistem Kontrol Pada Flexible Fixture Berbasis Mikrokontroler

Sampurno

Jurusan Teknik Mesin FTI - ITS  
Komplek ITS Blok U - 64 Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111  
E-mail sampurnoits@yahoo.com

### Abstrak

Perkembangan dunia industri yang sangat pesat saat ini, memberikan kesempatan yang lebih baik untuk mengembangkan sistem kontrol pada proses pemesinan yang dapat menunjang proses produksi komponen. Untuk menghasilkan produk dengan ketelitian yang tinggi, salah satunya dapat dilakukan dengan cara mengembangkan teknologi pemesinan berbasis kontrol. Dalam penelitian ini akan dirancang dan dibuat sebuah flexible fixture berbasis mikrokontroler, yang diharapkan dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produk hasil proses pemesinan yang menggunakan flexible fixture ini. Metodologi yang digunakan pada penelitian ini meliputi studi literatur, studi lapangan, perancangan sistem kontrol pada flexible fixture, analisa sistem kontrol flexible fixture dan pada pengaman flexible fixture serta evaluasi kinerja sistem kontrol. Studi literatur dibutuhkan untuk mencari dasar-dasar teori tentang permasalahan dan pendukung yang dapat membantu memperjelas sehingga penelitian lebih terarah serta mempunyai acuan untuk proses analisis selanjutnya. Sedangkan pada studi lapangan diperlukan untuk mendapatkan data-data aktual yang berkaitan dengan sistem flexible fixture yang akan dirancang. Pada perancangan sistem kontrol flexible fixture dilakukan perancangan dan perakitan komponen-komponen sistem kontrol seperti catu daya, switching device, mikrokontroler, motor stepper dan lain-lain. Pada tahap analisa sistem kontrol flexible fixture berbasis mikrokontroler menggunakan perangkat lunak codevision AVR untuk mengontrol kemiringan dan rotasi flexible fixture. Analisa kepresisian setiap step dari motor stepper dilakukan dengan cara kalibrasi terhadap putaran motor stepper. Sedangkan pada analisa sistem kontrol pengaman kerja flexible fixture hanya menguji kestabilan sistem kontrol dalam frekuensi domain yang meliputi kestabilan Nyquist, Routh Hurwitch, serta metode Root locus. Dan evaluasi kinerja sistem kontrol dalam time domain dengan bantuan perangkat lunak Toolbox simulink pada MATHLAB. Hasil akhir yang didapatkan dari perencanaan dan pembuatan ini adalah alat bantu proses pemesinan berupa flexible fixture beserta sistem kontrolnya, flexible fixture beserta gambar teknik siap untuk diproduksi. Sedangkan pembuatan sistem kontrol pada flexible fixture yang dihasilkan mencakup pemrograman dan perakitan komponen sistem kontrol. Hasil analisa kestabilan pada pengaman kerja flexible fixture menghasilkan sistem kontrol yang stabil, Hal ini tampak dari diagram Nyquist yang memperlihatkan bahwa grafik tersebut tidak mengelilingi nilai  $-1$ , dari analisa dengan metode Routh Hurwitch terlihat bahwa tidak terjadi perubahan tanda pada kolom pertama sehingga tidak ada akar positif, sedangkan dengan metode Root Locus menghasilkan akar-akar karakteristik  $-295.224$  dan  $-104.776$ . Dari ketiga metode tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol dalam keadaan stabil absolut. Dengan metode State Space dengan input step menghasilkan Time Respon dengan nilai rise time =  $0,0103s$ , settling time =  $0,0158s$ , peak time =  $0,0223s$  dan persen overshoot =  $1,19\%$ . Dengan allowable error  $2\%$ , terlihat sistem kontrol mempunyai kriteria unjuk kerja yang baik.

**Keywords:** Flexible Fixture, Mikrokontroler, Motor Stepper, Time Domain, Allowable Error.

### Pendahuluan

Dengan semakin majunya perkembangan teknologi saat ini maka diperlukan usaha-usaha untuk mengembangkan teknologi manufaktur di industri, salah satunya dengan membuat flexible fixture yang berbasis mikrokontroler. Bila perencanaan dan pembuatan flexible fixture dapat terealisasi, maka dapat dipastikan proses produksi akan lebih efisien dengan biaya yang lebih murah dengan kualitas yang

lebih baik, dan kuantitas yang lebih besar. Sehingga dapat diperoleh keuntungan yang lebih besar.

