

13989/H/02



# PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG DENGAN CARA PENGATURAN IMPEDANSI PADA MANIPULATOR ROBOT

## TUGAS AKHIR

Disusun oleh :

GIAT M. SIMANJUNTAK

NRP. 2294 100 144

RSE  
629.892  
Sim  
P-1  
2000



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2000**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	03/05/01
Terima oleh	H
No. Agenda	21.3366

**PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG  
DENGAN CARA PENGATURAN IMPEDANSI  
PADA MANIPULATOR ROBOT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian  
Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik Elektro

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

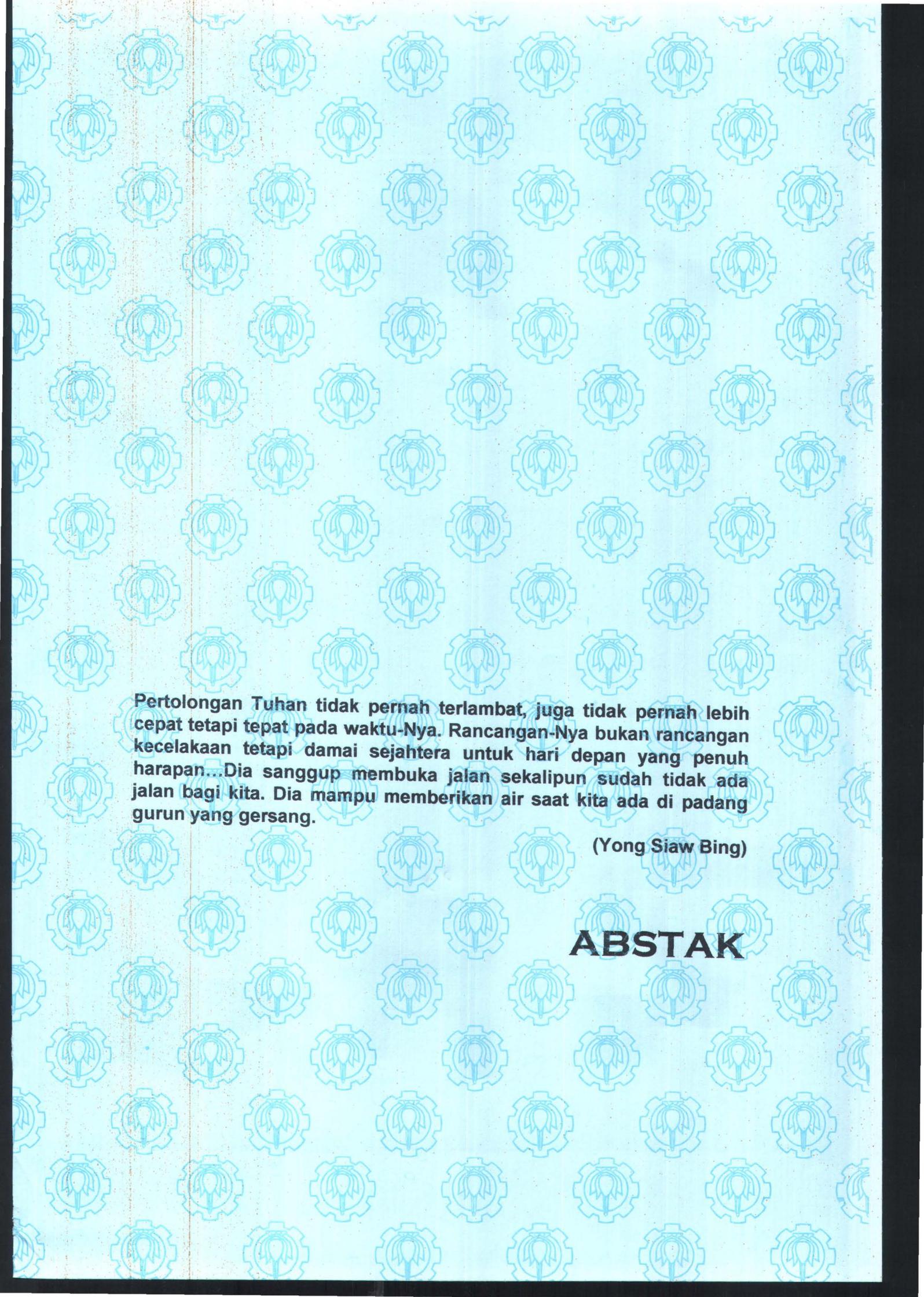
Mengetahui / Menyetujui  
Dosen Pembimbing



**Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.**

NIP. 131 647 788

**SURABAYA  
JULI, 2000**



**Pertolongan Tuhan tidak pernah terlambat, juga tidak pernah lebih cepat tetapi tepat pada waktu-Nya. Rancangan-Nya bukan rancangan kecelakaan tetapi damai sejahtera untuk hari depan yang penuh harapan...Dia sanggup membuka jalan sekalipun sudah tidak ada jalan bagi kita. Dia mampu memberikan air saat kita ada di padang gurun yang gersang.**

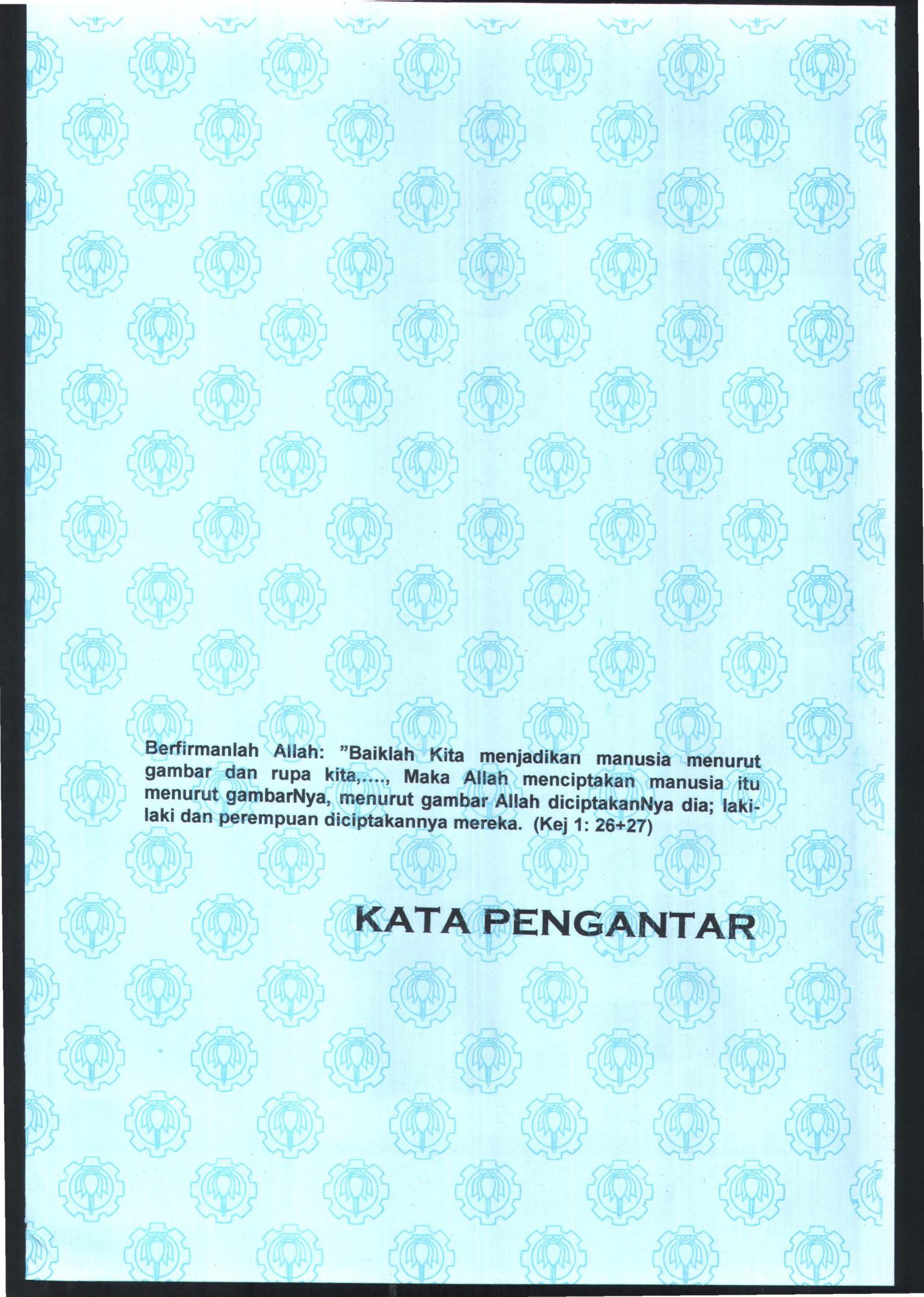
**(Yong Siaw Bing)**

**ABSTAK**

## ABSTRAK

---

Dalam melakukan tugas pemasangan paku kedalam lubang, robot akan melakukan interaksi dengan lingkungan. Kesalahan posisi dan gaya pada proses pemasangan akan sangat mempengaruhi keberhasilan pemasangan. Jika gaya dan posisi yang dihasilkan robot tidak tepat maka akan mengakibatkan kerusakan pada paku dan lubang, sebagai akibat gaya kontak yang berlebihan, sehingga pemasangan akan gagal. Untuk melaksanakan tugas pemasangan tidak cukup dengan menggunakan pengaturan posisi atau gaya saja, tetapi diperlukan juga pengaturan gaya yang timbul akibat interaksi antara robot dengan lingkungan. Pengaturan impedansi adalah salah satu cara yang efektif untuk mengendalikan gaya interaksi antara robot dengan lingkungan. End-effector digerakkan menurut target impedansi yang diinginkan, sehingga kestabilan gerakan selama terjadi interaksi antara end-effector dengan lingkungan akan dapat terjaga.



Berfirmanlah Allah: "Baiklah Kita menjadikan manusia menurut gambar dan rupa kita,...., Maka Allah menciptakan manusia itu menurut gambarNya, menurut gambar Allah diciptakanNya dia; laki-laki dan perempuan diciptakannya mereka. (Kej 1: 26+27)

## **KATA PENGANTAR**

## **KATA PENGANTAR**

---

Segala puji syukur bagi Allah Yang Maha Pengasih, sebab hanya dengan perkenan dan kasihNya semata tugas akhir ini dapat terselesaikan, sesuai dengan waktu yang telah ditentukanNya.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan dalam mendapatkan gelar sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, dengan bobot 4 SKS, dengan judul:

### **PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG DENGAN CARA PENGATURAN IMPEDANSI PADA MANIPULATOR ROBOT**

Dalam menyusun tugas akhir ini penulis telah banyak mengalami permasalahan-permasalahan yang telah membuat penulis semakin mengerti dan memahami prinsip kerja robot, khususnya pada tugas pemasangan. Penulis telah berusaha sebaik mungkin menyusun pengertian-pengertian tersebut pada tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi almamater tercinta, terutama rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, bangsa dan negara.

Surabaya, Juli 2000

Penulis.

Semua orang telah menyeleweng, mereka semua tidak berguna, tidak ada yang berbuat baik, seorangpun tidak... Karena semua orang telah berbuat dosa dan telah kehilangan kemuliaan Allah, (Rm 3: 12+23)

**UCAPAN TERIMA KASIH**

## UCAPAN TERIMA KASIH

---

Puji syukur yang tak terhingga penulis sampaikan kepada Allah Yang Mahakasih semata, karena hanya dengan ijin dan kehendak-Nya sajalah tugas akhir ini dapat terselesaikan. Saya juga mengucapkan terima kasih yang sebanyak-banyak kepada :

1. Bapak, Ibu, dan seluruh keluarga tercinta yang sangat membantu dengan dorongan moral, doa, dana, dan pengertiannya.
2. Bapak Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan pengarahan dan bimbingan, serta selaku ketua jurusan Teknik Elektro FTI – ITS.
3. Bapak Dr. Ir. Moch. Rameli selaku Ketua Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan serta dosen-dosen, yang telah banyak membantu, dan atas segala fasilitas yang telah saya pergunakan.
4. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK, M.T. selaku dosen wali penulis atas setiap waktu dan dorongan yang diberikan kepada penulis.
5. Seluruh dosen dan karyawan di JTE – FTI ITS, yang telah mendidik dan membantu penulis selama kuliah.
6. Rekan-rekan di Laboratorium TSP yang memberikan kelonggaran untuk tidak terus jadi asisten praktikum, dan atas segala kebersamaannya, semoga sukses selalu.

7. Teman-teman dipersekutuan mahasiswa kristen ITS, yang telah banyak membantu saya dalam bertumbuh, atas segala kritik, teguran, kasih, kebersamaan, persaudaraan. dan doanya.
8. Teman-teman di Intensiv E: Anjar H, Adi D, Ari W, Deddy S, Dikky, Evin S, Exa, Freidrik HCKN, Helmi, Indar, Jimmi, Joice, Nikolina, Rini, Vera, Wily, dan Yudha, atas kasih kebersamaan, doa, dan perhatiannya.
9. Teman-teman di satu kontrakan di Kejawan I no. 18, Agung, Evin, Exa, dan Halim, terima kasih atas persahabatan diwaktu susah dan senang, kebaikan teman-teman tidak akan terlupakan, semoga sukses dalam menggapai cita-cita.
10. Bapak Ir. Wasis, M.Eng. yang telah memberikan rumahnya secara gratis untuk saya tempati dari akhir tahun 1996 sampai dengan pertengahan tahun 1998.
11. Tak lupa juga terima kasih kepada **Ernawati** atas kasih sayang dan perhatiannya, yang dengan setia menemani disaat susah dan senang, kehadiranmu dihidupku sunngguh merupakan karunia yang sangat besar.
12. Dan semua pihak yang tidak dapat disebut satu per satu disini.

Semoga Allah yang maha pengasih membalas budi baik bagi yang telah membantu saya, baik secara langsung maupun tidak langsung.

**Jadi bagaimana? Adakah kita mempunyai kelebihan dari pada orang lain? Sama sekali tidak. Sebab di atas telah kita tuduh baik orang Yahudi, maupun orang Yunani, bahwa mereka semua ada di bawah kuasa dosa,**

**(Rm 3: 9)**

## **DAFTAR ISI**

## DAFTAR ISI

---

JUDUL	<i>i</i>
PENGESAHAN	<i>ii</i>
ABSTRAK	<i>iii</i>
KATA PENGANTAR	<i>iv</i>
UCAPAN TERIMA KASIH	<i>v</i>
DAFTAR ISI	<i>vii</i>
DAFTAR GAMBAR	<i>x</i>
BAB I     PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metode Penelitian	2
1.5 Sistematika Pembahasan	3
1.6 Relevansi	4
BAB II    TEORI PENGATURAN IMPEDANSI ROBOT	
2.1 Pengaturan Impedansi Robot	6
2.2 Implementasi Pengaturan Impedansi Robot	10
2.3 Transformasi Gaya dan Moment	13
BAB III   STRATEGI DAN TAHAPAN PEMASANGAN	

3.1	Persamaan Dinamik Robot Planar Dua Link	19
3.2	Tahap Pendekatan	23
3.3	Tahap Pergeseran	24
3.4	Tahap Penyisipan	25
3.4.1	Sub-tahap bebas bergerak	25
3.4.2	Sub-tahap satu titik kontak	25
3.4.3	Sub-tahap dua titik kontak	26
3.4.4	Sub-tahap terdesak	27
3.4.5	Sub-tahap pemasukan	28
3.5	Algoritma Pemasangan	28
BAB IV	PERENCANAAN TRAYEKTORI PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG	
4.1	Bentuk Lintasan Robot	31
4.2	Perencanaan Gerakan End-effector	32
4.3	Persamaan Polinomial Orde Lima	33
BAB V	ANALISA HASIL SIMULASI	
5.1	Gerak dari Posisi Diam Menuju Titik Kontak	38
5.2	Gerak dari Titik Kontak Menuju Ujung Sisi Miring Lubang	40
5.3	Gerak dari Ujung Sisi Miring Lubang Menuju Ujung Lubang	41
5.4	Gerak dari Ujung Lubang ke Dasar Lubang	45
5.5	Parameter Impedansi	47

BAB IV	PENUTUP	
6.1	Kesimpulan	48
6.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA		49
RIWAYAT HIDUP		51

**Sebab karena kasih karunia kamu diselamatkan oleh iman; itu bukan hasil usahamu, tetapi pemberian Allah, itu bukan hasil pekerjaanmu: jangan ada orang yang memegahkan diri. (Ef 2 : 8-9)**