Perencanaan proses dilakukan untuk menerjemahkan informasi rancangan produk ke dalam tahapan manufaktur. Pengembangan Computer Aided process Planning (CAPP) dimaksudkan untuk menjembatani kesenjangan yang terjadi antara Computer Aided Design (CAD) dengan Computer Aided Manufacturing (CAM). Perancangan flexible fixture merupakan salah satu tahapan yang harus dilakukan.

Namun sebagian besar penelitian dalam CAPP mengabaikan pengaruh perancangan fixture terhadap rancangan produk dan perencanaan proses. Padahal fixture memegang peranan yang sangat penting untuk melakukan proses pemesinan.[1]

Flexible fixture umumnya digunakan sebagai alat pemegang benda kerja pada mesin-mesin tertentu seperti Mesin Frais, EDM, CNC Milling dan Machining Center.

Proses kerja flexible fixture dimulai dengan meletakkan benda kerja diatas fixture kemudian dilakukan pergerakan pada flexible fixture yang dikontrol oleh mikrokontroller yang telah diprogram sebelumnya. Proses pemrograman dilakukan secara langsung pada komputer dengan mengatur kemiringan dan putaran pada fixture sesuai dengan proses pemesinan pada benda kerja yang diinginkan.

Ketelitian saat pengaturan koordinat pergerakan pada flexible fixture yang dalam hal ini dilakukan pada komputer melalui sebuah software sangat penting karena akan berpengaruh pada produk yang dihasilkan. Produk yang dihasilkan harus benar-benar mempunyai kualitas yang sesuai dengan spesifikasi Geometris yang diharapkan. Oleh karena itu kepresisian flexible fixture dan pemrogramannya sangat diperlukan.

## Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

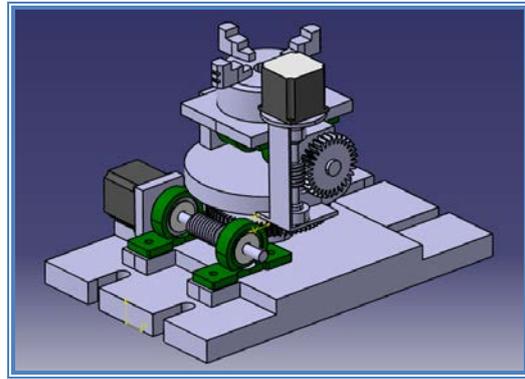
### Metoda Eksperimen Perencanaan dan Pembuatan Flexible Fixture meliputi:

#### Pengumpulan Data

Pada tahap ini data yang dikumpulkan meliputi spesifikasi motor stepper, studi literatur tentang Mikrokontroller, proses Flexible Fixture dan Software Delphi 6.0.

#### Perancangan Flexible Fixture

Rancangan flexible fixture seperti terlihat pada Gambar 1. ini berguna untuk mendapatkan gambaran awal yang dapat digunakan dalam merangkai sistem kontrol flexible fixture berbasis mikrokontroller. Dimana pada rangkaian sistem kontrol ini PC/Laptop akan memberikan data pada mikrokontroller. Setelah itu mikrokontroller akan mengendalikan perputaran dari aktuator (motor stepper), melalui perantara switching device, karena tegangan output dari mikrokontroller hanya 5 V. Switching device berperan sebagai saklar bagi motor stepper yang bertegangan 12 V.[2]



Gambar 1. Flexible Fixture

### Analisa Sistem Kontrol Flexible Fixture dengan Mikrokontroller

Analisa terhadap sistem kontrol yang berada di flexible fixture hanya meliputi analisa kepresisian setiap step dari motor stepper. Pada tahap ini didapatkan informasi tentang tingkat akurasi sistem kontrol pada motor stepper. Proses tersebut dilakukan dengan cara melakukan kalibrasi terhadap perputaran yang dihasilkan oleh motor stepper pada setiap stepnya. Setelah didapatkan hasil dari Kalibrasi tersebut, maka dapat digunakan untuk setting pada software Delphi. Pada saat pengaturan switching device untuk menggerakkan motor stepper pada software Delphi 6.0, akan dihasilkan pergerakan flexible fixture yang sesuai dengan yang diinginkan.[3]