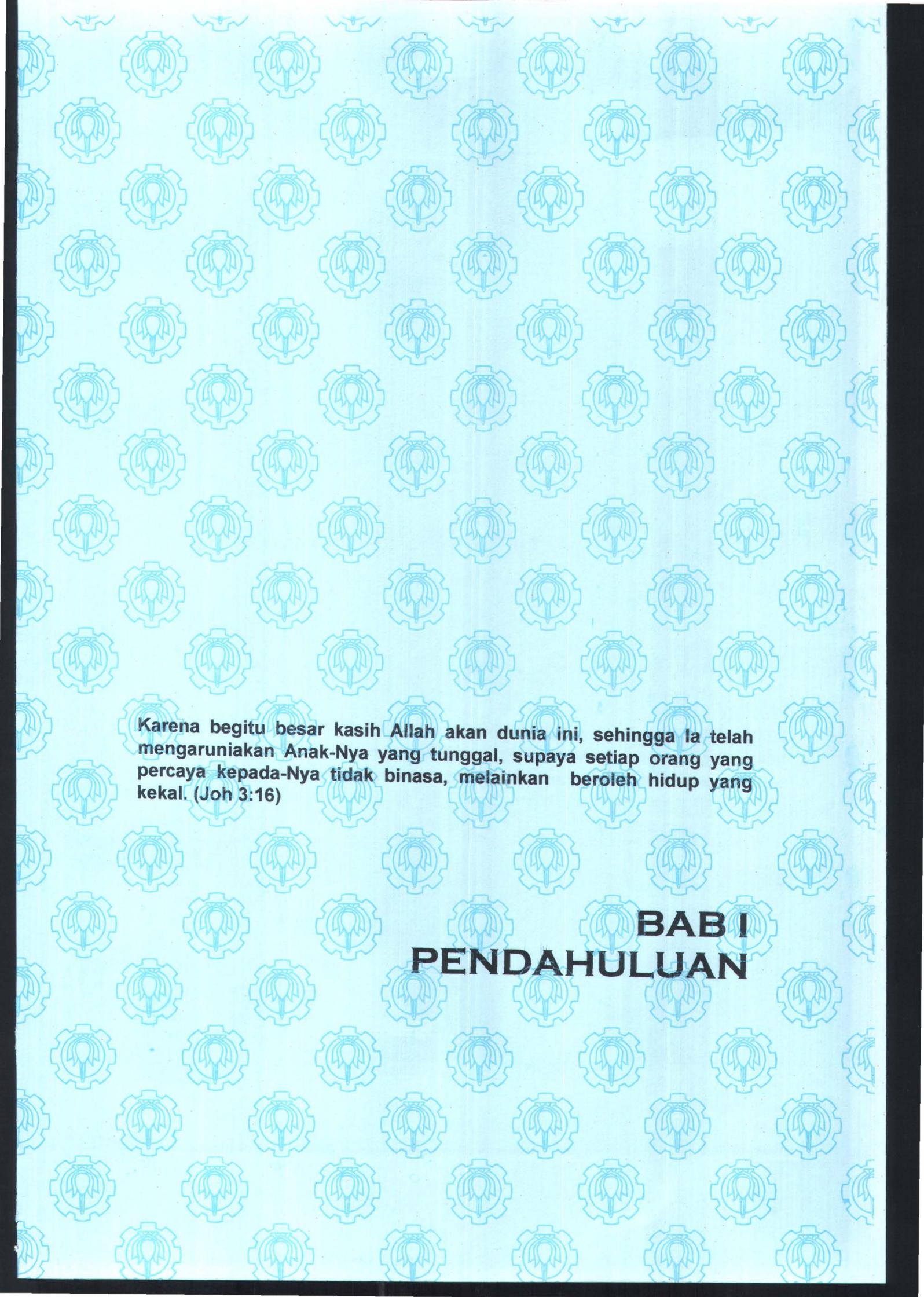
## **DAFTAR GAMBAR**

## DAFTAR GAMBAR

---

<i>Gambar 2.1</i>	Blok diagram pengaturan impedansi manipulator robot	12
<i>Gambar 2.2</i>	Transformasi ujung paku relatif terhadap <i>end-effector</i> .	15
<i>Gambar 3.1</i>	Pemasangan paku pada lubang	18
<i>Gambar 3.2</i>	Paku melintasi bidang miring lubang (sub-tahap bebas bergerak)	25
<i>Gambar 3.3</i>	Sub-tahap satu titik kontak	26
<i>Gambar 3.4</i>	Sub-tahap dua titik kontak	27
<i>Gambar 3.5</i>	<i>Flow cart</i> tahapan pemasangan	29
<i>Gambar 4.1</i>	Lintasan <i>end-effector</i> untuk pemasangan	31
<i>Gambar 4.2</i>	Blok diagram pengaturan gerakan dalam koordinat Cartesian	32
<i>Gambar 5.1</i>	Grafik lintasan <i>end-effector</i> manipulator robot	37
<i>Gambar 5.2</i>	Keadaan awal robot terhadap lubang	37
<i>Gambar 5.3</i>	Hasil simulasi tahap gerakan menuju titik kontak	38
<i>Gambar 5.4</i>	Posisi Y <i>end-effector</i> hasil simulasi	38
<i>Gambar 5.5</i>	Posisi Z <i>end-effector</i> hasil simulasi	39
<i>Gambar 5.6</i>	Sudut joint 1, 2 dan 3 hasil simulasi	39
<i>Gambar 5.7</i>	Simulasi robot gerakan menuju bidang miring lubang	40
<i>Gambar 5.8</i>	Posisi Y <i>end-effector</i> hasil simulasi	40

<i>Gambar 5.9</i>	Posisi Z end-effector hasil simulasi	41
<i>Gambar 5.10</i>	Sudut Joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi	41
<i>Gambar 5.11</i>	Posisi awal saat bergerak melalui bidang miring	42
<i>Gambar 5.12</i>	Hasil simulasi gerakan melalui bidang miring lubang	42
<i>Gambar 5.13</i>	Posisi Y end-effector hasil simulasi	43
<i>Gambar 5.14</i>	Posisi Z end-effector hasil simulasi	43
<i>Gambar 5.15</i>	Sudut joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi	44
<i>Gambar 5.16</i>	Hasil simulasi fisik kondisi awal tahap memasukkan	44
<i>Gambar 5.17</i>	Posisi Y end-effector hasil simulasi	45
<i>Gambar 5.18</i>	Posisi Z end-effector hasil simulasi	45
<i>Gambar 5.19</i>	Sudut joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi	46
<i>Gambar 5.20</i>	Simulasi gerak fisik pada tahap penyisipan	46
<i>Gambar 5.21</i>	Posisi akhir pemasangan	47



Karena begitu besar kasih Allah akan dunia ini, sehingga Ia telah mengaruniakan Anak-Nya yang tunggal, supaya setiap orang yang percaya kepada-Nya tidak binasa, melainkan beroleh hidup yang kekal. (Joh 3:16)

## **BABI PENDAHULUAN**

# BAB I

## PENDAHULUAN

---

### 1. 1 LATAR BELAKANG

Pemasangan paku pada lubang bukan saja merupakan permasalahan yang sangat lama pada industri robot tetapi lebih lagi merupakan dasar otomasi dari tugas pemasangan dua benda kaku. Saat ini proses pemasangan sangat banyak digunakan dalam bidang industri antara lain pemasangan komponen elektronik pada papan rangkaian yang telah tersedia..

Salah satu permasalahan yang sering ditemukan pada proses pemasangan ini adalah adanya gaya kontak antara benda yang dipasang, yang sangat mempengaruhi keberhasilan pemasangan. Sistem pengaturan impedansi adalah salah satu cara yang sudah dipakai untuk meningkatkan keberhasilan pemasangan.

Berbeda dengan sistem pengaturan posisi (Eric Paulos and John Canny, 1994), gaya atau gabungan keduanya (*hybrid force-position control*) (Yangmin Li, 1997) , yang tidak memperhatikan gaya kontak yang diberikan oleh permukaan lubang (*environment*), sistem pengaturan impedansi ini lebih menitik beratkan pada pengendalian gaya kontak dengan lingkungan. Dengan sistem pengaturan impedansi ini diharapkan gaya kontak yang berlebihan antara benda yang dipasang tidak terjadi, sehingga kerusakan pada keduanya dapat dihindari.

Pada tugas akhir ini akan dibahas proses pemasangan paku pada lubang, dimana hal ini selain melibatkan permasalahan pengaturan impedansi juga

melibatkan transformasi antara ujung paku dengan end-effector, dimana posisi dan gaya yang diinginkan selalu diukur dari ujung paku, sehingga hal ini perlu ditransformasikan pada end-effector supaya selanjutnya dapat diteruskan mengikuti perhitungan persamaan-persamaan dinamik manipulator.

## **1.2. PERUMUSAN MASALAH**

Masalah yang hendak diselesaikan dalam tugas akhir ini, adalah: penggunaan teori pengaturan impedansi pada pemasangan paku kedalam lubang untuk mengatasi terjadinya kerusakan pada paku dan lubang akibat kesalahan posisi dan gaya.

## **1.3. TUJUAN**

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengembangkan teknik pemasangan paku pada lubang dengan teknik pengaturan impedansi sehingga diharapkan tingkat keberhasilan pemasangan yang lebih baik.

## **1.4. METODE PENELITIAN**

Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan studi pustaka melalui pengumpulan literatur yang sesuai dan mempelajari beberapa metode yang pernah digunakan dalam penyelesaian pemasangan dua buah benda kaku. Kemudian metode pengendalian yang sudah ada dikembangkan secara lebih khusus dalam tugas akhir ini. Hal ini menyangkut kespesifikan topik yang diusulkan. Pengujian melalui simulasi dimaksudkan untuk mengetahui dan merepresentasikan algoritma

yang diusulkan, merupakan langkah selanjutnya, sebelum menarik kesimpulan dan saran terhadap perkembangan penelitian permasalahan pemasangan di kemudian hari.

## **1.5 SISTEMATIKA PEMBAHASAN**

Supaya pembaca dapat memahami secara terstruktur dan menyeluruh maksud penulis, yang tertulis dalam buku ini, penulis menyajikan dengan sistematika sebagai berikut:

### **Bab 1 Pendahuluan**

Pada bab ini dibahas mengenai hal-hal yang berkaitan dengan latar belakang munculnya ide untuk melakukan penelitian ini. Kemudian diikuti dengan penjelasan tujuan, relevansi dan permasalahan yang akan dibahas dalam karya Tugas Akhir ini.

### **Bab 2 Teori Pengaturan Impedansi Robot**

Seluruh teori pengaturan impedansi yang terkait dengan materi yang diteliti akan dijelaskan dalam bab ini. Teori yang mendasari penelitian ini meliputi sistem pengaturan impedansi dan dinamika manipulator robot.

### **Bab 3 Strategi dan Tahapan Pemasangan**

Pada bab 3 ini diawali dengan uraian tentang tahapan-tahapan pemasangan, strategi dan algoritma metode yang diusulkan. Pada bab ini diuraikan secara lebih rinci persamaan dinamik dan kendala-kendala pada tiap tahap pemasangan, serta kemungkinan-kemungkinan strategi pemasangan. Untuk memudahkan pembahasan digunakan analisa robot planar dua link.

#### Bab 4 Perencanaan Trayektori Pemasangan Paku kedalam Lubang

Pada bab ini dijelaskan bentuk lintasan robot supaya mengikuti bentuk permukaan lubang, diikuti dengan penjelasan perencanaan pergerakan robot dalam koordinat kartesian. Persamaan orde lima dijelaskan, sebagai persamaan yang digunakan untuk membentuk trayektori yang diinginkan.

#### Bab 5 Analisa dan Simulasi

Agar metode yang telah diusulkan tersebut teruji kebenarannya, maka pada bab ini akan dilakukan pengujian terhadap hasil perhitungan melalui simulasi program komputer.

#### Bab 6 Penutup

Sebagai hasil akhir dari penelitian ini, maka perlu diuraikan kesimpulan yang dapat diambil terhadap penggunaan metode tersebut dan mungkin saran-saran perbaikan yang mungkin untuk diskusi sebagai bahan penelitian selanjutnya.

### 1.6 RELEVANSI

Dari pembahasan tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi sumbangan pemikiran bagi perkembangan ilmu pengetahuan robot di kampus ITS Surabaya, khususnya di laboratorium sistem pengaturan teknik elektro ITS.

Sebab di dalam Dia Allah telah memilih kita sebelum dunia dijadikan, supaya kita kudus dan tak bercacat di hadapanNya. Dalam kasih Ia telah menentukan kita dari semula oleh Yesus Kristus untuk menjadi anak-anakNya, sesuai dengan kerelaan kehendakNya. (Ef 1: 4-5)

## **BAB II**

# **TEORI PENGATURAN IMPEDANSI ROBOT**

## BAB II

### TEORI PENGATURAN IMPEDANSI ROBOT

---

Aplikasi robot pada industri dimana robot tidak diharuskan mengadakan interaksi dengan lingkungannya, dilakukan dengan pengendalian posisi, sebagai contoh adalah pengecatan suatu benda. Dalam hal ini, manipulator tidak perlu mengadakan hubungan langsung dengan obyek yang sedang dimanipulasi. Sehingga pengendalian yang perlu dilakukan adalah pengendalian gerakannya (*motion*), dengan posisi, kecepatan, percepatan sebagai variabel pengendalian (*free motion*).

Untuk tugas yang lain, dimana manipulator menemui batasan-batasan (*constraints*) dalam lingkungannya dan gaya interaksi tidak dapat diabaikan. Dalam hal ini, manipulator harus mengadakan hubungan langsung dengan obyek yang sedang dimanipulasi (*constrained motion*). Sebagai contoh dalam aplikasi memasukkan paku pada lubang, dimana manipulator ditugaskan untuk memasukkan paku kedalam lubang dengan menghindari terjadinya kerusakan pada paku atau lubang. Untuk kasus seperti ini pengendalian manipulator tidak cukup hanya dengan menggunakan pengendalian posisi, akan tetapi juga diperlukan pengendalian gaya. Dalam kasus seperti ini, terdapat dua strategi pengendalian yang paling umum digunakan, yaitu *impedance control* yang menentukan suatu hubungan linier antara torsi/gaya *end-effector* dengan

posisi/orientasi *end-effector* (atau kecepatan *end-effector*) dan *hybrid control* yang merupakan gabungan dari pengendalian gerakan (posisi/orientasi) pada suatu derajat kebebasan yang telah ditentukan dan pengendalian gaya pada tiap derajat kebebasan selanjutnya.

Pada tugas akhir ini yang dibahas adalah perngendalian manipulator dengan pengendalian impedansinya, yang diaplikasikan pada manipulator robot yang ditugaskan memasukkan paku kedalam lubang.

## 2.1. PENGATURAN IMPEDANSI ROBOT

Suatu perbedaan antara pengaturan impedansi dengan pendekatan konvensional dalam pengaturan manipulator adalah bahwa kontroler berusaha mengimplementasikan suatu hubungan dinamik antara variabel-variabel manipulator seperti posisi *end-point* dan gaya antara robot dengan lingkungan daripada hanya mengatur variabel-variabel tersebut secara sendiri-sendiri.

Suku orde terendah dalam setiap impedansi adalah hubungan statik antara gaya output dan input pergeseran, *stiffness*. Dengan asumsi bahwa aktuator mampu menghasilkan gaya atau torsi yang diinginkan,  $\tau$ , sensor mampu memperoleh posisi aktuator atau sudut,  $\theta$ , dan hubungan kinematik murni antara posisi aktuator dengan posisi *end-point*,  $X = L(\theta)$ , maka dapat langsung dirancang suatu pengaturan umpan balik yang diimplementasikan dalam koordinat aktuator suatu hubungan yang diinginkan antara gaya end point, *Fint*,

dan posisi,  $X$ . Didefinisikan suatu posisi setimbang yang diinginkan untuk *end point* dimana tidak terdapat gaya interaksi dengan lingkungan (posisi virtual) sebagai  $X_d$ , bentuk umum dari hubungan posisi dan gaya yang diinginkan adalah :

$$F_{int} = Ke[X - X_d] \quad (2.1)$$

dimana  $Ke$  adalah suatu konstanta yang menghubungkan pergeseran dengan gaya interaksi yang lazim disebut sebagai kekakuan atau *stiffness*.

Selanjutnya menghitung matrik *Jacobian*,  $J(\theta)$  :

$$dX = J(\theta)d\theta \quad (2.2)$$

Dari prinsip kerja virtual :

$$\tau = J^T(\theta)F_{int} \quad (2.3)$$

Hubungan yang dibutuhkan dalam koordinat aktuator adalah :

$$\tau = J^T(\theta)Ke[L(\theta) - X_d] \quad (2.4)$$

Jika  $Ke[X - X_d]$  yang dipilih cukup untuk membuat *end point* kaku, maka controller yang menggunakan persamaan (2.4) akan menyelesaikan pengaturan posisi *end point* kartesian dan tidak perlu menyelesaikan masalah "*inverse kinematics*". Hanya persamaan *forward* kinematik yang perlu dihitung. Ini adalah konsekuensi langsung yang diberikan untuk menjamin bahwa kelakuan yang diinginkan sesuai dengan mekanika dasar manipulasi dan dinyatakan sebagai impedansi.

Hal penting lainnya dalam impedansi manipulator adalah hubungan antara gaya dengan kecepatan. Dengan asumsi diatas, maka dapat langsung dirancang

suatu pengaturan umpan balik yang diimplementasikan dalam koordinat aktuator suatu hubungan yang diinginkan antara gaya *end point* dengan kecepatan *end point* sebagai berikut :

$$F_{int} = Be[V - Vd] \quad (2.5)$$

Dari kinematika manipulator :

$$V = J(\theta)\omega \quad (2.6)$$

dimana  $Be$  adalah suatu konstanta yang menghubungkan gaya *end point*  $F_{int}$  dengan kecepatan.  $V$  adalah kecepatan *end point*,  $Vd$  adalah kecepatan *end point* yang diinginkan.

Hubungan yang diinginkan dalam koordinat aktuator adalah :

$$\tau = J^T(\theta)Be[J(\theta)\omega - Vd] \quad (2.7)$$

Kelakuan dinamik yang akan dimunculkan oleh manipulator harus sesederhana mungkin. Persamaan selanjutnya tidak perlu menghitung inersia, gesekan, gravitasi dinamik manipulator. Pada beberapa situasi hal tersebut bisa saja dilakukan, tetapi terdapat banyak sekali situasi dimana parameter-parameter tersebut tidak bisa diabaikan. Untuk menjamin feasibilitas dinamik, pemilihan impedansi yang akan dimunculkan manipulator harus didasarkan pada kelakuan dinamik dominan manipulator.

Tidak terdapat suatu strategi yang mampu mengeliminasi efek inersia dari manipulator tetapi inersia *end effector* yang dapat dilihat dengan jelas dapat dimodifikasi. Pendekatan yang digunakan untuk mengatasi kelakuan inersia manipulator adalah dengan menutupi dinamika inersia nonlinier yang dimiliki

oleh manipulator dan memberikan dinamika yang lebih sederhana. Perencanaan dan pelaksanaan tugas dapat disederhanakan jika kelakuan inersia *end point* dimodifikasi dengan suatu inersia tensor yang tetap sama selama translasi dan rotasi pada sumbu koordinat. Hal ini dapat dicapai jika :

$$Me = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dimana  $Me$  adalah inersia tensor pada koordinat *end point*,  $m$  adalah massa pada *end point* dan  $I$  adalah inersia pada *end point*. Ini adalah inersia tensor dari benda tegar seperti kubus dengan kerapatan yang sama. Inersia tensor ini mengeliminasi perkalian kecepatan angular dalam persamaan Euler untuk gerakan benda tegar.

Untuk menyatakan kelakuan dominan orde dua dari manipulator, maka gaya *interface* noninersial diasumsikan hanya tergantung pada pergeseran, kecepatan dan waktu  $F(X, V)$  :

$$F_{int} = F(X, V) + MedV / dt \quad (2.9)$$

Persamaan tersebut diatas dapat ditulis sebagai pergeseran dari posisi yang diinginkan  $X_d$  sebagai berikut :

$$F_{int} = F(X - X_d, V - V_d) + MedV / dt \quad (2.10)$$

Untuk penyederhanaan posisi dan kecepatan dapat dipisahkan :

$$F_{int} = Ke[X - X_d] + Be[V - V_d] + MedV / dt \quad (2.11)$$

persamaan (2.11) dapat dinyatakan sebagai persamaan target impedance sebagai berikut :

$$Me(\ddot{X} - \ddot{X}d) + Be(\dot{X} - \dot{X}d) + Ke(X - Xd) = F_{int} \quad (2.12)$$

Semua parameter dalam persamaan ini diasumsikan sebagai fungsi dari perintah pengaturan dan fungsi waktu, dimana  $Me$ ,  $Be$ ,  $Ke$  adalah matrik inersia pada koordinat *end point*, viskositas dan kekakuan yang diinginkan dari *end effector*.

## 2.2 IMPLEMENTASI PENGATURAN IMPEDANSI ROBOT

Untuk mengimplementasikan kelakuan target dari persamaan (2.12), salah satu pendekatan yang digunakan adalah menyatakan impedansi dalam koordinat kartesian yang diinginkan dan kemudian menggunakan suatu model dinamika manipulator untuk memperoleh persamaan controller yang diinginkan. Diasumsikan efek kinematika, inersial, gravitasi dan gesekan memberikan suatu model dinamika manipulator yang sesuai sebagai berikut :

$$M\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) = \tau + J^T F_{int} \quad (2.13)$$

dimana  $F_{int}$  adalah gaya yang diberikan pada manipulator oleh lingkungan;  $\theta$  adalah vektor sudut joint;  $M$  adalah matrik inersia pada koordinat *joint*;  $h(\theta, \dot{\theta})$  adalah suku nonlinier torsi joint sebagai akibat dari sentrifugal, Coriolis,  $c(\theta)$  adalah gravitasi dan gaya gesek;  $\tau$  adalah vektor torsi joint;  $J$  adalah matrik *Jacobian*.

$$\tau = \tau_{cancel} + \tau_{imp} \quad (2.14)$$

dimana  $\tau_{imp}$  adalah vektor torsi joint yang diperlukan untuk menghasilkan impedansi *end-effector* yang diinginkan;  $\tau_{cancel}$  adalah vektor torsi joint untuk kompensasi nonlinier dengan asumsi bahwa :

$$\tau_{cancel} = h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) \quad (2.15)$$

Persamaan (2.14) dan (2.15) masuk ke persamaan (2.13), diperoleh :

$$M\ddot{\theta} = \tau_{imp} + J^T F_{int} \quad (2.16)$$

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\tau_{imp} + J^T F_{int}) \quad (2.17)$$

Diketahui pula bahwa :

$$\tau_{imp} = J^T F_{imp} \quad (2.18)$$

sehingga persamaan (2.17) menjadi :

$$\ddot{\theta} = M^{-1}J^T(F_{imp} + F_{int}) \quad (2.19)$$

persamaan (2.19) dikalikan dengan matrik *Jacobi*, diperoleh :

$$J\ddot{\theta} = W(F_{imp} + F_{int}) \quad (2.20)$$

Dimana  $W = JM^{-1}J^T$

Dari Hubungan kecepatan *end-effector* dengan kecepatan joint diperoleh :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J\dot{\theta}, \\ \ddot{X} &= J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta}, \\ J\ddot{\theta} &= \ddot{X} - \dot{J}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.12) :

$$\ddot{X} = \ddot{X}d - Me^{-1}[Be(\dot{X} - \dot{X}d) + Ke(X - Xd) - F_{int}] \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) masuk ke persamaan (2.21), diperoleh :

$$J\ddot{\theta} = \ddot{X}_d - Me^{-1}[Be(\dot{X} - \dot{X}_d) + Ke(X - X_d) - F_{int}] - J\dot{\theta} \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) masuk ke persamaan (2.20), diperoleh :

$$W(F_{imp} + F_{int}) = \ddot{X}_d - Me^{-1}[Ke(X - X_d) + Be(\dot{X} - \dot{X}_d) - F_{int}] - J\dot{\theta}$$

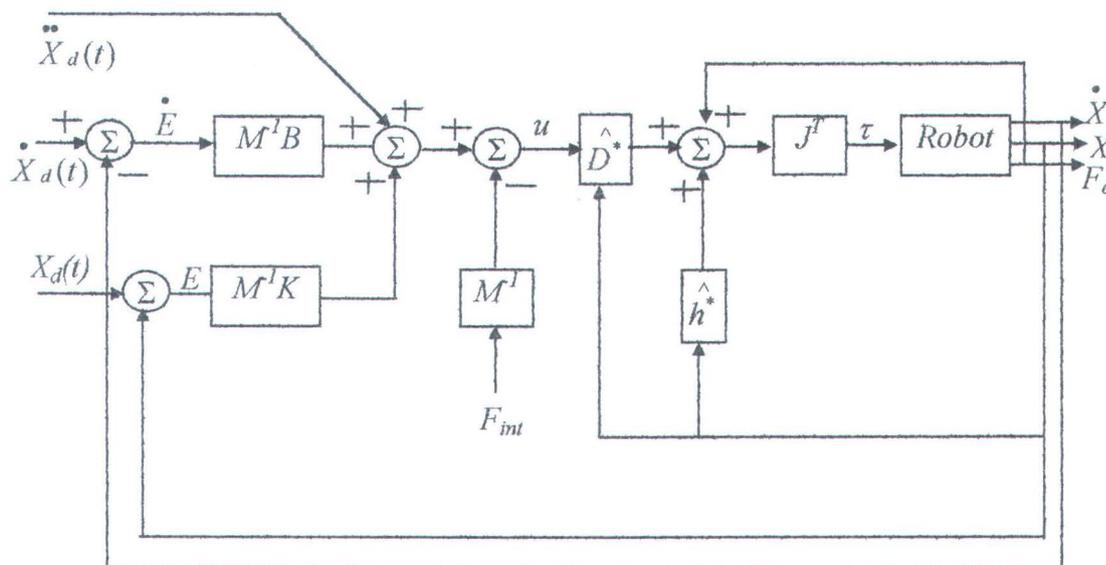
$$F_{imp} + F_{int} = W^{-1}\{\ddot{X}_d - Me^{-1}[Ke(X - X_d) + Be(\dot{X} - \dot{X}_d) - F_{int}] - J\dot{\theta}\}$$

$$F_{imp} = W^{-1}\{\ddot{X}_d - Me^{-1}[Ke(X - X_d) + Be(\dot{X} - \dot{X}_d) - F_{int}] - J\dot{\theta}\} - F_{int} \quad (2.24)$$

persamaan (2.31) dikalikan dengan *Jacobi* transpose, diperoleh :

$$\tau_{imp} = J^T W^{-1}\{\ddot{X}_d - Me^{-1}[Ke(X - X_d) + Be(\dot{X} - \dot{X}_d) - F_{int}] - J\dot{\theta}\} - J^T F_{int} \quad (2.25)$$

Persamaan (2.25) digunakan sebagai kontroler impedance konvensional tanpa menghitung inverse *Jacobi*. Blok diagram pengaturan impedansi konvensional dapat dilihat pada **Gbr 2.1**.



Gambar 2.1 Blok diagram pengaturan impedansi manipulator robot

Persamaan (2.25) adalah persamaan yang menyatakan kelakuan yang diinginkan yang harus disediakan oleh kontroler sebagai impedansi nonlinier dalam koordinat kartesian. Hal tersebut dapat dipandang sebagai pengaturan umpanbalik nonlinier yang menghubungkan torsi aktuator dengan posisi, kecepatan dan gaya interface aktuator. Variabel-variabel input adalah posisi kartesian yang diinginkan dan kelakuan dinamik kartesian yang diinginkan diberikan oleh  $M_e$ ,  $B_e$  dan  $K_e$ .

### 2.3 TRANSFORMASI GAYA DAN MOMENT

Pada proses memasukkan paku pada lubang, salah satu hal yang penting diperhatikan adalah transformasi gaya dan moment antara end-effector dengan ujung paku. Dimana gaya yang dihasilkan manipulator selalu diukur pada end-effektor, sedangkan lintasan yang dikehendaki berada pada ujung paku, sehingga diperlukan adanya transformasi antara gaya dari end-effektor terhadap ujung paku, supaya gerakan ujung paku dapat memenuhi lintasan yang diinginkan.

Misalkan  $q$  ditetapkan sebagai perpindahan joint,  $q = [q_1, \dots, q_n]^T$  adalah bentuk koordinat sembarang yang menyatakan letak sistem mekanik.  $Q = [Q_1, \dots, Q_n]^T$  adalah gaya pada  $q$ . Juga ditetapkan sistem koordinat yang lain yaitu  $p = [p_1, \dots, p_m]^T$ . Moment dan gaya dinotasikan dengan  $P = [P_1, \dots, P_m]^T$  relatif terhadap koordinat  $p$ . Sekarang permasalahannya adalah bagaimana mentransformasikan gaya dan moment  $P$  pada koordinat- $p$  ke  $Q$  pada koordinat –  $q$ .

Jika perpindahan virtual dinyatakan dengan  $\delta p$ , sehingga jika fungsi perpindahan yang dinyatakan dalam koordinat  $p$  harus dinyatakan dalam koordinat  $q$ , maka hubungan perpindahan virtual  $\delta p$  terhadap  $\delta q$  :

$$\delta p = J\delta q \quad (2.26)$$

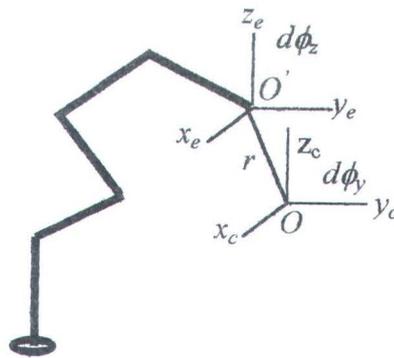
dimana  $J$  adalah  $m \times n$  matrik Jacobian yang menghubungkan transformasi koordinat. Sehingga transformasi gaya  $P$  ditransformasikan terhadap gaya  $Q$  pada koordinat- $q$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = J^T P \quad (2.27)$$

dimana  $J^T$  adalah transpose dari matrik Jacobian.

Analogi dengan penurunan diatas, maka gaya dan moment yang dihasilkan pada *end-effector* dapat ditukur relatif terhadap ujung paku. Hal ini dapat dilakukan dengan mentransformasikan gaya dan moment dari *end-effector* relatif terhadap ujung paku. Jika perpindahan dan perputaran robot pada ujung paku dinyatakan dengan vektor  $dq = [dx_c, dy_c, dz_c, d\phi_x, d\phi_y, d\phi_z]^T$  dan vektor  $dp = [dx_e, dy_e, dz_e, d\phi_x, d\phi_y, d\phi_z]^T$  pada *end-effector* robot. Koodinat *end-effector* dapat dinyatakan dengan vektor posisi terhadap koordinat ujung paku, dengan vektor  $r = [r_{x_c}, r_{y_c}, r_{z_c}]^T$ . Transformasi dari  $dq$  terhadap  $dp$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$dp = \begin{bmatrix} dx_e \\ dy_e \\ dz_e \\ d\phi_{x_e} \\ d\phi_{y_e} \\ d\phi_{z_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & r_z & -r_y \\ 0 & 1 & 0 & -r_z & 0 & r_x \\ 0 & 0 & 1 & r_y & -r_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_c \\ dy_c \\ dz_c \\ d\phi_{x_c} \\ d\phi_{y_c} \\ d\phi_{z_c} \end{bmatrix} = Jdq \quad (2.28)$$



Gambar 2.2 Transformasi ujung paku relatif terhadap *end-effector*.

Jika vektor  $Q = [Fx_c \quad Fy_c \quad Fz_c \quad Mx_c \quad My_c \quad Mz_c]$  adalah gaya dan moment pada koordinat ujung paku dan vektor  $P = [Fx_e \quad Fy_e \quad Fz_e \quad Mx_e \quad My_e \quad Mz_e]$  adalah gaya dan moment pada koordinat *end-effector*. Sehingga transformasi gaya dan moment antara  $P$  dan  $Q$  adalah:

$$Q = \begin{bmatrix} Fx_c \\ Fy_c \\ Fz_c \\ Mx_c \\ My_c \\ Mz_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_z & r_y & 1 & 0 & 0 \\ r_z & 0 & -r_x & 0 & 1 & 0 \\ -r_y & r_x & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx_e \\ Fy_e \\ Fz_e \\ Mx_e \\ My_e \\ Mz_e \end{bmatrix} = J^T P \quad (2.29)$$

$$Q = J^T P$$

Dalam proses memasukkan paku kedalam lubang, misalkan,  $Q$  adalah gaya yang digunakan untuk menggerakkan paku untuk melalui lintasan yang diinginkan, yang besarnya sama dengan transformasi gaya yang dihasilkan oleh *end-effector*  $P$ , diukur dari ujung paku.

Persamaan diatas dapat berlaku jika ditetapkan bahwa antar *end-effektor* dan ujung paku selalu mempunyai orientasi yang sama, jadi pada kedua koordinat tersebut tidak pernah terjadi perputaran. Sedangkan jika antara *end-effektor* terjadi perputaran maka persamaannya menjadi:

$$dp = \begin{bmatrix} dx_e \\ dy_e \\ dz_e \\ d\phi_{x_e} \\ d\phi_{y_e} \\ d\phi_{z_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & 0 & 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & 0 & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_c \\ dy_c \\ dz_c \\ d\phi_{x_c} \\ d\phi_{y_c} \\ d\phi_{z_c} \end{bmatrix} = Jdq \quad (2.30)$$

dan

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_z r_{21} + (-r_y) r_{31} & r_z r_{22} + (-r_y) r_{32} & r_z r_{23} + (-r_y) r_{33} \\ (-r_z) r_{11} + r_x r_{31} & (-r_z) r_{12} + r_x r_{32} & (-r_z) r_{13} + r_x r_{33} \\ r_y r_{11} + (-r_x) r_{21} & r_y r_{12} + (-r_x) r_{22} & r_y r_{13} + (-r_x) r_{23} \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} Fx_c \\ Fy_c \\ Fz_c \\ Mx_c \\ My_c \\ Mz_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 & 0 & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \\ d_{11} & d_{21} & d_{31} & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx_e \\ Fy_e \\ Fz_e \\ Mx_e \\ My_e \\ Mz_e \end{bmatrix} = J^T P \quad (2.31)$$

atau dalam bentuk yang lebih sederhana biasa ditulis:

$$\begin{bmatrix} F_c \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ D^T & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_e \\ M_e \end{bmatrix}$$

atau

$$F_c = J^T F_e \quad (2.32)$$

dimana  $D$  adalah matrik operator, yaitu *cross product* vektor jarak dengan matrik rotasi.

$$D = P \times R = \begin{bmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

**Tetapi semua orang yang menerima-Nya diberi-Nya kuasa supaya menjadi anak-anak Allah, yaitu mereka yang percaya dalam nama-Nya; (Yoh 1: 12)**

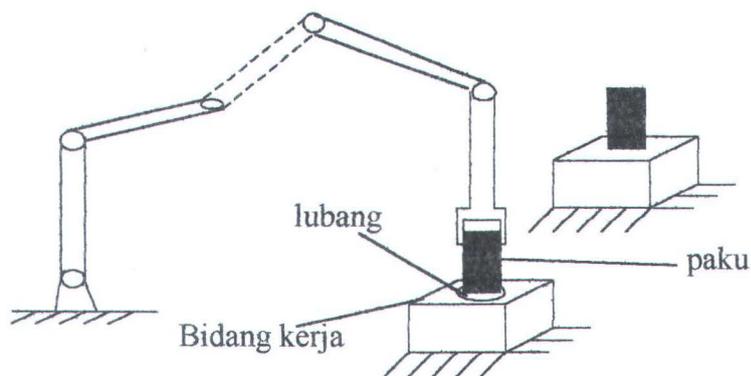
## **BAB III STRATEGI DAN TAHAPAN PEMASANGAN**

## BAB III

### STRATEGI DAN TAHAPAN PEMASANGAN

---

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, tugas dari robot yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah membawa paku dari satu bidang kerja dan memasukkannya ke dalam suatu lubang yang berada pada bidang kerja yang lain. Hal ini dapat digambarkan pada Gambar 3.1 dibawah ini,



Gambar 3.1 Pemasangan paku pada lubang

Dalam melaksanakan tugas pemasangan, manipulator robot diharapkan memasukkan paku pada lubang dengan aman, stabil dan cepat. Proses pemasangan akan dianalisa secara bertahap, yang dibagi dalam tiga tahap utama, yaitu:

1. Tahap pendekatan: yaitu tahap dimana robot bergerak dari posisi awal (diam) menuju bidang datar lubang (*workpiece*).

2. Tahap pergeseran, yaitu tahap dimana robot bergerak dari posisi kontak pertama menuju sisi lubang.
3. Tahap penyisipan, yaitu tahap mulai memasukkan paku kedalam lubang, tahap ini merupakan tahap utama dari proses pemasangan, dimana akan terjadi satu titik kontak, dua titik kontak, kondisi terdesak, dan penyisipan paku kedalam lubang tersebut.