### Analisa Sistem Kontrol Pengaman Flexible Fixture

Pada tahap ini analisa sistem kontrol pengamanan kerja hanya meliputi kestabilan sistem kontrol. Sedangkan informasi tentang kestabilan sistem kontrol didapatkan dengan menggunakan MATLAB, yang berfungsi agar sistem berjalan dengan baik dan stabil kerja sistemnya tanpa ada proses kontrol yang menyimpang dari program maupun kesalahan yang terjadi saat proses pemesinan berlangsung. Dengan software MATLAB dapat membantu menganalisa sistem kontrol dengan memberikan batasan – batasan yang diperlukan.[4]

### Fasilitas Peralatan

#### Catu Daya

Tegangan yang diberikan pada rangkaian elektronika disesuaikan dengan spesifikasi alat, jika tegangan yang diberikan terlalu besar maka peralatan akan cepat rusak. Jika tegangan terlalu kecil maka peralatan elektronik tersebut tidak akan bekerja dengan baik. Tegangan yang dibutuhkan sebesar 12 volt.

Transformator mempunyai fungsi menurunkan tegangan dan mengisolasi hubungan yang tidak stabil yang diberikan oleh PLN. Transformator sebagai penurun tegangan dipilih kumparan primer sebesar 220 volt.

Dioda mempunyai fungsi menyearahkan tegangan AC yang sudah diturunkan pada transformator. Dioda menggunakan pola layang – layang yang menghasilkan penyearah gelombang penuh yang lebih halus.

Gelombang searah yang dihasilkan oleh dioda akan diumpankan pada kondensator yang akan menyimpan muatan untuk sementara waktu. Dengan fungsi yang dapat menyimpan muatan sementara kondensator juga mempunyai fungsi lain yaitu sebagai filter riak dari rectifier sehingga akan menghasilkan tegangan DC yang mendekati tegangan baterai.

### Switching Device

Pada rangkaian switching device terdapat transistor. Transistor yang digunakan adalah type TIP3055 dengan arus maksimal 15 Amp. Transistor tersebut hanya berfungsi sebagai saklar (switching). Karena arus dan tegangan yang dihasilkan oleh mikrokontroler sangat kecil (20 mA), maka tidak dapat digunakan untuk menggerakkan motor stepper yang memerlukan 400 mA. Oleh karena itu diperlukan adanya transistor sebagai saklar. Saat mikrokontroler memberikan logic 1 (5 volt) pada transistor, saklar akan terhubung dan ground pada motor stepper juga akan terhubung. Hal ini akan menyebabkan motor stepper bekerja atas perintah dari mikrokontroler.

### Mikrokontroler

Sebagai otak pengendali dari gerakan motor stepper. Mikrokontroler ini sendiri tidak bisa secara langsung mengontrol dan memberi perintah pada motor stepper, karena arus output dari mikrokontroler hanya sebesar 20 mA. Sedangkan per phase (setiap koil) dari motor stepper membutuhkan arus 400 mA (0.4 A) untuk bisa optimal memutar poros pada motor stepper. Mikrokontroler yang digunakan pada perencanaan ini adalah ATMega 16.

### Motor Stepper

Rangkaian motor stepper bertindak sebagai aktuator dalam perencanaan ini. Motor stepper ini memerlukan tegangan 12 volt dan arus sebesar 400 mA (0.4 A) untuk memutar porosnya. Sedangkan arus output dari mikrokontroler hanya sebesar 20 mA (0.02 A). Dibutuhkan adanya rangkaian switching device untuk mengoperasikan motor stepper. Tingkat ketelitian motor stepper yang digunakan adalah 0.9° pada setiap step/pulsanya.[5]

## Hasil dan Pembahasan

### Hasil Pengujian Kemiringan Flexible Fixture

Pada pengontrolan kemiringan flexible fixture dilakukan dengan perhitungan dan pengamatan secara

manual. Flexible fixture ini mampu memberikan kemiringan 15° CW (Clockwise) dan 15° CCW (Counter Clockwise). Apabila motor stepper memiliki ketelitian 0.9° pada setiap stepnya, maka analisa kontrol pada flexible fixture dapat dilakukan dengan menghitung persentasi error dan tingkat akurasi (%) sudut kemiringan pada flexible fixture.

Tabel 1. Error dan Akurasi Kemiringan Flexible Fixture (Sumbu Y dan X).