Selanjutnya berikut ini akan dibahas tahap-tahap pemasangan tersebut, dimana diambil sebagai contoh adalah robot planar dengan dua joint.

### 3.1 PERSAMAAN DINAMIK ROBOT PLANAR 2 LINK

Dengan menggunakan rumus dinamik Lagrangian Hartenber bersama dengan penjelasan koordinat link Denavit-Hartenberg, persamaan dinamik robot dengan  $n$  derajat kebebasan dan  $n+1$  link, dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n C_{kj}^i(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + h_i(q) = \tau_i, \quad i = 1 \sim n \quad (3.1)$$

Dimana:

- $q_i$  : Variable joint robot
- $\dot{q}_j$  : Kecepatan joint robot
- $\ddot{q}_j, \ddot{q}_k$  : Percepatan dari variabel joint
- $D_{ij}(q)$  : Koefisien inersia
- $C_{kj}^i$  : Gaya sentrifugal dan koefisien Coriolis
- $h_i$  : Pembebanan akibat gravitasi

$\tau_i$  : Gaya dan torsi pada joint

$q_0$  : Percepatan gravitasi

Disini akan dibahas robot planar dengan dua joint, atau  $n = 2$ . Persamaan dinamikanya dapat diturunkan dari persamaan umum diatas, yaitu:

$$D_{11}(q)\ddot{q}_1 + D_{12}(q)\ddot{q}_2 + C_{11}(q, \dot{q}) + h_1(q) = \tau_1 \quad (3.2)$$

$$D_{21}(q)\ddot{q}_1 + D_{22}(q)\ddot{q}_2 + C_{21}(q, \dot{q}) + h_2(q) = \tau_2$$

Vektor pembebanan akibat gravitasinya adalah sebagai berikut:

$$h(q) = \begin{bmatrix} g_0 \left[ \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) a_1 c_1 + \frac{m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \\ \frac{g_0 m_2 a_2 C_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Matrik Jacobiannya adalah,

$$J(q) = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 - a_2 S_{12} / 2 & -a_2 S_{12} / 2 \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} / 2 & a_2 C_{12} / 2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Persamaan pengaturan impedansinya adalah,

$$e = r - q$$

$$\tau_1 = -(a_1 S_1 + a_2 S_{12} / 2)(k_1 e_1 + l_1 \dot{e}_1) + (a_1 C_1 + a_2 C_{12} / 2)(k_2 e_2 + l_2 \dot{e}_2)$$

$$\tau_2 = -a_2 S_{12} / 2(k_1 e_1 + l_1 \dot{e}_1) - a_2 C_{12}(k_2 e_2 + l_2 \dot{e}_2) \quad (3.5)$$

Dimana:

$$S_1 = \sin q_1$$

$$C_1 = \cos q_1$$

$$S_2 = \sin q_2$$

$$C_2 = \cos q_2$$

$$S_{12} = \sin(q_1 + q_2)$$

$$C_{12} = \cos(q_1 + q_2)$$

$$m_1, m_2 = \text{massa tiap link}$$

$$a_1, a_2 = \text{panjang tiap link}$$

$$\tau_1, \tau_2 = \text{torsi joint tiap link}$$

$$D_{11}(q) = (m_1/3 + m_2)a_1^2 + m_2a_1a_2C_2 + m_2a_2^2/3$$

$$D_{22}(q) = m_2a_2^2/3$$

$$D_{12}(q) = m_2a_1a_2C_2/2 + m_2a_2^2/3$$

$$D_{21}(q) = D_{12}(q)$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) = m_2a_1a_2S_2(\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)$$

$$C_{21}(q, \dot{q}) = m_2a_1a_2S_2\dot{q}_1/2$$

$$h_1(q) = q_0[(m_1/2 + m_2)a_1C_1 + m_2a_2C_{12}/2]$$

$$h_2(q) = q_0m_2a_2C_{12}/2$$

Persamaan dinamik diatas dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$D(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + h(q) = \tau \quad (3.6)$$

Dimana determinan dari tensor insersia manipulator  $D(q)$  adalah:

$$\begin{aligned}\Delta(q) &= D_{11}(q)D_{22}(q) - D_{12}(q)D_{21}(q) \\ &= m_2(a_1a_2)^2 \left[ \frac{m_1}{9} + m_2 \left( \frac{1}{3} - \frac{C_2^2}{4} \right) \right]\end{aligned}\quad (3.7)$$

Jika invers  $D(q)$  dapat dirumuskan dengan mengubah elemen diagonal, tanda elemen diagonal diubah dan dibagi dengan determinannya, sebagai berikut:

$$D^{-1}(q) = -\frac{1}{\Delta(q)} \begin{bmatrix} D_{22} & -D_{12} \\ -D_{21} & D_{11} \end{bmatrix}\quad (3.8)$$

Ditentukan variabel state  $x^T = [q^T + v^T]$ , dimana  $v = \dot{q}$ . Persamaan state robot dua joint planar dan hasil persamaan kinematik  $y$  dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\dot{q}_1 = v_1$$

$$\dot{q}_2 = v_2$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= \frac{1}{\Delta(q)} \left( D_{22}(q) \left\{ \tau_1 + m_2 a_1 a_2 S_2 (v_1 v_2 + v_2^2) - q_0 \left[ \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) a_1 c_1 + \frac{m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \right\} \right. \\ &\quad \left. - D_{12}(q) \left[ \tau_2 - \frac{m_2 l_1 a_2 S_2 v_1^2}{2} - \frac{q_0 m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \right)\end{aligned}\quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_2 &= \frac{1}{\Delta(q)} \left( -D_{21}(q) \left\{ \tau_1 + m_2 a_1 a_2 S_2 \left( v_1 v_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) - q_0 \left[ \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) a_1 c_1 + \frac{m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \right\} \right. \\ &\quad \left. + D_{12}(q) \left[ \tau_2 - \frac{m_2 a_1 a_2 S_2 v_1^2}{2} - \frac{q_0 m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \right)\end{aligned}$$

$$y = [a_1 C_1 + a_2 C_{12}, a_1 S_1 + a_2 S_{12}, 0, 0, 0, 1]^T\quad (3.10)$$

### 3.2 TAHAP PENDEKATAN

Pada tahap ini robot bergerak dalam ruang bebas dimana tidak ada interaksi antara robot dengan lingkungannya. Robot digerakkan dari posisi diam menuju satu titik yang telah ditentukan pada permukaan lubang, yang disebut titik kontak mula-mula. Persamaan pengendalian gerak ini adalah sebagai berikut:

$$e = r - q$$

$$\tau_1 = k_1 e_1 + l_1 \dot{e}_1 + g_0 \left[ \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) a_1 c_1 + \frac{m_2 a_2 C_{12}}{2} \right] \quad (3.11)$$

$$\tau_2 = k_2 e_2 + l_2 \dot{e}_2 + \frac{g_0 m_2 a_2 C_{12}}{2}$$

dimana:

$r$  : sudut joint yang diinginkan

$q$  : sudut aktual joint

$k_i, l_i$  : penguatan posisi dan kecepatan untuk variabel joint,  $i = 1, 2$

Misalkan  $K$  dan  $L$  adalah matrik diagonal dari

$$K = \text{diag}\{k_1, k_2\} \text{ dan } L = \text{diag}\{l_1, l_2\}$$

$K$  dan  $L$  adalah matrik simetris dengan *eigen value* positif. Variasi nilai komponen matrik  $K$  dan  $L$  akan mengatur kecepatan relatif kedua joint dengan set-point yang diinginkan.

Pada umumnya ada beberapa kemungkinan yang terjadi pada akhir tahap ini, yaitu: satu titik kontak, dua titik kontak, terdesak, terjepit atau langsung masuk. Pada tugas akhir ini akan diambil satu kemungkinan yang mencakup seluruh kemungkinan tersebut, yaitu dimulai dari terjadinya satu titik kontak, dilanjutkan

dengan dua titik kontak, serta analisa untuk menghindari terjadinya posisi paku terjepit dan terdesak

### 3.3 TAHAP PERGESERAN

Pada tahap ini paku akan mengalami gesekan dengan permukaan lubang, dimana paku harus digerakkan pada arah horizontal dengan kaku (*stiff*), sedangkan pada arah vertikal digerakkan dengan lembut (*soft*). Gesekan paku dengan lubang akan menghasikan gaya kontak. Persamaan dinamikanya dapat diturunkan sebagai berikut:

$$D_{11}(q)\ddot{q}_1 + D_{12}(q)\ddot{q}_2 + C_{11}(q, \dot{q}) + h_1(q) = \tau_1 \quad (3.12)$$

$$D_{21}(q)\ddot{q}_1 + D_{22}(q)\ddot{q}_2 + C_{21}(q, \dot{q}) + h_2(q) = \tau_2$$

dengan kendala-kendala sebagai berikut:

$$\begin{aligned} (a_1 C_1 + a_2 C_{21}) F_c &= \tau_1^c \\ a_2 C_{21} F_c &= \tau_2^c \\ a_2 C_{21} + a_1 C_1 &= x_0(t) \\ a_1 S_1 - a_2 S_{21} &= y_0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

dimana:

$F_c$  : Gaya kontak

$\tau_1^c, \tau_2^c$  : gaya reaksi yang disebabkan  $F_c$  pada joint

$y_0$  : tinggi dari joint pertama terhadap permukaan lubang

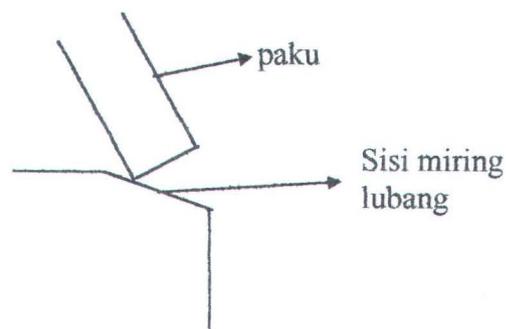
$x_0$  : fungsi posisi *end-effector* sepanjang sumbu- $x$

### 3.4 TAHAP PENYISIPAN

Tahap ini akan dibagi dalam beberapa sub-tahap yang menjelaskan rangkaian terpanjang dari proses pemasangan, yang nantinya diharapkan dapat mewakili semua kemungkinan tersebut. Tahap ini akan dibagi dalam lima sub-tahap.

#### 3.4.1 Sub-tahap Bebas Bergerak

Pada sub-tahap ini paku masih bebas digerakkan tanpa mengalami kontak dengan sisi tegak lubang. Persamaan dinamika dan kendala-kendala pada tahap ini masih sama dengan tahap dua, tetapi lintasan yang dilalui berupa bidang miring lubang, seperti terlihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Paku melintasi bidang miring lubang (sub-tahap bebas bergerak)

#### 3.4.2 Sub-tahap Satu Titik Kontak

Jika robot digerakkan terus dari sub-tahap diatas maka robot akan menyentuh satu sisi tegak lubang, hal ini disebut sub-tahap satu titik kontak. Kendala- kendala pada sub-tahap ini adalah sebagai berikut:

$$F_{1x}(a_{f1}S_{21} - a_1S_1) - F_{1y}(a_{f1}C_{21} + a_1C_1) = \tau_1^c \quad (3.14)$$

$$F_{1x}a_{f1}S_{21} - F_{1y}a_{f1}C_{21} = \tau_2^c$$

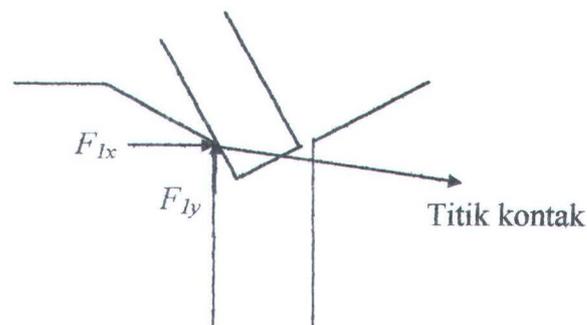
dimana:

$F_{1x}$ ,  $F_{1y}$  : gaya reaksi kontak pertama

$a_{f1}$  : jarak dari titik kontak dengan joint ke 2

$$S_{21} = \sin(q_2 - q_1); C_{21} = \cos(q_2 - q_1);$$

Sub-tahap ini dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3.3** Sub-tahap satu titik kontak

### 3.4.3 Sub-tahap Dua Titik Kontak

Jika gerakan dari satu titik kontak diteruskan maka paku akan mengalami dua titik kontak. Pada kondisi ini, paku tidak bisa lagi digerakkan karena kalau diteruskan maka akan terjadi kerusakan. Untuk menghindari kerusakan ini harus dilakukan gerak rotasi pada paku sehingga dua titik kontak terhindari dan kembali pada satu titik kontak.

Persamaan kendala-kendala pada persamaan ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_{1x}(a_{f1}S_{211} - a_1S_1) - F_{2x}(a_{f2}S_{212} - a_1S_1) \\ - F_{1y}(a_1C_1 + a_{f1}C_{211}) - F_{2y}(a_1C_1 + a_{f2}C_{212}) = \tau_1 \end{aligned} \quad (3.15)$$

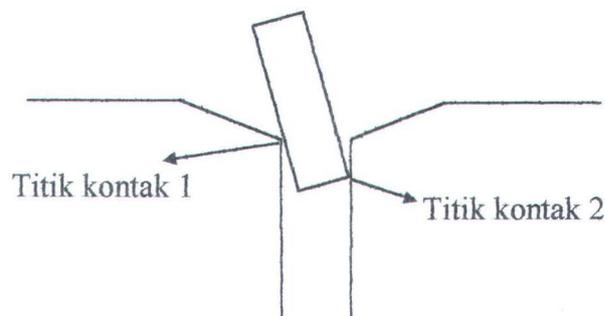
$$F_{1x}a_{f1}S_{211} - F_{2x}a_{f2}S_{212} - F_{1y}a_{f1}C_{211} - F_{2y}a_{f2}C_{212} = \tau_2$$

dimana:

$$S_{211} = \sin(q_2 - q_1 - \beta_1), \quad S_{212} = \sin(q_2 - q_1 - \beta_2)$$

$$C_{211} = \cos(q_2 - q_1 - \beta_1), \quad C_{212} = \cos(q_2 - q_1 - \beta_2)$$

Sub-tahap dua titik kontak dapat digambarkan seperti dibawah ini,



Gambar 3.4 Sub-tahap dua titik kontak

#### 3.4.4 Sub-tahap Terdesak

Sub-tahap terdesak adalah tahap dimana paku dan lubang dikenai gaya yang tidak tepat, sehingga terjadi desakan pada lubang. Hal ini harus dihindari agar pemasangan berhasil. Hal ini diatasi dengan memberikan torsi pada joint untuk menghasilkan guncangan.

Persamaan dinamik pada sub-tahap ini adalah:

$$D_{11}(q)\ddot{q}_1 + D_{12}(q)\ddot{q}_2 + C_{11}(q, \dot{q}) + h_1(q) = \tau_1 + \tau_{gangguan} \quad (3.16)$$

$$D_{21}(q)\ddot{q}_1 + D_{22}(q)\ddot{q}_2 + C_{21}(q, \dot{q}) + h_2(q) = \tau_2 + \tau_{gangguan}$$

sedangkan kendalanya adalah

$$-F_{jam}l_1C_1 = \tau_1 \quad (3.17)$$

dimana:

$F_{jam}$  : gaya desak antara paku dengan lubang

### 3.4.5 Sub-tahap memasukkan

Pada tahap ini adalah tahap akhir dari proses memasukkan, dimana paku berada pada posisi tegak lurus dengan lubang, paku didorong perlahan-lahan hingga mencapai dasar lubang. Setelah selesai pemasangan robot kembali pada posisi semula.

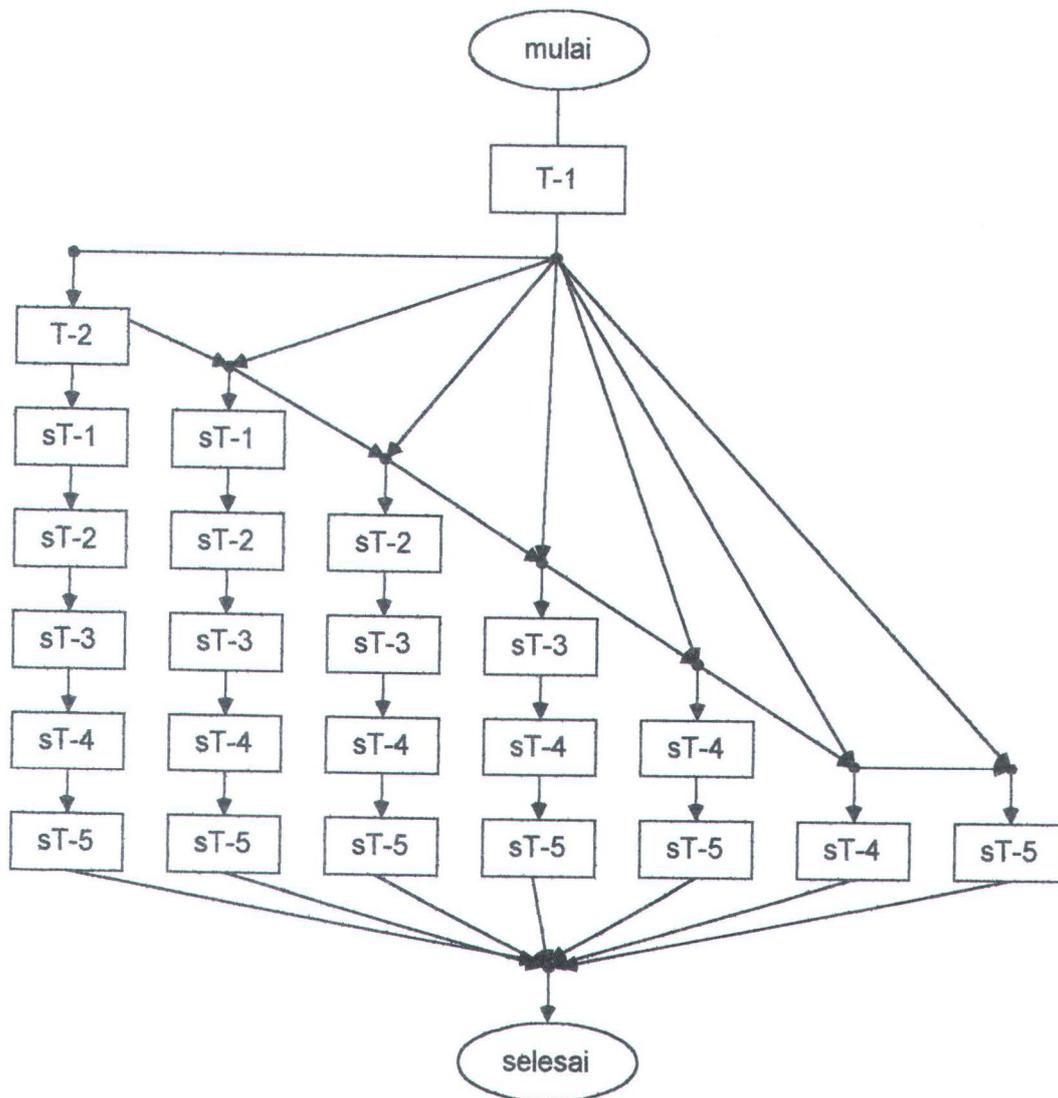
## 3.5 ALGORITMA PEMASANGAN

Berikut ini diberikan algoritma untuk menjelaskan kemungkinan-kemungkinan tahapan pemasangan paku kedalam lubang. Pada *flow cart* dibawah akan terlihat bahwa pemasangan tidak selamanya berhasil (mulai → T-1 → sT-4 → selesai), yaitu jika terjadi gaya desak (*jammed*) yang terlalu besar. Keadaan ini biasanya terjadi kalau pengaturan yang digunakan pengendalian gaya atau hybrid posisi dan gaya.

Keterangan Gambar 3.5,

- T-1 : Tahap Pendekatan
- T-2 : Tahap Pergeseran
- sT-1 : Sub-tahap bebas bergerak
- sT-2 : Sub-tahap satu titik kontak
- sT-3 : Sub-tahap dua titik kontak
- sT-4 : Sub-tahap terdesak

sT-5 : Sub-tahap memasukkan



Gambar 3.5 Flow cart tahapan pemasangan<sup>1</sup>

Yang dibahas dan disimulasikan pada tugas akhir ini adalah tahapan terpanjang dan terlengkap yaitu: mulai → T-1 → T-2 → sT-1 → sT-2 → sT-3 → sT-4 →

<sup>1</sup> Li, Y. *Hybrid Control Approach to the peg-in-Hole Problem*, IEEE Robotics and Automation Magazine, pp 59, June 1997.

ST-5→selesai, dengan demikian diasumsikan semua tahap dan sub-tahap terwakili.

Dan Allah sanggup melimpahkan segala kasih karunia kepada kamu, supaya kamu senantiasa berkecukupan di dalam segala sesuatu dan malah berkelebihan di dalam pelbagai kebajikan. (2 Kor 9: 8)

## **BAB IV PERENCANAAN TRAYEKTORI PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG**

# BAB IV

## PERENCANAAN TRAYEKTORI

### PEMASANGAN PAKU KEDALAM LUBANG

---

#### 4.1 BENTUK LINTASAN ROBOT

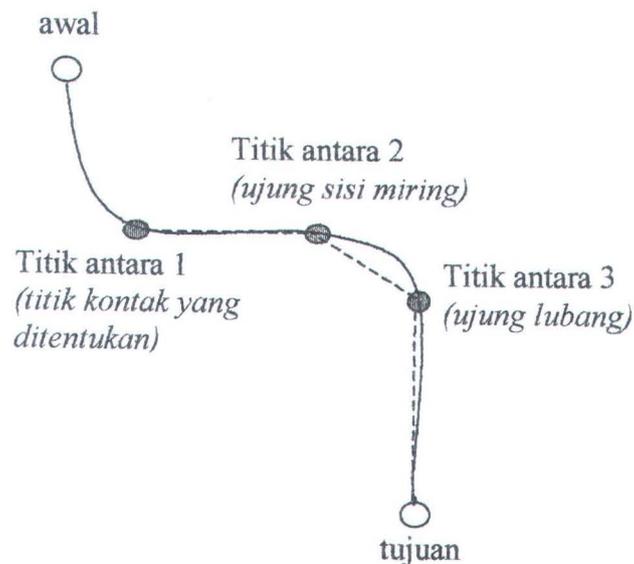
Pembangkitan trayektori untuk pemasangan paku kedalam lubang dapat dipandang sebagai trayektori dengan  $n$  posisi udara. Dengan melalui posisi antara yang telah diberikan, *end-effector* dapat bergerak melalui lintasan yang telah ditentukan.

Jenis gerakan robot pada pemasangan ini adalah gerakan titik ke titik (*point to point*). Pada gerakan ini, robot digerakkan dari kondisi awal ke kondisi akhir yang diinginkan tanpa memandang lintasan yang akan dilalui *end-effector*. Pada pemasangan paku ke dalam lubang *end-effektor* harus bergerak mengikuti bentuk dari lubang sehingga perlu ditambahkan titik antara. Titik antara yang ditambahkan harus mengikuti bentuk lubang, sehingga dalam hal ini perlu ditambahkan tiga titik antara, yaitu pada permukaan datar, pada bidang miring dan pada ujung lubang.

Gerakan dimulai dari posisi awal, paku digerakkan menuju titik kontak yang telah ditentukan yaitu titik antara pertama. Dari titik kontak, paku digerakkan menuju ujung bidang miring lubang yaitu sebagai titik antara kedua. Dari ujung bidang miring, paku digerakkan menuju ujung lubang yaitu sebagai

titik antara ketiga. Dari ujung lubang paku digerakkan menuju pangkal lubang yaitu titik tujuan.

Lintasan *end-effector* untuk tugas pemasangan dapat digambarkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut ini.

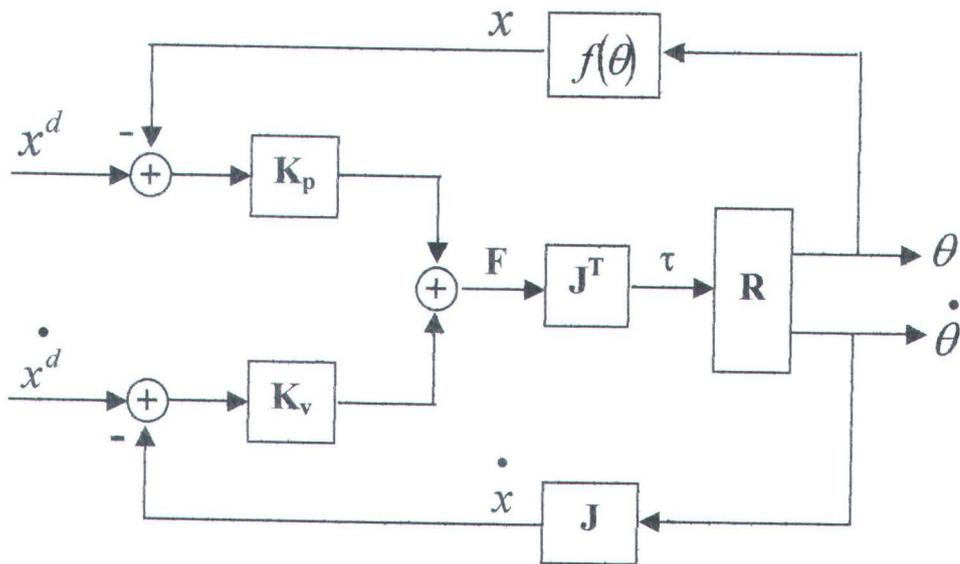


Gambar 4.1 Lintasan *end-effector* untuk pemasangan

## 4.2 PERENCANAAN GERAKAN END-EFFECTOR

Pada pemasangan, perencanaan gerakan *end-effector* diinginkan pada koordinat kartesian, hal ini digunakan supaya gerakan *end-effector* dapat dikendalikan mengikuti bentuk lintasan seperti yang telah dijelaskan diatas. Sedangkan kalau perencanaan dilakukan dalam koordinat *joint*, akan menyebabkan gerakan *end-effector* tidak dapat diarahkan dengan baik.

Diagram blok untuk pengendalian robot dalam koordinat kartesian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.2 Blok diagram pengaturan gerakan dalam koordinat cartesian

#### 4.3 PERSAMAAN POLINOMIAL ORDE LIMA

Secara umum lintasan robot dapat didekati dengan menggunakan persamaan polinomial orde ke- $n$ . Untuk memperoleh kurva hasil interpolasi, digunakan kendala-kendala (*constraints*) tertentu yang harus dipenuhi untuk memperoleh persamaan kurva yang halus.

Pada bagian ini akan dibahas pendekatan yang sering dipakai dalam perencanaan trajectory robot, yaitu perencanaan dengan menggunakan persamaan polinomial orde kelima.

Diberikan dalam koordinat lintasan posisi *end-effector*  $X_d(t)$ ,  $\dot{X}_d(t)$ , kecepatan yang dikehendaki, dan  $\ddot{X}_d(t)$ , percepatannya. Persamaan lintasannya

dapat dinyatakan dalam persamaan orde-5, sebagai berikut (Craig,J,J, 1986, Koivo, A, J, 1989) :

$$X_d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (4.1)$$

dengan menurunkan persamaan diatas terhadap waktu, didapat persamaan kecepatan dan percepatan sebagai berikut :

$$\dot{X}_d(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \quad (4.2)$$

$$\ddot{X}_d(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \quad (4.3)$$

Kendalanya diberikan oleh :

$$X_0 = a_0,$$

$$X_f = a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 + a_4t_f^4 + a_5t_f^5,$$

$$\dot{X}_0 = a_1,$$

$$\dot{X}_f = a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 + 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4,$$

$$\ddot{X}_0 = 2a_2,$$

$$\ddot{X}_f = 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 \quad (4.4)$$

Penyelesaian untuk enam persamaan kendala tersebut, dengan enam koefisien yang tidak diketahui adalah :

$$a_0 = X_0,$$

$$a_1 = \dot{X}_0,$$

$$a_2 = \frac{\ddot{X}_0}{2},$$

$$a_3 = \frac{20X_f - 20X_0 - (8\dot{X}_f + 12\dot{X}_0)t_f - (3\ddot{X}_0 - \ddot{X}_f)t_f^2}{2t_f^3},$$

$$a_4 = \frac{30X_0 - 30X_f + (14\dot{X}_f + 16\dot{X}_0)t_f + (3\ddot{X}_0 - 2\ddot{X}_f)t_f^2}{2t_f^4},$$

$$a_5 = \frac{12X_f - 12X_0 - (6\dot{X}_f + 6\dot{X}_0)t_f - (\ddot{X}_0 - \ddot{X}_f)t_f^2}{2t_f^5}.$$

(4.5)

dimana:

$X_0$  : posisi awal lintasan

$X_f$  : posisi akhir lintasan

$t_f$  : waktu yang dibutuhkan untuk mencapai posisi akhir

Harga-harga koefisien  $a_1, \dots, a_5$  selanjutnya digunakan pada persamaan (4.1), (4.2) dan (4.3) untuk mendapatkan persamaan referensi posisi, kecepatan dan percepatan dalam fungsi waktu ( $t$ ), dengan demikian trayektori yang diinginkan dapat diperoleh setiap saat.

Karena itu, saudara-saudara, demi kemurahan Allah aku menasihatkan kamu, supaya kamu mempersembahkan tubuhmu sebagai persembahan yang hidup, yang kudus dan yang berkenan kepada Allah: itu adalah ibadahmu yang sejati. (Rm 12: 1)

## **BAB V ANALISA DAN HASIL SIMULASI**

## BAB V

### ANALISA HASIL SIMULASI

---

Pada analisa dan simulasi ini digunakan suatu manipulator robot planar tiga link. Simulasi yang dilakukan adalah menggerakkan *end-effector* manipulator robot dari suatu posisi ke posisi tujuan tertentu, yang dinyatakan dengan persamaan polinomial derajat lima.

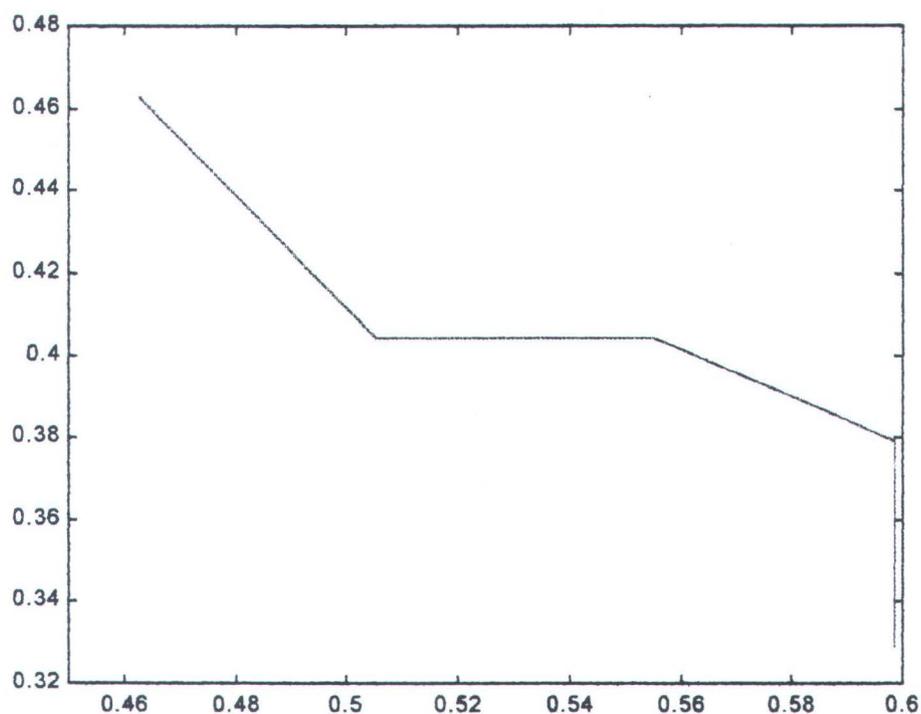
Parameter-parameter robot yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 5.1 berikut ini:

Tabel 5.1 Parameter manipulator robot

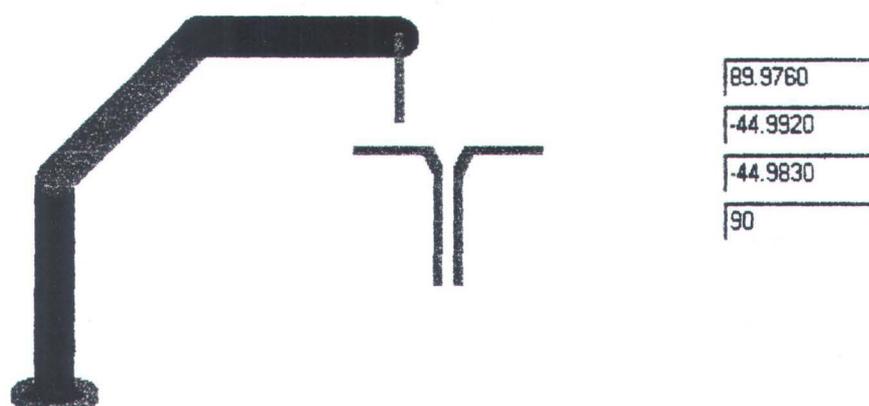
Link (i)	Panjang (m)	Massa (Kg)	Inersia (Kg.m.m)	Sudut awal (derajat)
1	0.25	0.75	0.43	90
2	0.25	0.75	0.43	-45
3	0.25	0.75	0.43	-45

Untuk tugas pemasangan *end-effector* digerakkan dalam empat tahap. Tahap pertama dari posisi awal (0, 0.4627, 0.4627) menuju titik kontak yang telah ditetapkan (0, 0.5053, 0.4042). Tahap kedua dari titik kontak menuju titik ujung bidang miring (0, 0.5553, 0.542). Tahap ketiga adalah dari ujung bidang miring menuju ujung lubang (0, 0.5986, 0.3792). Dan yang terakhir adalah dari ujung

lubang menuju pangkal lubang (0, 0.5986, 0.3292). Berikut ini diberikan grafik lintasan *end-effector* manipulator robot, untuk keempat tahap yang tersebut.