Sudut Kemiringan (°)	Ketelitian (°)	Step	Aktual motor stepper (°)	Error (%)	Akurasi (%)
1	0.9	1	0.9	10	90
2	0.9	2	1.8	10	90
3	0.9	3	2.7	10	90
4	0.9	4	3.6	10	90
5	0.9	6	5.4	8	92
6	0.9	7	6.3	5	95
7	0.9	8	7.2	2.857142857	97.14285714
8	0.9	9	8.1	1.25	98.75
9	0.9	10	9	0	100
10	0.9	11	9.9	1	99
11	0.9	12	10.8	1.818181818	98.18181818
12	0.9	13	11.7	2.5	97.5
13	0.9	14	12.6	3.076923077	96.92307692
14	0.9	16	14.4	2.857142857	97.14285714
15	0.9	17	15.3	2	98
Rata-rata				4.690626041	95.30937396
Total (%)				100	

Dari Tabel 1 hasil analisa error dan akurasi kemiringan flexible fixture dapat disimpulkan bahwa ketelitian motor stepper yang hanya 0.9° menyebabkan adanya persentasi error yang bervariasi pada hasil kemiringan dari flexible fixture pada setiap derajatnya, karena kemiringan yang dihasilkan oleh pergerakan motor stepper hanya bisa kelipatan 0.9° pada setiap stepnya. Pada mekanisme gerak kemiringan flexible fixture motor stepper dihubungkan langsung dengan poros pada fixture. Hal ini menyebabkan motor menerima beban saat terjadi proses machining, maka untuk kedepannya pada perancangan konstruksi flexible fixture sebaiknya diberikan sistem pengunci atau diberi mekanisme roda gigi worm (pinion)-gear agar motor tidak menerima beban saat proses machining berlangsung.

### Hasil Pengujian Rotasi Flexible Fixture

Pada pengontrolan rotasi flexible fixture dilakukan dengan perhitungan dan pengamatan secara manual, dalam perhitungan ini diameter worm gear = 40 mm dan diameter gear = 144 mm. Sedangkan kontrol pada rotasi dilakukan dengan menggunakan busur 360° sehingga dihasilkan error dan akurasi pada kontrol rotasi pada flexible fixture.

Rotasi yang dihasilkan pada flexible fixture adalah 360°, dengan pembagian 180° CW (Clockwise) dan 180° CCW (Counter Clockwise).

Tabel 2. Error dan Akurasi Rotasi Flexible Fixture (Sumbu Putar).

Rotasi flexible fixture (°)	Rotasi motor stepper (°)	Ketelitian (°)	Step	Actual motor stepper (°)	Error (%)	Akurasi (%)
5	18	0.9	20	18	0	100
10	36	0.9	40	36	0	100
15	54	0.9	60	54	0	100
20	72	0.9	80	72	0	100
25	90	0.9	100	90	0	100
30	108	0.9	120	108	0	100
35	126	0.9	140	126	0	100
40	144	0.9	160	144	0	100
45	162	0.9	180	162	0	100
50	180	0.9	200	180	0	100
55	198	0.9	220	198	0	100
60	216	0.9	240	216	0	100
65	234	0.9	260	234	0	100
70	252	0.9	280	252	0	100
75	270	0.9	300	270	0	100
80	288	0.9	320	288	0	100
85	306	0.9	340	306	0	100
90	324	0.9	360	324	0	100
95	342	0.9	380	342	0	100
100	360	0.9	400	360	0	100
105	378	0.9	420	378	0	100
110	396	0.9	440	396	0	100
115	414	0.9	460	414	0	100
120	432	0.9	480	432	0	100
125	450	0.9	500	450	0	100
130	468	0.9	520	468	0	100
135	486	0.9	540	486	0	100
140	504	0.9	560	504	0	100
145	522	0.9	580	522	0	100
150	540	0.9	600	540	0	100
155	558	0.9	620	558	0	100
160	576	0.9	640	576	0	100
165	594	0.9	660	594	0	100
170	612	0.9	680	612	0	100
175	630	0.9	700	630	0	100
180	648	0.9	720	648	0	100
Rate - rata (%)					0	100
Total (%)						100

Dari Tabel 2 hasil analisa rotasi flexible fixture dapat disimpulkan bahwa tidak ada error yang terjadi dan tingkat akurasi 100%. Hal ini disebabkan karena adanya mekanisme worm-gear yang memiliki ratio yang sama dengan kelipatan dari tingkat ketelitian motor stepper sebagai penggerak yaitu 0.9°.

Pada gerak rotasi flexible fixture terdapat mekanisme worm-gear. Hal ini menyebabkan tidak ada beban tambahan pada motor stepper yang terhubung dengan worm gear sebagai pinion.

**Pemodelan Diagram Blok.[6]**

Mikrokontroler di dalam software simulink MATLAB mempunyai nilai gain 5, karena tegangan keluaran yang diberikan ke sistem sebesar 5 V.

Switching Device merupakan komponen yang berfungsi untuk mengendalikan motor stepper agar dapat bekerja. Cara kerja switching device ini seperti halnya saklar on-off yang pada prinsipnya akan mensuplai arus ke motor stepper jika transistor dalam kondisi ON dan akan memutus arus jika dalam kondisi OFF.

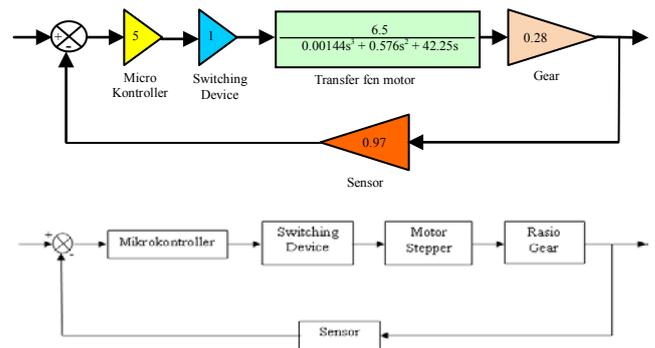
Rangkaian motor stepper terdiri atas dua bagian, yaitu listrik dan mekanik. Pada bagian listrik terdapat resistansi dan induktansi, sedang bagian mekanik ditunjukkan oleh perputaran dari rotornya. Pada gerak

rotasi terdapat 2 elemen yang berhubungan yaitu momen inersia dan torsi.

Nilai gear yang digunakan adalah 0.28 dengan asumsi diameter worm gear = 40 mm dan diameter gear = 144 mm. Dimana 360° putaran motor stepper = 100° putaran flexible fixture.

Sensor yang digunakan adalah photodiode dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Sensor ini digunakan sebagai pengaman pada flexible fixture. Adapun besar tegangan sensor yang digunakan adalah 0.97 KΩ.

Dari semua persamaan diatas dapat digambarkan model diagram blok seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

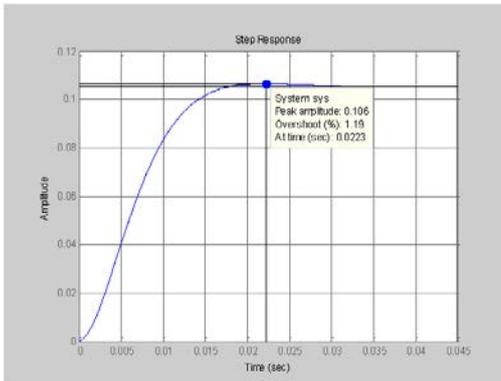
**Evaluasi Performance**

**Sistem Kontrol dengan Metode State Space**

Model state space digunakan untuk membangun suatu representasi yang mempertahankan hubungan fungsi alih, tetapi dinyatakan dalam n buah persamaan differensial orde satu untuk sebuah sistem orde-n. Keuntungan dari n buah persamaan orde satu adalah karakteristik masukan-keluaran dan karakteristik internal dari sistem. Dengan menggunakan MATLAB didapatkan persamaan state space sebagai berikut:

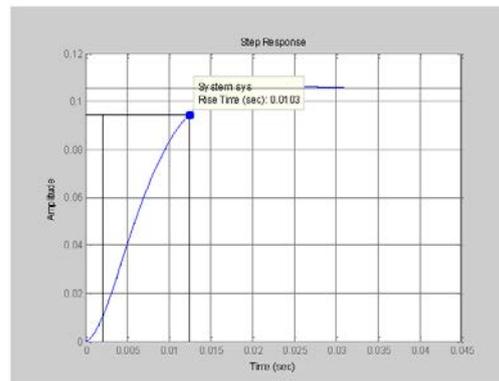
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = 10^4 \begin{bmatrix} -0,04 & -2,9340 & -0,6130 \\ 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0001 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = 10^3 [0 \ 0 \ 1,2639] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0] u$$



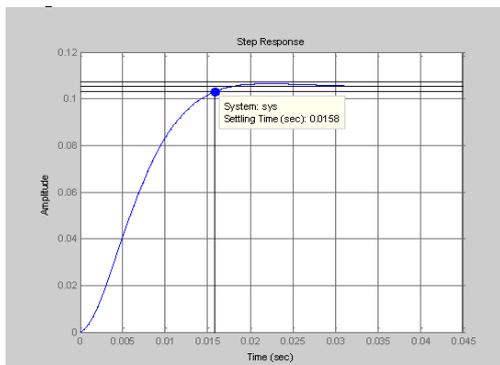
Gambar 3. Hasil Grafik Step Response dengan Metode State Space MATLAB

Pada Gambar 3 hasil step response yang didapat mengalami osilasi, tetapi setelah beberapa saat kemudian sistem akan stabil setelah set point tercapai. Osilasi ini disebabkan karena sistem kontrol yang ada tidak mempunyai redaman (damper), yang mana kontrol flexible fixture memiliki gain yang besar sehingga akan menyebabkan sistem berosilasi dulu sebelum dapat mencapai set point tertentu. Dapat dilihat pada grafik, nilai peak amplitude-nya sebesar = 0,106, dengan overshoot sebesar 1,19 % dan waktu step respon = 0.0223 detik.



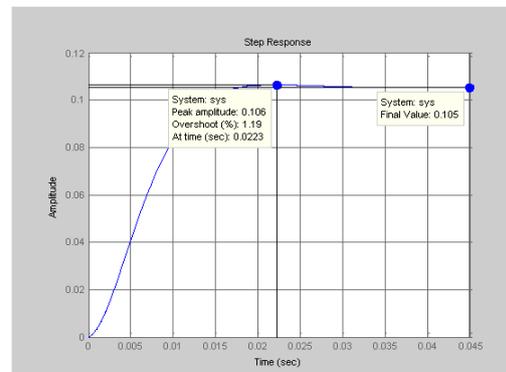
Gambar 5. Hasil Rise Time dari Grafik Step Response dengan Metode State Space

Pada Gambar 5 dengan bantuan MATLAB, didapatkan nilai rise time sebesar = 0,0103 detik. Dalam arti sistem ini akan mulai bekerja setelah 0,0103 detik.



Gambar 4. Hasil Settling Time dari Grafik Step Response dengan metode State Space

Pada Gambar 4 dapat dilihat hasil dari settling time = 0,0158 detik. Hal ini disebabkan karena overshoot yang terjadi masih dalam range error yang diijinkan (allowable error) sebesar 2 %, maka waktu yang diambil adalah saat pertama masuk daerah range allowable error.

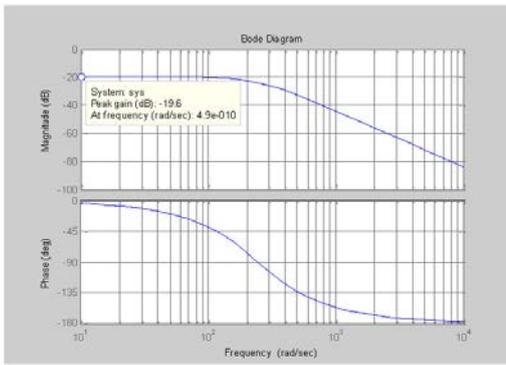


Gambar 6. Hasil %OS dari Maksimum Peak Time Terhadap Steady State dengan Step Respon

Dari Gambar 6 grafik step respon diatas didapatkan nilai overshoot = 1,19 %. Dan nilai tersebut masih dalam range allowable error sebesar 2 % dari kondisi steady state. Overshoot tersebut didapatkan dari jarak puncak dengan posisi kondisi stedy state.

**Analisa Kestabilan Nyquist dan Bode Plot**

Kriteria kestabilan Nyquist adalah kriteria kestabilan yang merelasikan respon frekuensi dari lup dan sangat berguna dalam teknik kontrol karena kestabilan mutlak sistem dapat ditentukan secara grafis, terlebih dahulu mencari Bode Plot untuk mengetahui respon frekuensi yang terjadi dalam sistem, setelah mendapatkan transfer function, maka dapat digambarkan bode diagram yang menunjukkan respon terhadap suatu input tertentu yang merupakan hasil simulasi MATLAB.



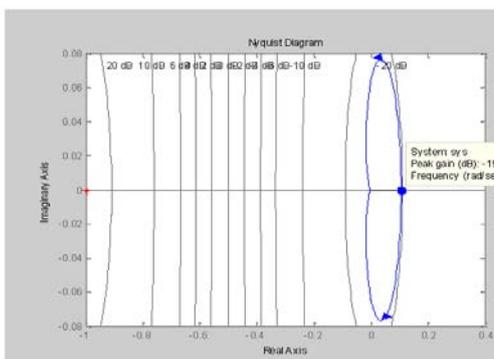
Gambar 7. Hasil Bode Plot

Berikut ini adalah nilai yang dihasilkan dari grafik simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Dan didapatkan nilai overall transfer function sebagai berikut:

$$V(s) = \frac{9,1}{0.00144s^2 + 0.576s + 42,25s + 8.827}$$

Dengan mengganti  $s = j\omega$ , akan diperoleh koordinat segi empat, dimana nilai koordinat adalah:  $a = 0,00016$ ,  $b = 0,063$ , dan  $c = 4,64$ .

Jika  $\omega$  ditentukan  $10^{-1}$ , maka nilai magnitude versus frekuensi adalah  $-15,3475$  dB dan nilai sudut phase versus frekuensi adalah  $-0,0014$  deg. Hasil perhitungan ini dimaksudkan untuk mengetahui batas kondisi magnitude (gain) dan sudut phase difference dimana nilai tersebut bisa digunakan untuk menggambarkan diagram Nyquist. Diagram Nyquist adalah diagram polar yang menyatakan kestabilan sistem dengan batasan tidak boleh mencakup nilai  $-1$  maka sistem kontrol tersebut bisa dinyatakan dalam kondisi yang stabil.



Gambar 8. Diagram Nyquist

Pada Gambar 8. terlihat bahwa pole tidak mengelilingi  $-1$ , sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kontrol flexible fixture yang telah dibuat adalah stabil.

Dengan menggunakan diagram Nyquist dalam mendesain sistem kontrol akan lebih menguntungkan, karena data respon frekuensinya yang dibutuhkan tanpa harus melihat jenis komponen dan persamaan

matematikanya.

**Analisa Kestabilan Absolut Sistem dengan Metode Routh Hurwitch**

Kriteria kestabilan Routh Hurwitch merupakan kriteria kestabilan yang menyatakan kestabilan absolut suatu sistem kontrol. Dimana pada analisa kestabilan absolut Routh Hurwitch menunjukkan ada atau tidak akar-akar dari persamaan karakteristik sistem yang terletak pada sisi sebelah kanan S-plane.

Dalam menganalisa kestabilan ini digunakan kriteria kestabilan ROUTH, dari transfer function diatas dapat disusun koefisien polinomial seperti:

$S^3$	0,00144	42,25
$S^2$	0,576	8,827
$S^1$	42,24	-
$S^0$	8,827	-

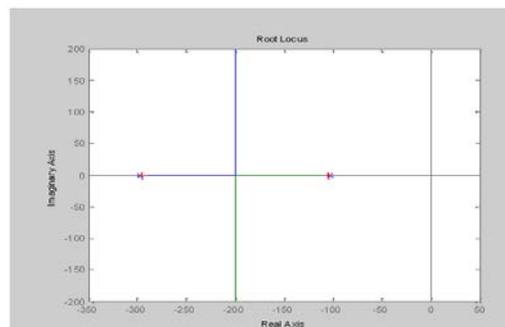
$$S^1 = \frac{0,576 \times 42,25 - 8,827 \times 0,00144}{0.576} = 42,24$$

$$S^0 = \frac{42,25 \times 8,827 - 0}{42.24} = 8,827$$

Pada kolom 1 tidak terjadi perubahan tanda (semua akar positif) maka sistem dapat dikatakan STABIL.

**Analisa Kestabilan Sistem dengan Metode Root Locus**

Kriteria kestabilan menurut Root Locus merupakan metode untuk menganalisis kestabilan suatu sistem terkendali. Akar-akar ini sering disebut kutub. Pada sistem kendali Analog, sistem akan stabil jika letak kutub berada di sebelah kiri sumbu kayal (imaginer), hal ini dikarenakan kutub-kutub ini merupakan akar-akar dari persamaan karakteristik. Pada jenis kendali digital sistem akan stabil jika kutub-kutub berada di dalam lingkaran satuan. Hal ini karena kutub-kutub ini merupakan akar-akar dari persamaan beda. Sistem yang terjadi dalam flexible fixture ini termasuk sistem yang sangat stabil karena kutub-kutubnya berada tepat didalam sumbu-sumbunya, Gambar 9 berikut ini adalah hasil dari analisa Root Locus:



Gambar 9. Hasil dari Analisa Root Locus

Dari kondisi akar-akar yang dihasilkan maka dapat disimpulkan bahwa akar-akar sistem berada pada sumbu-sumbu plane (akar-akar negatif) yang berarti sistem kontrol dalam flexible fixture termasuk stabil absolut.

Perlu diketahui bahwa rise time, settling time, dan peak time memberikan informasi mengenai kecepatan dan kualitas respon transient. Besaran-besaran ini dapat membantu perancang untuk mencapai kecepatan yang diinginkan tanpa osilasi atau overshoot yang berlebihan.

Allowable error mempunyai pengertian bahwa batas error yang diijinkan sebesar 2 %. Kesalahan yang diijinkan ini diukur dari batas atas steady state dan batas bawah steady state.

## Kesimpulan

Ketelitian motor stepper yang hanya  $0.9^\circ$ , menyebabkan adanya persentase error yang bervariasi dengan rata – rata 4.69 % pada hasil kemiringan dari flexible fixture pada setiap derajatnya. Hal ini disebabkan karena kemiringan yang dihasilkan oleh pergerakan motor stepper hanya bisa kelipatan  $0.9^\circ$  pada setiap stepnya. Prosentase akurasi untuk kemiringan flexible fixture sebesar 95.31 %. Terhubungnya langsung motor stepper dengan poros kemiringan fixture, menyebabkan motor menerima beban tambahan pada saat proses machining berlangsung.

Dari hasil analisa rotasi flexible fixture tidak ada error yang terjadi dan tingkat akurasi 100 %. Hal ini disebabkan karena adanya mekanisme worm–gear yang memiliki rasio yang sama dengan kelipatan dari tingkat ketelitian motor stepper sebagai penggeraknya yaitu  $0.9^\circ$ . Mekanisme worm–gear juga dapat berfungsi sebagai pengunci agar saat proses machining berlangsung, motor stepper tidak menerima beban machining.

Sistem kontrol pada flexible fixture mempunyai persamaan ruang keadaan (state space equation).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = 10^4 \begin{bmatrix} -0,04 & -2,9340 & -0,6130 \\ 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0001 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = 10^3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1,2639 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0]_u$$

Matriks transfer diatas dihasilkan dengan asumsi semua disturbance yang ada diabaikan.

Sistem kontrol dalam keadaan stabil absolut setelah dianalisa dengan kestabilan ROUTH HURWITZ ditunjukkan dengan akar – akar sistem berada pada sisi kiri S-plane yang berarti sistem dalam kondisi stabil

absolut. Akar – akar karakteristik dari transfer function adalah  $-295.224$  dan  $-104.776$ .

Hasil simulasi MATLAB dengan metode state space menghasilkan grafik step respon dengan nilai rise time = 0,0103s, settling time = 0,0158s, peak time = 0,0223s dan persen overshoot = 1,19 %.

## Ucapan Terima kasih

Terima kasih kepada semua rekan-rekan yang telah membantu dalam pembuatan dan perencanaan flexible fixture ini.

## Nomenklatur

X	state variable
Y	output equation
V	input variable
S	complex variable

## Referensi

- Xu, Chang., Computer Aided Manufacturing (CAM) (2000).
- Deutchman, Aaron, D., Machine Design Theory and Practice, Macmillan Publishing Co Inc, New York (1975).
- Winoto, Ardi., Mikrokontroler AVR ATmega 8/32/16/8535 dan Pemrogramannya dengan Bahasa C pada WinAVR, Informatika, Bandung (2008).
- Robert H., Bishop, Modern Control System Analysis and Design Using MATLAB. The University of Texas at Austin, Texas (1998).
- Ogata, Katsuhiko, Teknik Kontrol Automatik, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta (2002).
- Johnson, Curtis, Process Control Instrumentation Technology, 4<sup>th</sup> edition, Prentice Hall International Inc, New Jersey (1993).