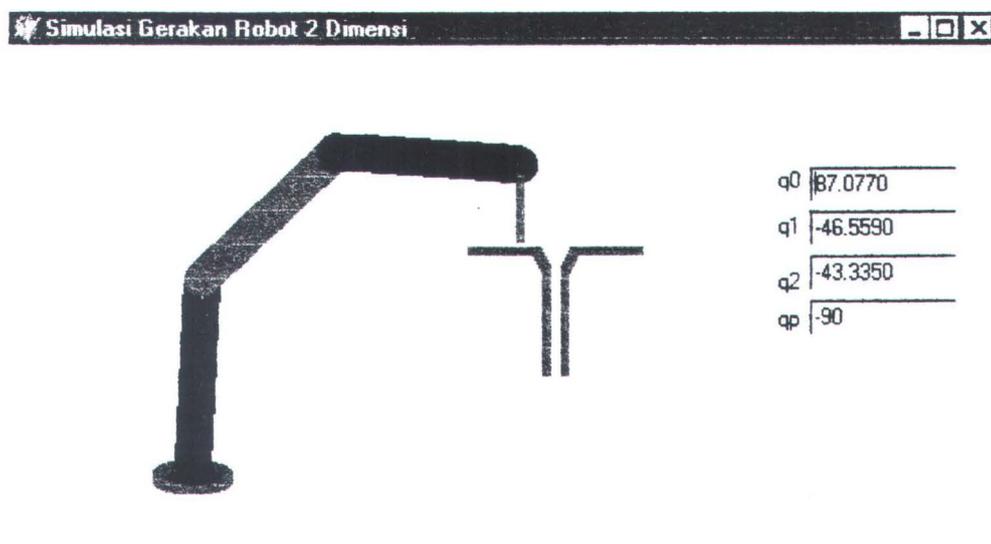
Gambar 5.1 Grafik lintasan end-effector manipulator robot



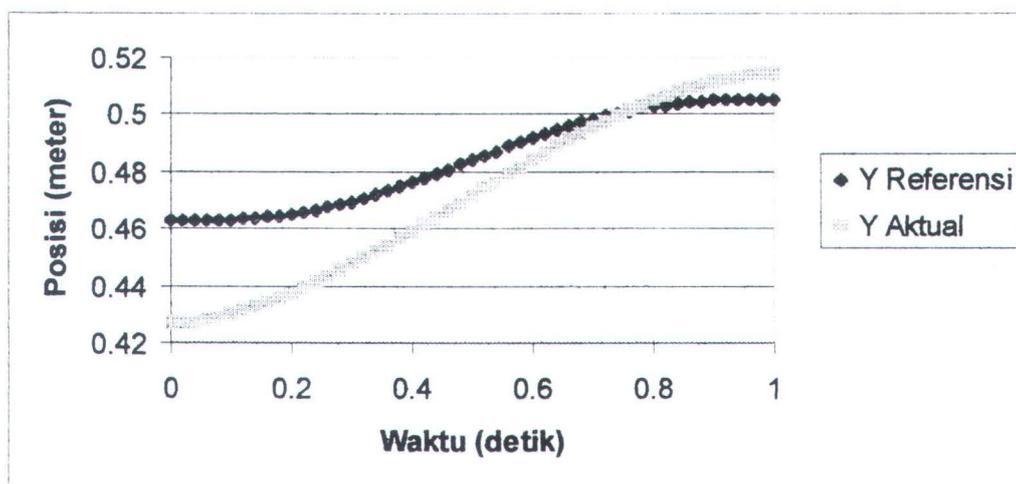
Gambar 5.2 Keadaan awal robot terhadap lubang.

## 5.1 GERAK DARI POSISI DIAM MENUJU TITIK KONTAK

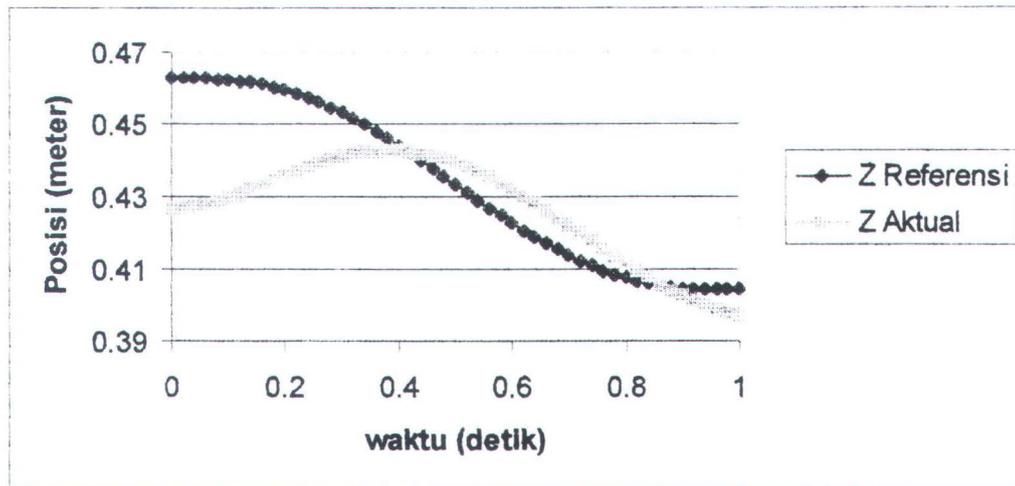
Gambar hasil simulasi dan grafik lintasan end-effektor untuk tahap ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4 dibawah ini.



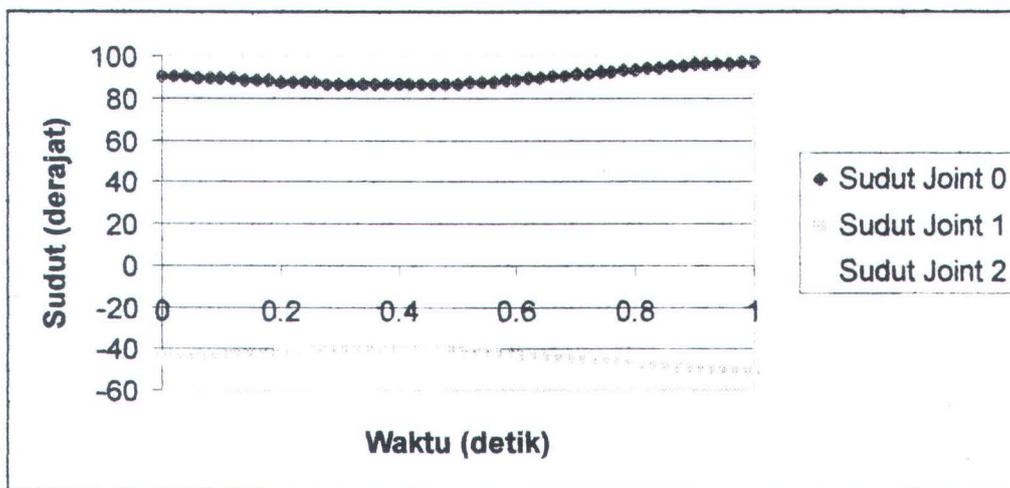
Gambar 5.3 Hasil simulasi tahap gerakan menuju titik kontak



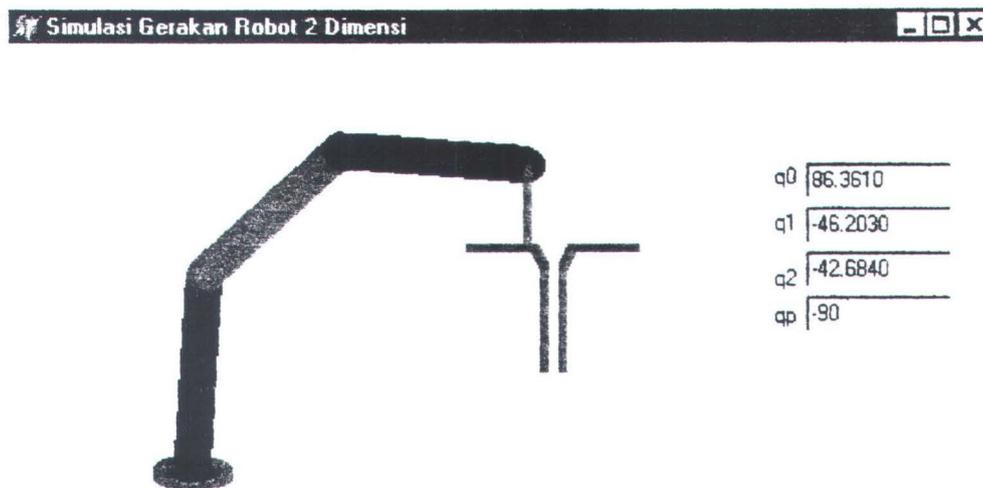
Gambar 5.4 Posisi Y end-effector hasil simulasi



Gambar 5.5 Posisi Z end-effector hasil simulasi



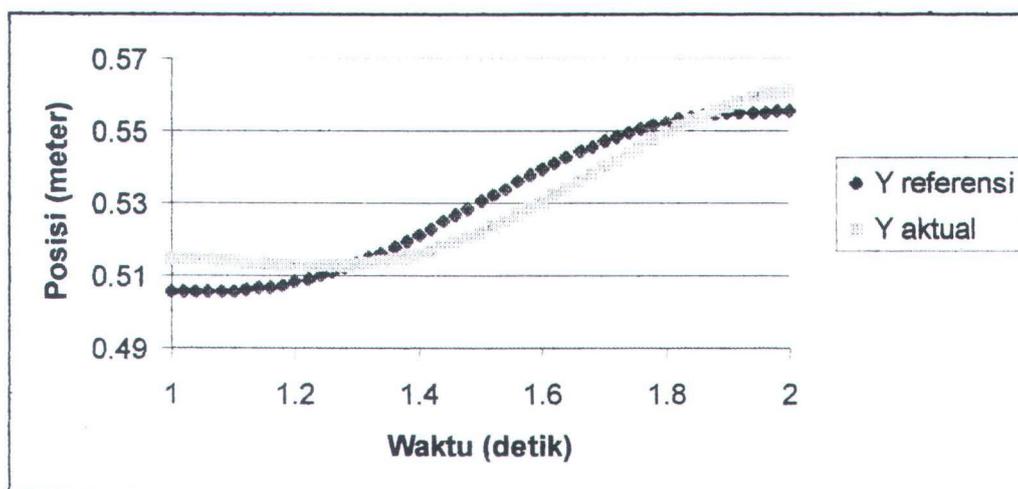
Gambar 5.6 Sudut joint 1, 2 dan 3 hasil simulasi



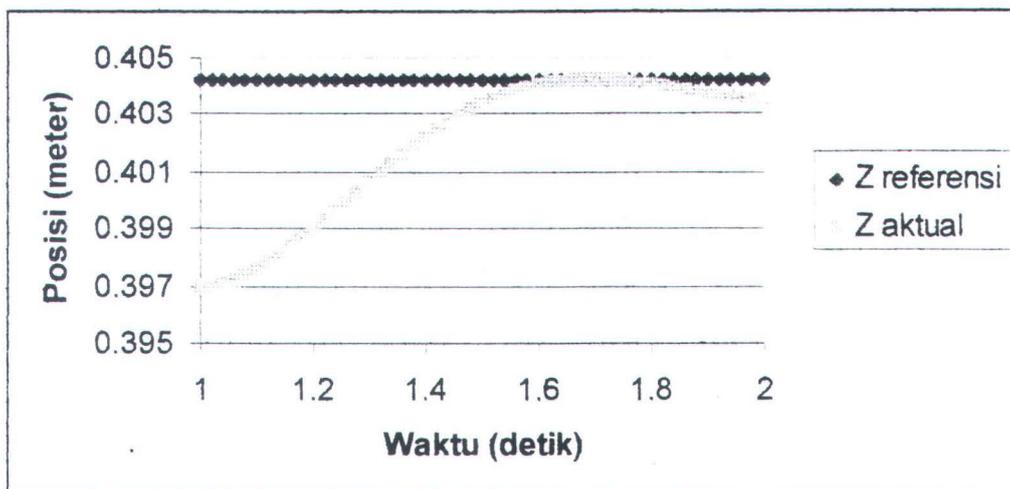
Gambar 5.7 Simulasi robot gerakan menuju bidang miring lubang.

## 5.2 GERAK DARI TITIK KONTAK MENUJU UJUNG SISI MIRING LUBANG

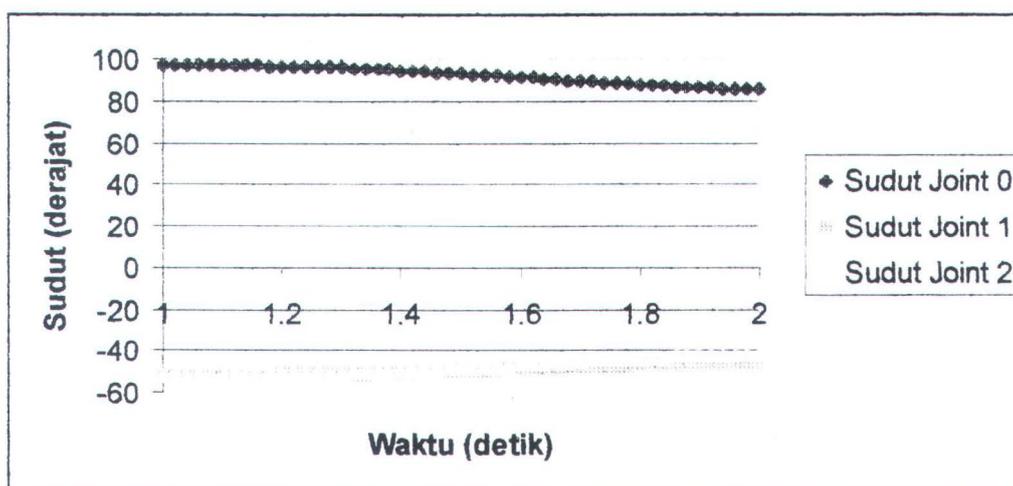
Gerakan simulasi fisik pada tahap ini dapat digambarkan pada Gambar 5.7 diatas. Sedangkan untuk grafik posisi koordinat *end-effector* dan posisi sudutnya dapat dilihat pada Gambar 5.8, Gambar 5.9 dan Gambar 5.10 dan



Gambar 5.8 Posisi Y *end-effector* hasil simulasi



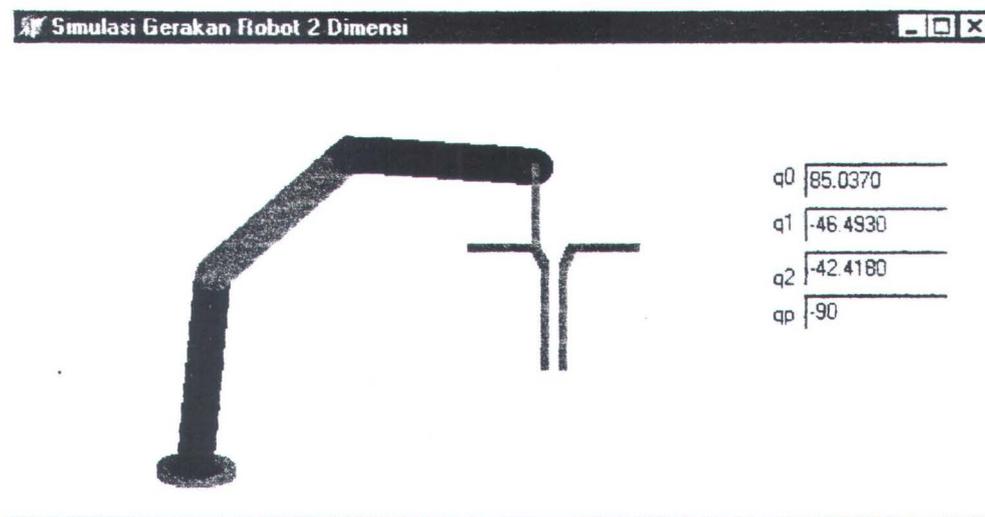
Gambar 5.9 Posisi Z end-effector hasil simulasi



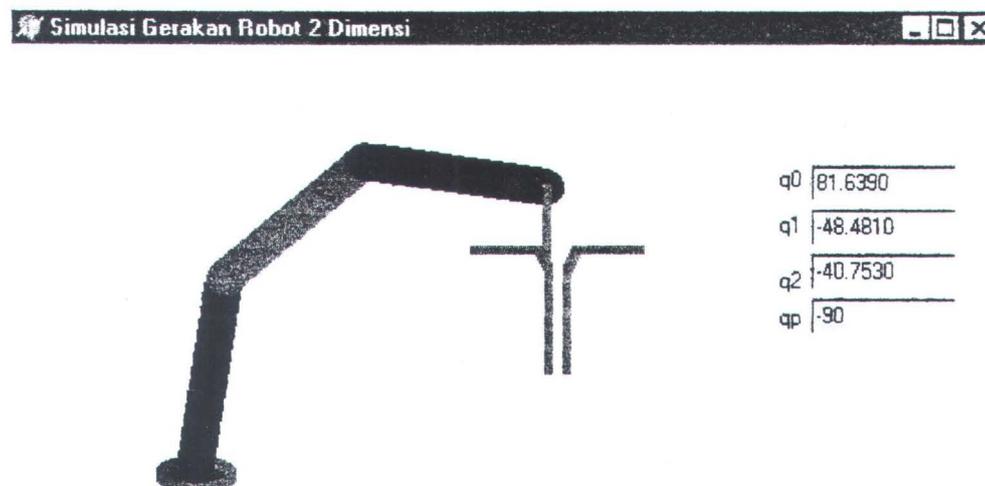
Gambar 5.10 Sudut Joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi

### 5.3 GERAK DARI UJUNG SISI MIRING LUBANG KE UJUNG LUBANG

Gambar fisik hasil simulasi pada awal dan pertengahan tahap melalui bidang miring lubang dapat dilihat pada Gambar 5.11 dan Gambar 5.12 berikut ini:

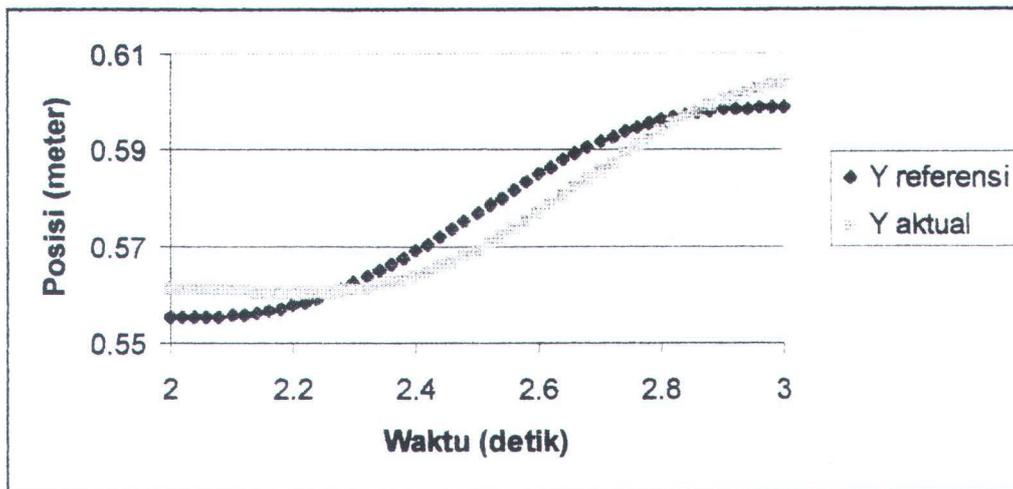


Gambar 5.11 Posisi awal saat bergerak melalui bidang miring

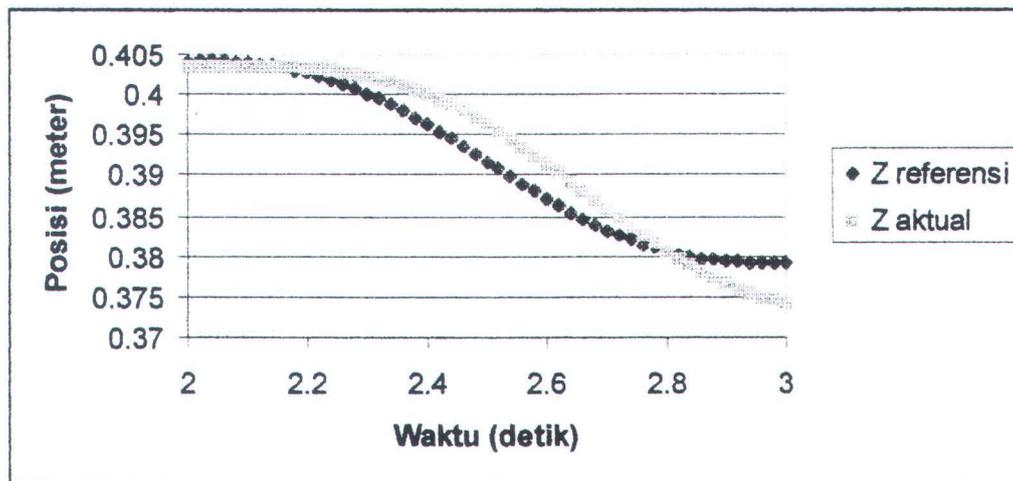


Gambar 5.12 Hasil simulasi gerakan melalui bidang miring lubang.

Grafik posisi end-effector terhadap sumbu Y dan Z dapat dilihat pada gambar berikut ini.

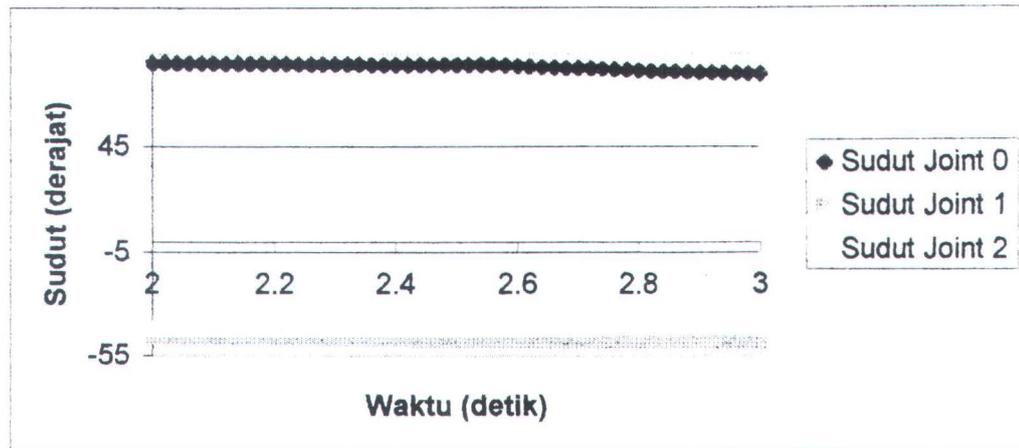


Gambar 5.13 Posisi Y end-effector hasil simulasi



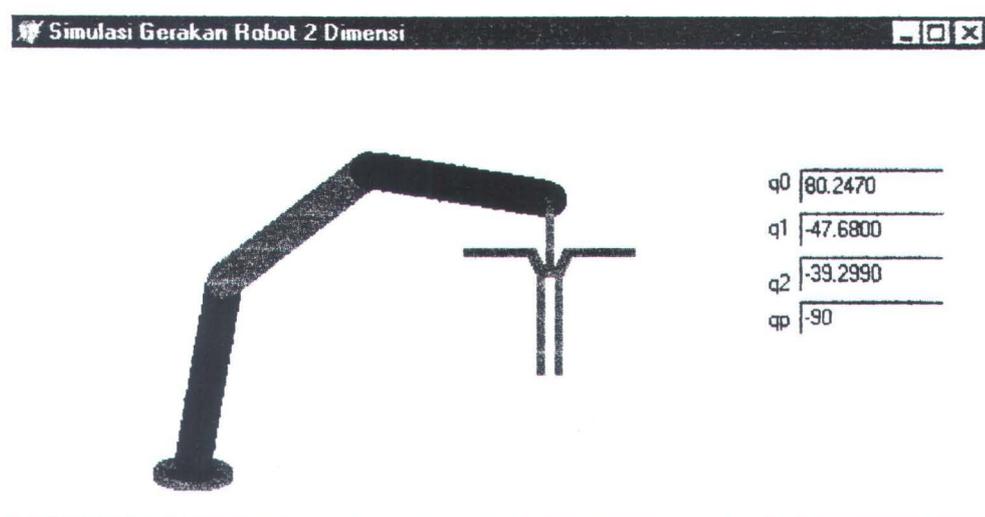
Gambar 5.14 Posisi Z end-effector hasil simulasi

Sedangkan grafik posisi sudut joint selama melalui bidang miring dapat dilihat pada Gambar 5.15 dibawah ini.



Gambar 5.15 Sudut joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi

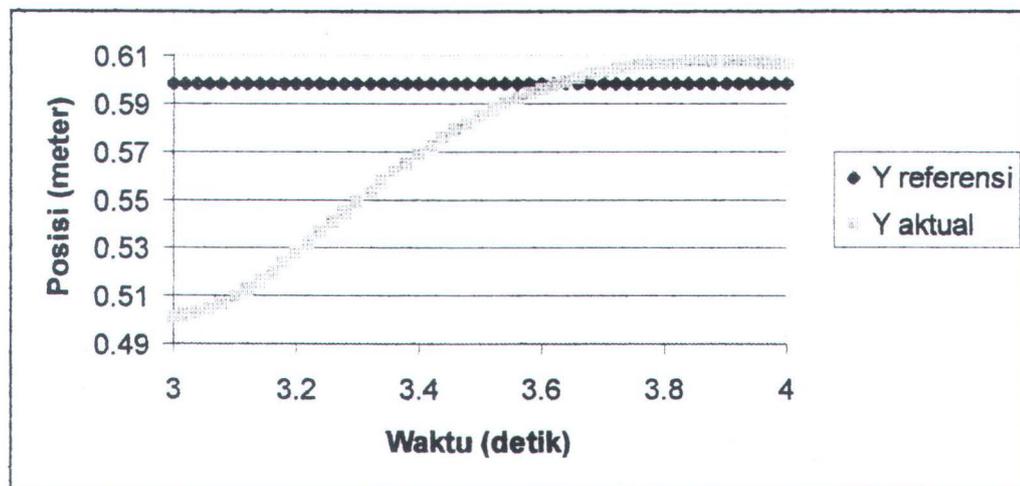
Grafik posisi  $y$  dan posisi  $z$  sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada Gambar 5.13 dan 5.14. Sementara dari Gambar 5.15 dapat dilihat posisi tiap joint pada setiap waktu. Dari Gambar 5.15 dapat dilihat, bahwa meskipun perencanaan trayektori dilakukan dalam koordinat cartesian, tidak dijumpai lompatan yang cukup berarti dalam sudut joint.



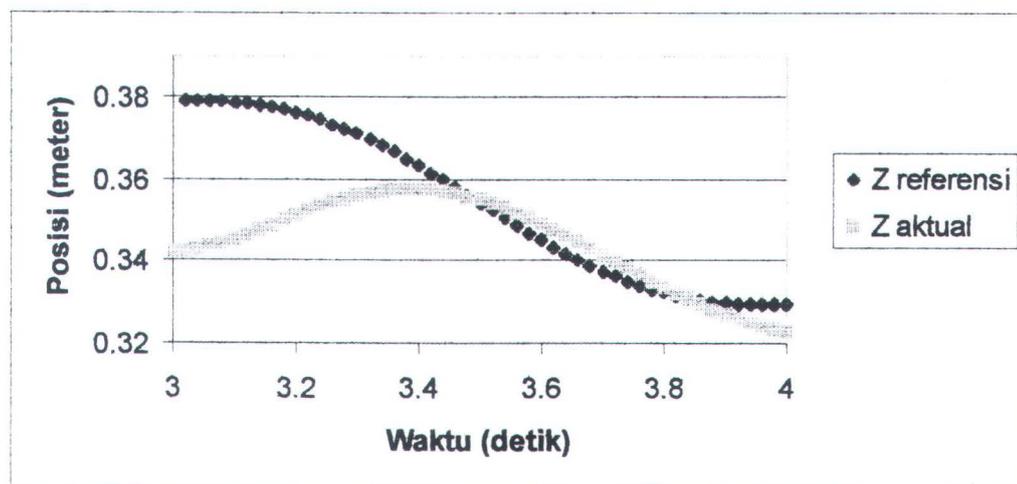
Gambar 5.16 Hasil simulasi fisik kondisi awal tahap memasukkan

## 5.4 GERAK DARI UJUNG LUBANG KE DASAR LUBANG

Keadaan awal tahap ini dapat dilihat pada Gambar 5. 16 diatas. Grafik posisi end-effector terhadap sumbu Y dan Z pada tahap memasukkan dapat dilihat pada gambar berikut ini.

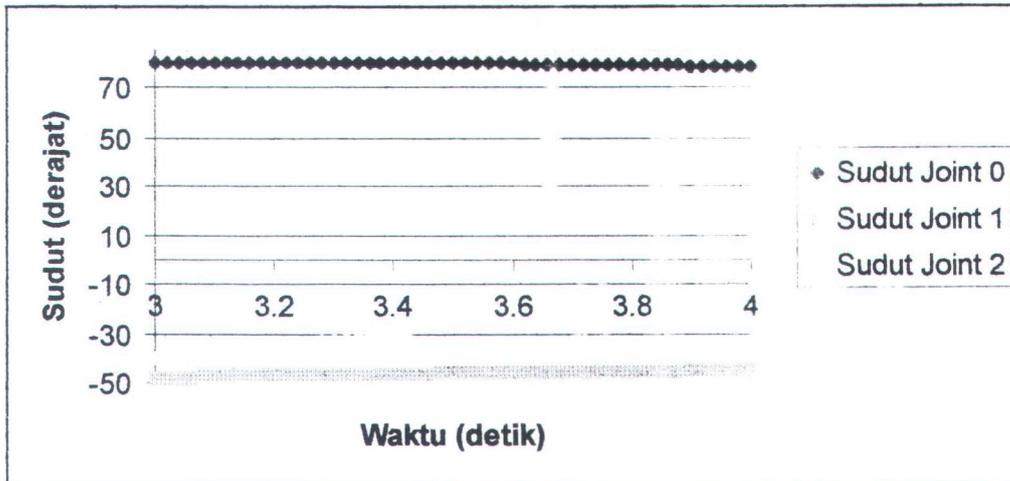


Gambar 5.17 Posisi Y end-effector hasil simulasi

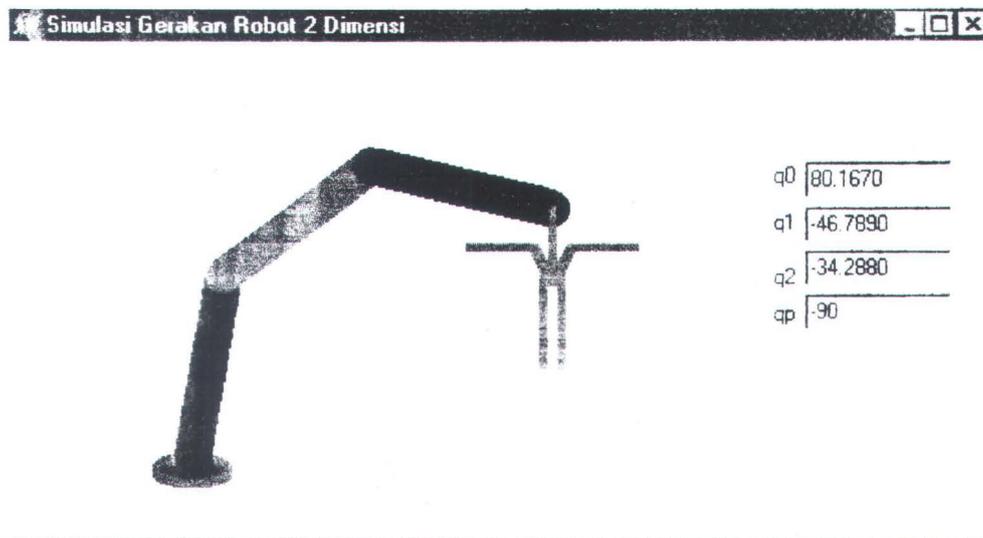


Gambar 5.18 Posisi Z end-effector hasil simulasi

Sedangkan grafik posisi sudut joint selama proses memasukkan dapat dilihat pada Gambar 5.19 dibawah ini.

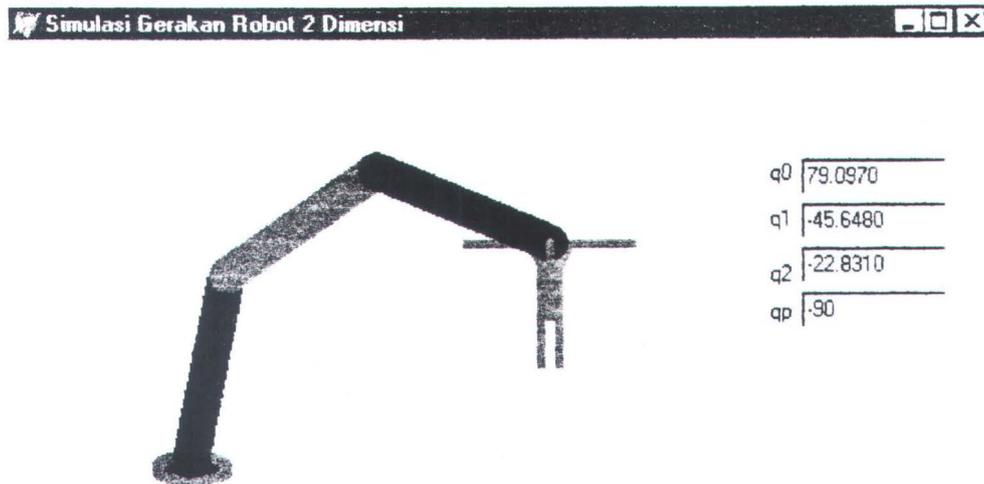


Gambar 5.19 Sudut joint 0, 1 dan 2 hasil simulasi



Gambar 5.20 Simulasi gerak fisik pada tahap penyisipan

Sedangkan posisi akhir pemasangan, dimana paku sudah dimasukkan sepenuhnya, dapat dilihat pada Gambar 5.21 berikut:



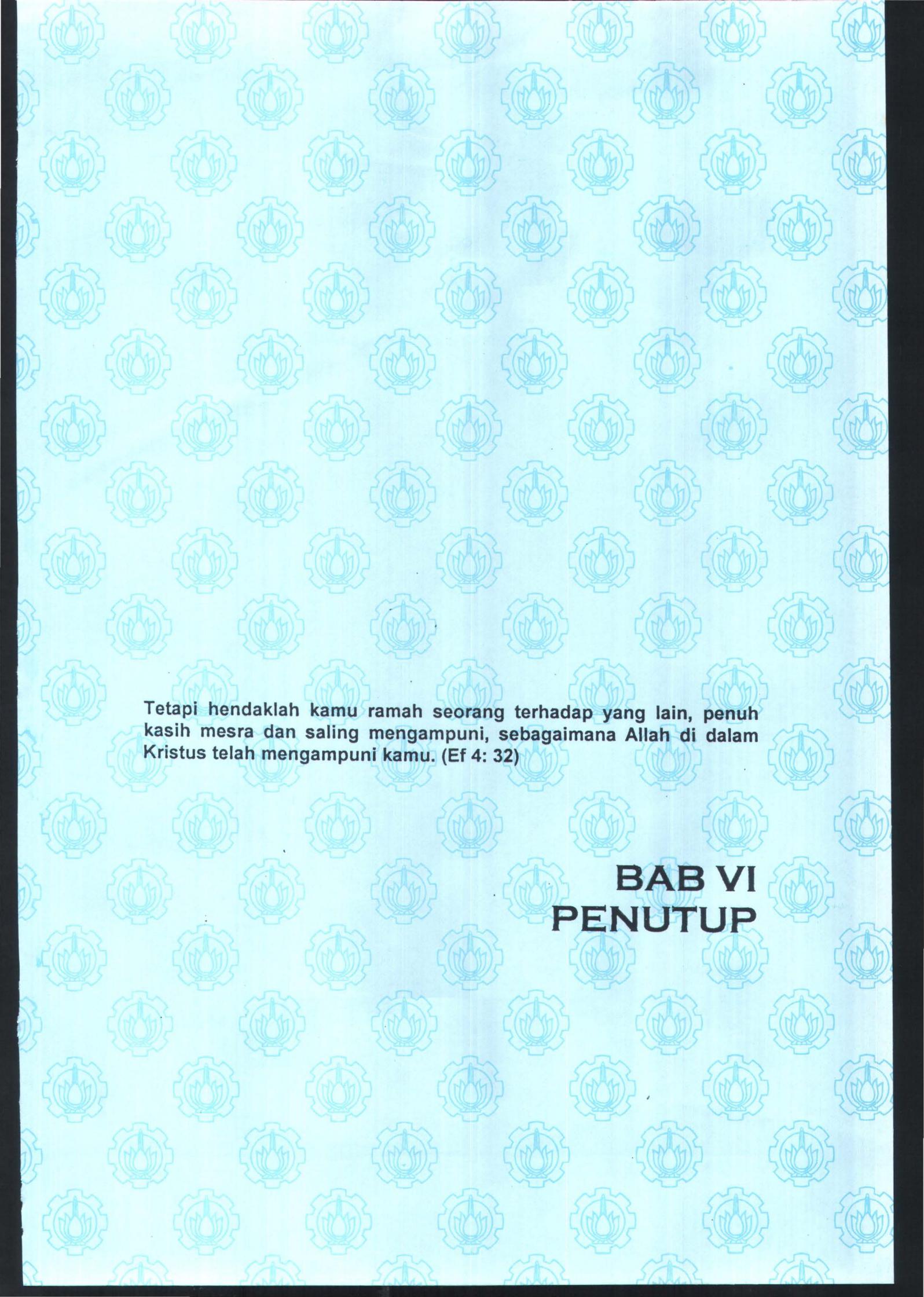
Gambar 5.21 Posisi akhir pemasangan

## 5.5 PARAMETER IMPEDANSI

Parameter-parameter target impedansi yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 5.2 Parameter impedansi yang ditetapkan pada tiap tahap

Parameter	Menuju titik kontak	Menuju Bidang miring	Melalui Bidang miring	Tahap Memasukkan
$M_e$ (kg)	diag[1,1]	diag[1,1]	diag[1,1]	diag[1,1]
$B_e$ (N/(m·s))	diag[200,200]	diag[100,5]	diag[100,20]	diag[5,100]
$K_e$ (N/m)	diag[10,10]	diag[10,1]	diag[10,5]	diag[5,10]



**Tetapi hendaklah kamu ramah seorang terhadap yang lain, penuh kasih mesra dan saling mengampuni, sebagaimana Allah di dalam Kristus telah mengampuni kamu. (Ef 4: 32)**

## **BAB VI PENUTUP**

## **BAB VI**

### **PENUTUP**

---

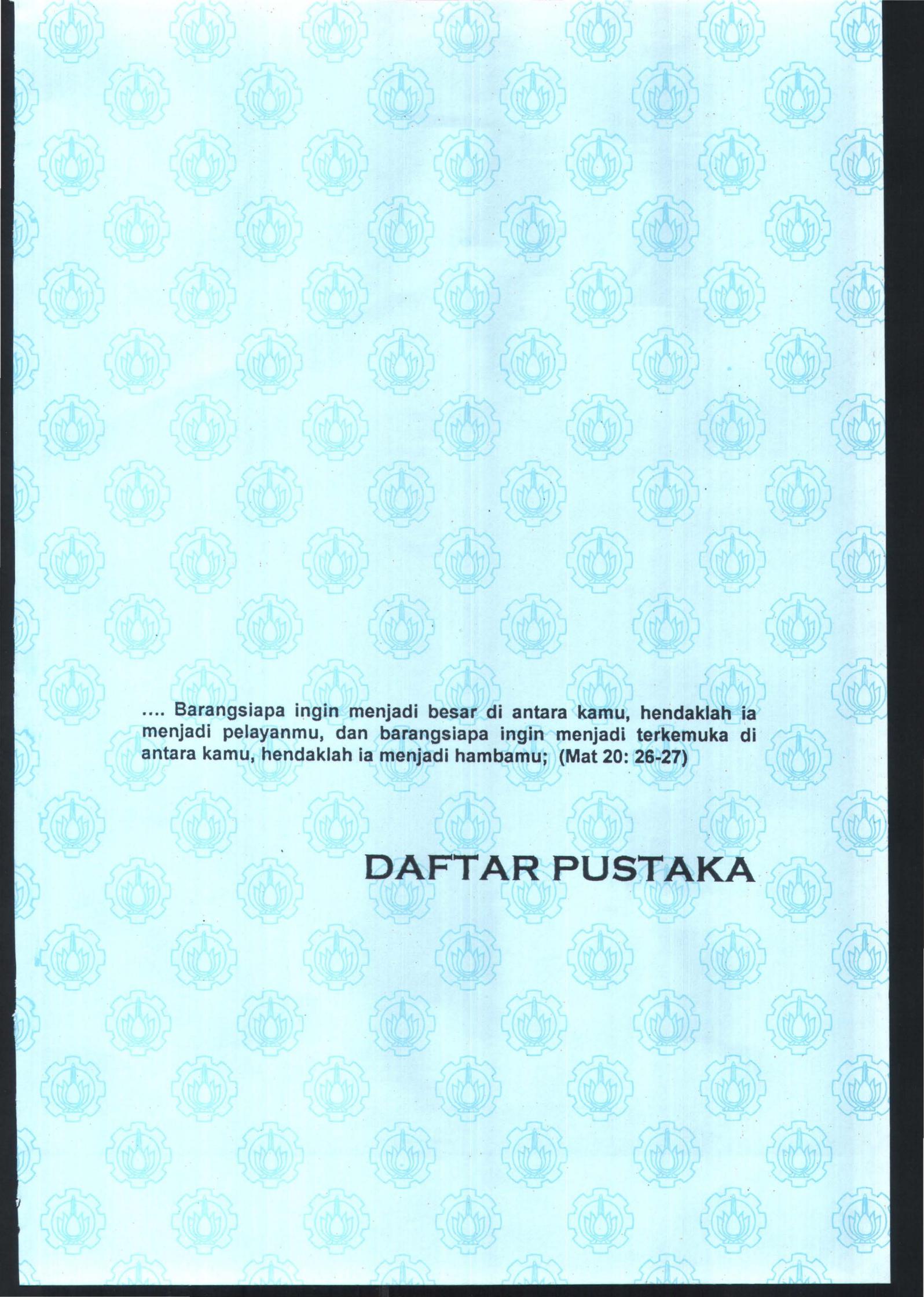
#### **6.1 KESIMPULAN**

Dari pembahasan yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan. Kesimpulan-kesimpulan tersebut adalah:

1. Kelemahan dari pemasangan paku pada lubang dengan cara pengaturan impedansi yang dibahas pada tugas akhir ini adalah perlunya mengetahui secara pasti data-data dari lingkungan robot.
2. Dari hasil data yang diperoleh, meskipun pengaturan dilakukan dengan menggunakan koordinat cartesian, tidak terdapat lompatan harga yang berarti setelah diubah dalam pada koordinat joint.

#### **6.2 SARAN**

Saran yang dapat diberikan dengan terselesaikannya tugas akhir ini adalah: Perlunya penelitian lebih lanjut untuk pengembangan teknik pemasangan dengan tidak perlu mengetahui karakteristik lingkungan secara pasti, yang pada kenyataannya sulit didapat, sehingga diharapkan kualitas dan kuantitas hasil pemasangannya lebih baik



.... Barangsiapa ingin menjadi besar di antara kamu, hendaklah ia menjadi pelayanmu, dan barangsiapa ingin menjadi terkemuka di antara kamu, hendaklah ia menjadi hambamu; (Mat 20: 26-27)

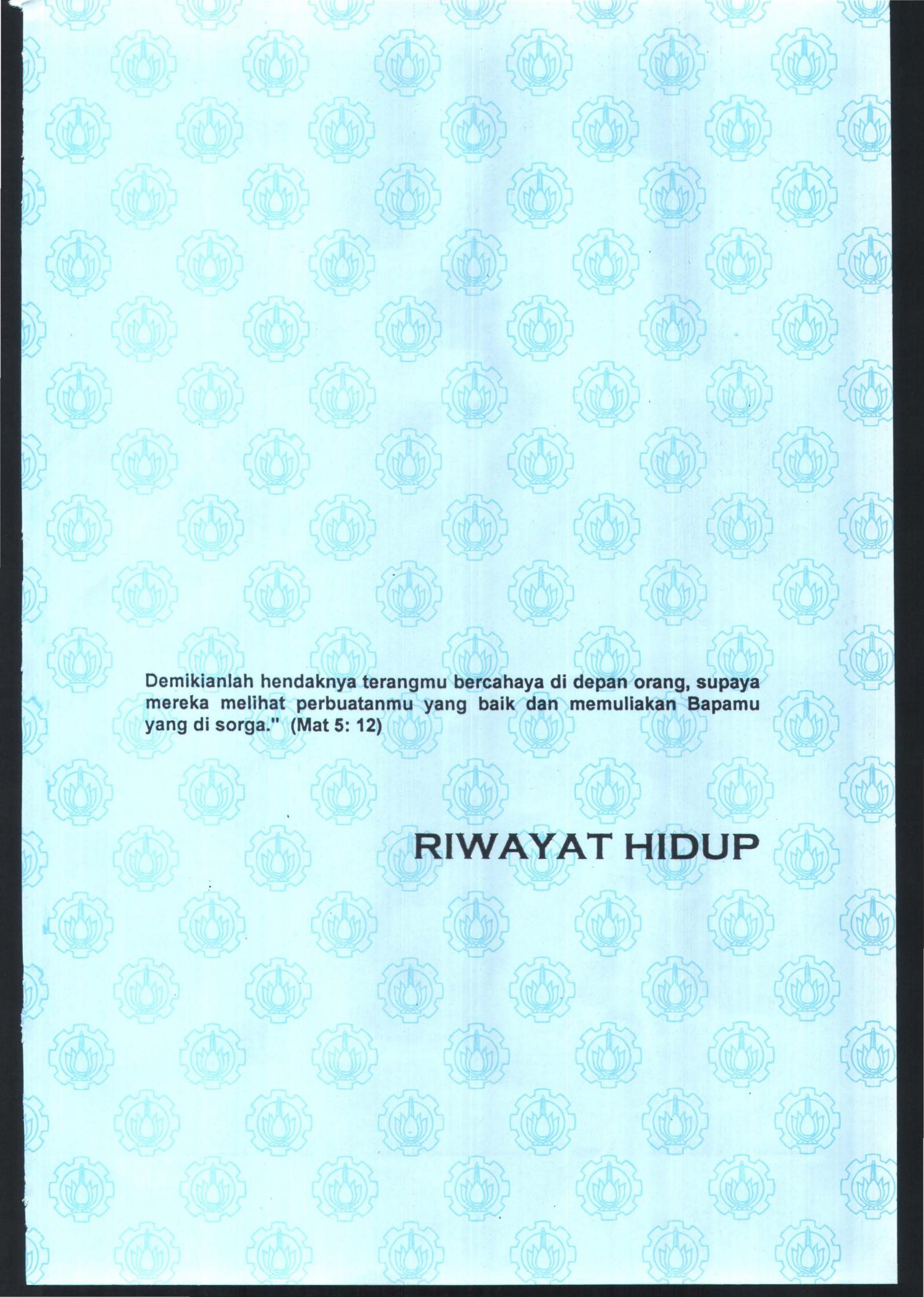
## DAFTAR PUSTAKA

## DAFTAR PUSTAKA

---

- Asada, H** and Slotine, J.J , *Robot Analysis and Control*, New York, John Willey and Sons.inc., 1986.
- Brady, M**, Hollerbach, T. L, Johnson, T. L, Lozano-Perez, T, Mason, M. T, *Robot Motion Planing and Control*, MIT Press, Cambrige, Massachusetts and London, 1982.
- Carvert, C**, Charlie Calvert's C++ Builder Unleashe, SAMS, Santa Cruz, March, 1997.
- Craig, J.J**, *Introduction to Robotics Mechanics & Control*, Addison-Wesley Publishing Company, Stanford University, California, 1984.
- Jazidie, A.**, *Modeling and Simulation Impedance Control of Redundant Manipulator Systems*, Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering Hiroshima, Hiroshima University, 1995.
- Jung, S**, Hsia, T. C dan Bonitz, R. G, *On Force Tracking Impedance Control with Unknown Environment Stiffness*, Department of Electrical and Computer Engineering University of California, 1995.
- Jung, S**, Hsia, T. C dan Bonitz, R. G, *On Robust Impedance Force Control of Robot Manipulator*, Department of Electrical and Computer Engineering University of California, 1995.
- Klafter, R. D**, Chmielewski, T.A, Negin, M, *Robotic Engineering an Integrated Approach*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

- Li, Y**, *Hybrid Control Approach to the peg-in-Hole Problem*, IEEE Robotics and Automation Magazine, pp 52-60, June 1997.
- Paulos, E, Canny, J**, *Informed peg-in-hole Using Optical Sensors*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, 1994.
- Pranata, A**, *Pemrograman Delphi (sampai dengan versi 3)*, Andy Offset, Yogyakarta, 1997.
- Sarwanto, A**. *Sistem Pengaturan Impedansi Robot Berdasarkan pada Pengaturan Posisi Kokoh*, Laboratorium Sistem Pengaturanm, Jurusan Elektro – ITS, Surabaya, 1997.
- Spong, M. W, Vidyasagar, M**, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, Canada, 1989.



**Demikianlah hendaknya terangmu bercahaya di depan orang, supaya mereka melihat perbuatanmu yang baik dan memuliakan Bapamu yang di sorga." (Mat 5: 12)**

## **RIWAYAT HIDUP**

## RIWAYAT HIDUP

---



Giat M. Simanjuntak, dilahirkan di Tapanuli Utara pada tanggal 9 Maret 1975 dari pasangan Suman Simanjuntak dan Elseria Panjaitan. Merupakan anak ketujuh dari sembilan bersaudara. Bertempat tinggal di Sigumpar, Tapanuli Utara.

Riwayat Pendidikan yang telah ditempuh adalah:

- Tahun 1987 lulus SD N. 2 Sigumpar, Tapanuli Utara.
- Tahun 1990 lulus SMP N. Sigumpar, Tapanuli Utara .
- Tahun 1993 lulus dari SMA N. 1 Balige, Tapanuli Utara.
- Sejak tahun 1994 terdaftar sebagai mahasiswa pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama kuliah ikut menjadi asisten praktikum sejak tahun 1997 pada Laboratorium Teknik Sistem Pengaturan

Pada bulan Juli 2000 mengikuti seminar dan ujian tugas akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik