

25147/H/06



**PERENCANAAN GERAKAN BERBASIS *SPLINE*  
UNTUK ROBOT PENGISIAN BBM**

Oleh :

**SUGIARTO**  
NRP. 2203 202 819

RTE  
629.892  
Sug  
p-1  
2005



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	16 - 2 - 06
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	224047

**PROGRAM STUDI MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
(MEKATRONIKA)  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2005**

# PERENCANAAN GERAKAN BERBASIS SPLINE UNTUK ROBOT PENGISIAN BBM

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :


**Sugiarto**

NRP: 2203 202 819

Tanggal Ujian : 4 Agustus 2005

Periode Wisuda : Maret 2006

Setujui oleh Tim Penguji Tesis:

  
Dr. Djoko Purwanto, M.Eng. Ph.D.  
NIP. 131 879 397

(Pembimbing)

  
Dr. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.  
NIP. 131 918 366

(Penguji)

  
Dr. Katjuk Astrowulan, MSEE  
NIP. 130 687 438

(Penguji)

  
Dr. Totok Mujiono, M.Ikom  
NIP. 131 846 106

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana

  
Prof. Ir. Happy Ratna S., M.Sc., Ph.D.  
NIP. 130 541 829



## ABSTRAK

### PERENCANAAN GERAKAN BERBASIS SPLINE UNTUK ROBOT PENGISIAN BBM

Oleh : Sugiarto  
NRP : 2203 202 819  
Pembimbing : Dr.Ir.Djoko Purwanto,M.Eng.

Robot yang bergerak secara otomatis membutuhkan sistem *navigasi* yang mampu memandu pergerakan manipulator robot dari konfigurasi awal (*initial condition*) sampai dengan konfigurasi akhir (*final condition*). Salah satu sistem navigasi yang dipakai sebagai acuan oleh robot adalah perencanaan gerakan (*motion planning*). Penggunaan gerakan berbasis *B-Spline* yang dalam hal ini adalah suatu perencanaan gerakan ujung lengan robot atau *end-effector* dari posisi awal sampai dengan tujuan secara *sequensial* dan berurutan melalui titik-titik yang telah ditentukan dalam domain waktu. Lintasan dari gerakan kenematika manipulator ujung lengan robot dari posisi parkir sampai ke tujuan (*target*) dengan asumsi terbebas dari halangan (*obstacle*).

Pada penelitian lengan robot untuk pengisian BBM ini, mensimulasikan perencanaan gerakan (*motion planning*) ujung lengan robot *4DoF* yang dalam menyelesaikan permasalahan ini dipergunakan metode persamaan-*recursi* berbasis *B-Spline*. Berdasarkan analisa data perencanaan lintasan diperoleh kesimpulan bahwa: Trajektori pada resolusi 8 bit tingkat akurasi 90,47% dengan *error* absolut rata-rata 0,095. Trajektori pada resolusi 12 bit tingkat akurasi 99% dengan *error* absolut rata-rata 0,01. Dan trajektori pada resolusi 16 bit tingkat akurasi tertinggi 99,94% dengan *error* absolut rata-rata 0,0006.

Kata kunci : *motion planning, recursi, obstacle, B-Spline.*

## ABSTRACT

### MOTION PLANNING FOR ROBOT BBM USING B - SPLINE

By : Suugiarto

NRP : 2203 202 819

Under the supervision : Dr.Ir.Djoko Purwanto,M.Eng

*Peripatetic Robot that moving with automatically used navigation system automatic to move from initial condition to final condition. A navigation system that used as base by robot to actuation is the path planning. Usage of movement B - Spline which in this case is planning of movement tip of robot arm or of end-effector of position early up to target by sequensial and successive dots which have been determined. Path planner kinematic movement of robot manipulator based on minimum distance from initial to final condition and avoid of obstacle.*

*This research explained to simulate end point movement of 4DoF robot by motion plenning B-Spline movement methode. Pursuant to data analized of trajectory planner could concluded that : Trajectory on resolution 8 bit height level accuracy 90.47 % with average of absolute error 0.0006. Trajectory on 12 bit resolution height level accuracy 99% with average of absolute error 0.01. And trajectory on 16 bit heigh level accuracy 99,94% with average of absolute error 0,0006.*

*Key word : motion planning, recursi, obstacle, hight level accuracy, absolute error.*

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>Halaman Judul</b>	<b>i</b>
<b>Halaman Pengesahan</b>	<b>ii</b>
<b>Abstrak</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Daftar Isi</b>	<b>v</b>
<b>Daftar Gambar</b>	<b>viii</b>
<b>Daftar Tabel</b>	<b>ix</b>
<b>BAB.I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
<b>BAB.II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>6</b>
2.1 Sistem Penyaluran BBM	6
2.2 Definisi dan Pengertian Robot	7
2.3 Kinematika Robot	8
2.3.1 Kinematika Manipulator Robot 4 <i>DoF</i>	11
2.3.2 Kinematika (Model Matematik) Manipulator Robot 4 <i>DoF</i>	13
2.3.3 Kinematika Kecepatan	14
2.3.4 <i>Forwad Kinematic Solotion</i> (FKS)	17
2.3.5 <i>Representasi Danavit-Hartemberg</i>	18



2.3.6 <i>Invers</i> Posisi	21
2.3.7 <i>Invers</i> Orientasi	21
2.3.8 Sudut-sudut <i>Euller</i>	21
2.4 Interpelasi Gerakan	22
2.4.1 LSPB ( <i>Linier Segment With Parabolic Blend</i> )	24
2.4.2 Gerakan waktu minimum	26
2.4.3 Perencanaan Gerakan	26
<b>BAB. III PERENCANAAN SIMULASI GERAKAN (<i>SIMULATION MOTION PLANNING</i>)</b>	27
3.1 Studi Pustaka dan Survai Lapangan	27
3.2 Perencanaan Sistem Gerakan	28
3.2.1 Perencanaan <i>Software</i>	28
3.2.2 Perencanaan Ruang Gerak Join	28
3.3 Unsur-unsur Perencanaan Gerakan	29
3.4 Kurva Gerakan <i>B-Spline</i>	31
3.5 Konstruksi <i>B-Spline</i>	31
3.6 Basis Fungsi <i>B-Spline</i>	33
3.7 Algoritma <i>Recursion B-Spline</i>	34
3.8 Identifikasi <i>Plant</i>	35
3.8.1 Konstruksi Robot Lengan	35
3.8.2 Perhitungan Pipa dan Motor Pada Tiap-tiap <i>Link</i>	36
3.8.3 Kerangka Koordinat	40
3.8.4 Rencana Aplikasi Robot Lengan	40

<b>BAB.IV ANALISA DATA <i>MOTION PLANNING</i></b>	41
4.1 Koordinasi Ujung Robot Lengan	42
4.2 Penetapan Titik-titik Gerakan	42
<b>BAB.V PENUTUP</b>	51
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	52
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	54
1. Rencana Kegiatan	54
2. Data Simulasi	55
3. Data Pribadi	57

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1 Diagram Sistem Penyaluran Minyak Dari Sumber <i>Loading Arm</i>	7
Gambar 2.2 Sistem Koordinat Segi Empat dengan kaidah tangan kanan	9
Gambar 2.3 Model Matematik Manipulator	11
Gambar 2.4 Model Geometris Robot 4 <i>DoF</i>	12
Gambar 2.5 Kerangka pada Bagian Robot	17
Gambar 2.6 Kerangka DH Parameter	19
Gambar 2.7 Rangkaian dalam Lintasan Robot	23
Gambar 3.1 Diagram Unsur <i>Motion Planner</i>	29
Gambar 3.2 Blok Diagram <i>Motion Planner</i>	30
Gambar 3.3 Kurva <i>cubic B-Spline</i>	32
Gambar 3.4 Kurva Pengendalian <i>B-Spline</i> Secara Lokal	32
Gambar 3.5 Diameter Dan Panjang Pipa Lengan	36
Gambar 3.6 Berat Cairan dan Berat Selang	36
Gambar 3.7 Potongan Lengan 4	37
Gambar 3.8 Pengisian Dengan Asumsi Lubang Tepat Pada Sumbu Y	40
Gambar 3.9 Rencana Aplikasi Robot Lengan	40



## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 4.1 Perencanaan gerakan	42

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Dengan pesatnya inovasi rekayasa teknolog *Robotic* dan tuntutan efisiensi kerja, maka robot menjadi salah satu instrument alternatif untuk membantu tugas-tugas manusia. Karena robot memiliki kemampuan dan ketahanan spesifik sesuai dengan situasi dan kondisi lingkungan tempat robot difungsikan. Dengan berbagai aplikasi mulai dari proses produksi pada suatu industri, peralatan medis, peralatan rumah tangga dan lain-lain yang bersifat *kotinyu* maka diperlukan robot yang presisi.[1]

Salah satu robot yang sering difungsikan untuk melakukan tugas-tugas tertentu yang sifatnya berulang-ulang adalah robot tangan (*Robot Arm*).

Efektifitas industri robot dapat dikembangkan dengan memberikan kemampuan perencanaan gerakan untuk pengisian BBM pada mobil tangki. Tugas pengisian melalui pendekatan *end effector robot* ke suatu obyek dengan menyesuaikan lokasi dan kecepatannya dalam waktu yang seoptimal mungkin.

Dalam strategi *Prediction Planning Execution* (PPE) gerakan sebuah obyek dalam ruang kerja (*Work Space*) dapat diprediksikan. Gerakan yang diprediksi dapat dimanfaatkan untuk meminimalkan waktu pengisian.

Sejumlah usaha telah dilakukan oleh para ahli untuk melakukan penelitian robotika untuk meningkatkan performasi perencanaan gerakan (*motion planning*). Penelitian lain yang berhubungan dengan masalah perencanaan gerakan adalah untuk *tracking* obyek

bergerak menggunakan pendekatan *on-line* yang dikenal dengan nama teknik pemanduan navigasi (*navigation guidance based*). Dengan teknik ini robot dibawa ke suatu titik cabang (*switching point*) yang optimal, kemudian metode *tracking konvensional* mengambil alih kontrol robot untuk membawa *end-effector* ke titik tracking yang sesuai lokasi dan kecepatan target.

Arah pengembangan robotika saat ini adalah adanya inisiatif disain kreatif dalam pelaksanaan kerja dan memerlukan kemudahan serta kenyamanan dalam melakukan proses kerja.

Pengendalian posisi ujung lengan robot ini dibagi menjadi dua jenis yaitu pengendalian jenis *robot point to point* (PTP) dan pengendalian jenis *continuous pa* (CP). Untuk pengendalian jenis PTP, maka robot ini dipakai untuk mencapai posisi titik tertentu ke titik koordinat berikutnya, tanpa memperhatikan lintasan yang dilalui. Sedangkan untuk pengendalian jenis CP, maka lintasan ujung lengan robot bergerak mengikuti lintasan yang telah ditentukan. Baik jenis robot PTP maupun jenis robot CP, yang diprogram.

Untuk memenuhi persyaratan dalam pendidikan S2 penulis mengadakan penelitian *perencanaan gerakan berbasis Spline*, gerakan dari suatu robot lengan yang se-efektif mungkin bila dibandingkan dengan operasi secara konvensional.[2]

Berdasarkan pertimbangan dari hasil penelitian tersebut diatas maka penulis ingin mengimplementasikan perencanaan gerakan (*motion planning*) algoritma *recursi* berbasis *B-Spline* pada sebuah simulator manipulator *Robot Arm* untuk pengisian BBM armada truk tanki pada depot-depot pemasaran.



## 1.2 Perumusan masalah

Berdasarkan latar belakang maka permasalahan yang terjadi perlu dirumuskan dan dipecahkan, dalam hal ini perumusan masalahnya adalah:

1. Identifikasi *Plant*.
2. Merencanakan gerakan robot berbasis *B-Spline*.
3. Simulasi gerakan untuk lengan robot pengisian BBM.



Di dunia industri telah banyak difungsikan robot untuk membantu menyelesaikan pekerjaan-pekerjaan yang tidak dapat dikerjakan oleh manusia baik ditinjau dari faktor ekonomis maupun keselamatan kerja. Hal ini dikarenakan robot didisain agar memiliki kemampuan dan ketahanan spesifik sesuai dengan situasi dan kondisi tempat robot difungsikan. Misalnya untuk pekerjaan pengelasan, pemotongan plate logam, pengecatan dan sebagainya. Bentuk pekerjaan tersebut merupakan suatu lintasan kedudukan sejumlah titik dalam koordinat kartesian.

Salah satu jenis robot industri yang banyak difungsikan adalah robot lengan (*robot arm*). Manipulator robot lengan terdiri atas *base*, *link* dan *joint* serta pada ujungnya terpasang *gripper*. Jumlah *joint* dan arah gerakannya menentukan jenis derajat kebebasan robot "DoF" (*degree of freedom*). Robot lengan *4DoF* memiliki empat *link* dan tiga *joint* dengan empat arah gerakan. *Joint-1* bergerak revolusi horisontal (searah bidang XY), *joint-2* dan *joint-3* serta *joint-4* bergerak revolusi vertikal (searah bidang XZ). Jadi gerakan robot merupakan kombinasi dari gerakan ketiga *joint* dan *link* relatif terhadap *base frame*.

Lintasan target dalam ruang kerja robot, biasanya dinyatakan dalam koordinat kartesian (X, Y, Z). Oleh karena itu diperlukan suatu transformasi dari koordinat target

menjadi sudut join untuk menggerakkan robot. Persoalannya adalah bahwa gerakan ujung lengan robot (*end point*) tidak tepat benar mengikuti lintasan target yang diinginkan, sehingga terjadi *error*. Oleh karena itu pada penelitian ini penulis mengambil topik tentang perencanaan gerakan robot lengan untuk menggambarkan suatu bentuk gerakan tertentu sesuai dengan target yang dikehendaki.

Simulasi robot lengan merupakan manipulator stasioner dengan derajat kebebasan masing-masing *link* secara paralel disambungkan sebuah join yang digerakkan oleh *actuator* motor DC (*Motor Stapper*).[3]

### 1.3 Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini maka penulis adakan pembatasan permasalahan, terbatas pada **perencanaan gerakan (*motion planning*) berbasis *B-Spline*** dalam domain waktu mengikuti titik-titik yang telah ditentukan dengan asumsi robot lengan dalam kondisi sempurna.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun target dari penyusunan tesis ini adalah untuk merancang simulasi perencanaan gerakan berbasis *B-Spline* pada robot lengan *4DoF*, serta menganalisa hasil simulasi untuk menentukan tingkat akurasi dengan melihat *error* gerakannya. Kemudian membuat bentuk-bentuk gerakan tertentu yang menggambarkan proses penggambaran gerakan (*motion*). Diharapkan dengan ditentukannya titik-titik lintasan, dapat dilalui dengan sesuai dalam waktu yang telah ditentukan serta jarak tertentu dari titik parkir sampai ke titik yang dituju.

Dari percobaan dengan simulasi, maka dari tesis ini dapat dianalisis sistem kerja dari gerakan robot lengan (*4DoF*) yang direncanakan.

Dari pembatasan permasalahan diatas, ada beberapa tujuan yang ingin dicapai dari hasil penelitian ini. Adapun tujuan yang ingin diujutkan pada penelitian ini adalah:

1. Untuk mewujudkan perencanaan gerakan dengan suatu simulasi lengan robot (*Robot Arm*) pengisian BBM.
2. Untuk menganalisa suatu gerakan berbasis *B-Spline* dari hasil simulasi lengan robot dengan *4DoF*, sehingga diperoleh data untuk menentukan tingkat keakurasiannya.
3. Untuk menuangkan kedalam tulisan perencanaan gerakan berbasis *B-Spline*, dengan suatu analisis dari simulasi serta beberapa percobaan. Pada suatu robot lengan *4DoF*.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

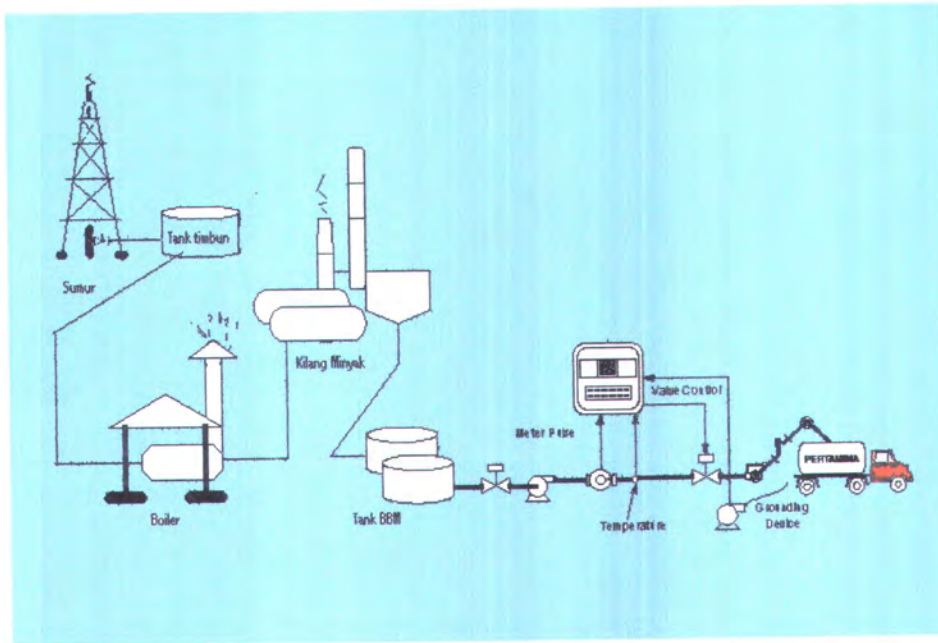
#### 2.1 Sistem Penyaluran BBM

Dari beberapa sumur minyak yang berada dilapangan, diproduksi dengan ditarik menggunakan pompa angguk atau menggunakan pompa *Redha*. Minyak mentah hasil produksi ditampung pada tanki penampungan awal, selanjutnya minyak mentah dikirim menuju kilang distilasi untuk diproses dengan dipompakan melalui sebuah pemanas.

Dari hasil proses menghasilkan beberapa macam produk, produk tersebut diantaranya adalah BBM (bahan bakar minyak). Bahan bakar minyak disalurkan menuju tanki-tanki penampungan sesuai dengan jenisnya.

Untuk selanjutnya BBM ditarik dengan pompa sentrivugal menuju *loading arm* melalui meter arus untuk dipasarkan, dalam pemasaran melalui armada truk tanki dengan berbagai macam ukuran. Jumlah armada untuk pendistribusian BBM yang dilayani setiap harinya cukup banyak serta diperlukan pelayanan yang cepat dan tepat. Maka menggunakan lengan robot adalah suatu cara untuk menggantikan seorang operator dalam melayani penjualan.

Menggunakan lengan robot, diharapkan dapat menanggulangi keperluan dari semua mitra kerja yang melaksanakan pendistribusian BBM kepada beberapa wilayah SPBU (stasiun pengisian bahan bakar untuk umum). Pada Gambar 2.1. disajikan tentang sistem penyaluran minyak mentah sampai dengan masing-masing tahapan penyaluran bahan bakar minyak, mulai dari sumur-sumur minyak sampai ke *Loading Arm*. [4]



Gambar 2.1 Diagram Penyaluran Minyak dari Sumber sampai *Loading Arm*. [4]

## 2.2 Definisi dan Pengertian Robot

Dalam hal ini Institut Robot Amerika (*Robotics Institut of America*) mendefinisikan, bahwa robot adalah sebuah manipulator yang dapat diprogram dan mempunyai banyak kegunaan diantaranya untuk memindahkan benda, peralatan atau suatu sistem khusus dengan bermacam-macam gerakan untuk menyelesaikan tugas. [2]

Institut Robot Amerika (*Robotics Institut of America*) mendefinisikan robot adalah sebuah manipulator yang dapat diprogram dan mempunyai banyak kegunaan diantaranya untuk memindahkan benda, peralatan atau suatu sistem khusus dengan bermacam-macam gerakan untuk menyelesaikan tugas tertentu.

Berdasarkan sistem koordinatnya, robot diklasifikasikan menjadi empat macam yaitu: robot *Cartesian*, robot *Spherical*, robot *Cylindrical*. Ada tiga macam gerakan dasar robot yaitu : Gerakan *Swipe* adalah gerakan rotasi terhadap sumbu longitudinal dari *link*



antara dua *joint*, Gerakan *Bending* adalah gerakan rotasi terhadap sumbu potong pada *joint*, Gerakan Prismatik adalah Gerakan Linier pada arah sumbu *longitudinal*.

### 2.3 Kinematika Robot

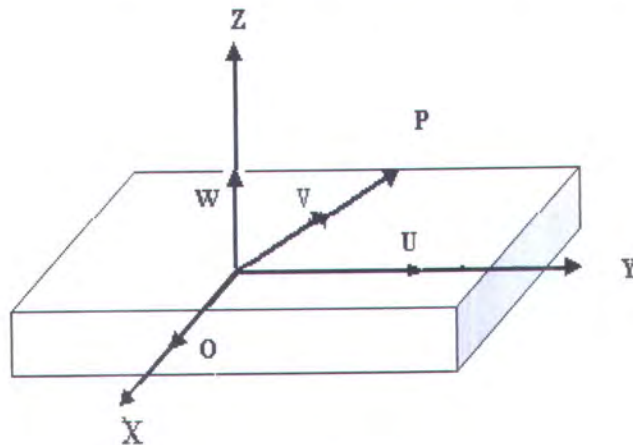
Kinematika manipulator-manipulator robot adalah studi mengenai gerakan yang tidak tergantung pada gaya-gaya yang menyebabkan gerakan tersebut. Setiap robot dapat dideskripsikan secara kinematik dengan jalan memberikan harga-harga kepada empat buah kuantitas untuk setiap *link*. Keempat kuantitas ini disebut parameter-parameter *Denavit-Hartenberg*. *Brockett* menghubungkan teori *Lie groups* dan kinematika robot dengan mengintroduksi persamaan-persamaan hasil kali eksponensial (*product-of-exponential, POE*) untuk kinematika langsung (*forward kinematics*). Meskipun spesifikasi puntiran sendi (*joint twist*) dapat ditentukan dengan eksponensial matriks yang membutuhkan enam parameter independen, tetapi puntiran sendi tersebut dapat ditentukan secara lebih langsung dengan jalan menentukan arah poros sambungan. Salah satu keistimewaan yang paling menarik dari *POE* adalah penggunaan dua kerangka koordinat (*coordinate frame*), yaitu *base frame* dan *tool frame*. Sifat ini, digabungkan dengan signifikansi geometrik puntiran, membuat penggunaan *POE* menjadi alternatif yang menarik untuk penggunaan parameter-parameter *Denavit-Hartenberg*.

Kinematika robot adalah ilmu yang mempelajari gerakan robot tanpa mempertimbangkan gaya yang diberikan. Kinematika manipulator robot menunjukkan geometris dari gerak robot yang mengacu pada sistem kordinat sebagai fungsi waktu, termasuk mempelajari hubungan antara variabel *joint space* dengan posisi dan orientasi *end effector* lengan robot.[5]



Lengan robot merupakan suatu benda tegar set *PTP (point-to-point)* dengan dua jarak antara manapun sepanjang mereka tidak pernah bervariasi. Manipulator robot dipelajari didalam uraian ini digambarkan sebagai koleksi benda tegar, merupakan mata rantai kaku, yang dihubungkan oleh sambungan. Posisi satu mata rantai sehubungan dengan yang lain di dalam suatu rantai kinematik digambarkan maematikanya dengan suatu perubahan bentuk koordinat antara bingkai acuan berkait dengan masing-masing struktur.[5]

Pada Gambar 2.2 menunjukkan sistem koordinat segi empat dengan kaidah tangan kanan, yang dinamakan sistem koordinat segi empat OXYZ dengan OX, OY



Gambar 2.2 Sistem Koordinat Segi Empat dengan Kaidah Tangan Kanan.[1]

dan OZ sebagai sumbu koordinat dan sistem koordinat OUVW dengan OU,OV dan OW sebagai sumbu koordinat. Misal titik P tetap pada rangka koordinat OUVW. Koordinat titik P boleh diwakilkan melalui koordinatnya dengan menunjuk kepada sistem koordinat OUVW dan OXYZ, dengan masing-masing ditunjukkan sebagai berikut:

$$P_{UVW} = (P_U, P_V, P_W) \text{ dan } P_{XYZ} = (P_X, P_Y, P_Z) \quad (2.1)$$

Suatu matriks transformasi 3x3  $\mathbf{R}$  dapat memindahkan koordinat  $P_{UVW}$  yang mengacu pada sistem koordinat OXYZ, selepas sistem koordinat OUVW diputar, maka diperoleh:  $P_{XYZ} = RP_{UVW}$  (2.2)

Tiga matrik putar dasar yang digunakan :[1]

$$R_{X,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}; R_{Y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \text{ dan } R_{Z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Adapun matrik transformasi *homogeneous* adalah matriks 4x4 dimana pemetakan satu vektor posisi yang diungkapkan dalam koordinat-koordinat dari suatu sistem koordinat pada sistem koordinat yang lain. Suatu matriks transformasi *homogeneous* mengandung empat submatriks:[1]

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & F_{3x1} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{MatriksPutaran} & \text{vektorposisi} \\ \text{transformasiperspektif} & \text{penskalaan} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Matriks transformasi *homogeneous* digunakan untuk menerangkan hubungan geometri antara rangka *body-attached*, OUVW dan sistem koordinat rujukan OXYZ. Prosedur umum yang digunakan untuk menentukan hubungan koordinat dari masing-masing sendi (*joint*) terhadap kordinat frame secara sistematik dapat menggunakan matrik transformasi *homogeneous* dengan menggunakan ketentuan *Denafit Hartenberg*. Keterangan merepresentasikan matrik transformasi *homogeneous* ( $A_i$ ) sebagai perkalian matrik empat transformasi dasar yang menunjukkan posisi dan orientasi dari *end-effektor*, perkalian empat transformasi dasar tersebut adalah:[1]

$$A_i = Rot_z, \theta_i \cdot Tran_z, d_i \cdot Tran_x, a_i \cdot Rot_x, \alpha_i \quad (2.5)$$

Dimana:



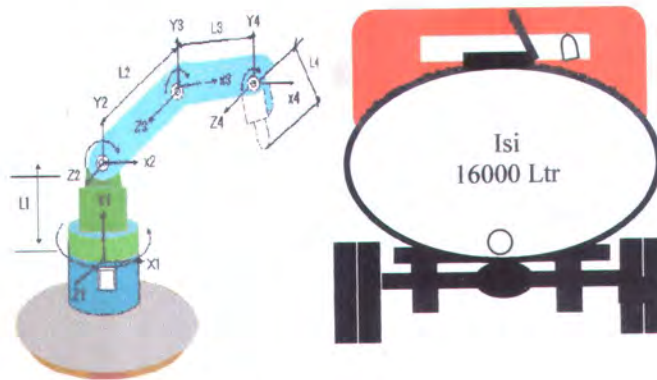
$a_i$  = jarak sepanjang  $X_i$  dari  $\theta_i$  menuju perpotongan sumbu  $X_i$  dan sumbu  $Z_{i-1}$ .

$d_i$  = jarak sepanjang  $Z_{i-1}$  dari  $\theta_{i-1}$  menuju perpotongan sumbu  $X_i$  dan  $Z_i$ .

$\alpha_i$  = Sudut antara  $Z_{i-1}$  dan  $Z_i$  diukur pada posisi  $X_i$ .

$\theta_i$  = Sudut antara  $X_{i-1}$  dan  $X_i$  diukur pada posisi  $Z_{i-1}$ .

### 2.3.1 Kinematika (Model Matematik) Manipulator Robot 4 DoF



Gambar 2.3 Model Matematik Manipulator

Model matematik robot lengan pada Gambar 2.3 secara garis besar terdiri atas landasan (*base*), lengan tegak, lengan atas, lengan bawah dan ujung pengisian. Dimana masing masing lengan disatukan dengan sendi (*joint*) secara *revolute*. Dengan demikian model manipulator ini tersusun atas empat parameter lengan dan empat parameter *joint*.

Dari ilustrasi robot 4 *DOF* tersebut dapat diperoleh sistem koordinat robot pada bidang kartesian (*workspace*) serta hubungannya dengan koordinat sudut untuk masing-masing lengan (*joinspace*).

Berdasarkan Gambar 2.3 sistem koordinat dapat dicari hubungan antara posisi *end-effector* (P) robot terhadap sudut dari masing-masing lengan.



Kinematika robot dari sistem koordinat dapat diperoleh sebagai berikut :

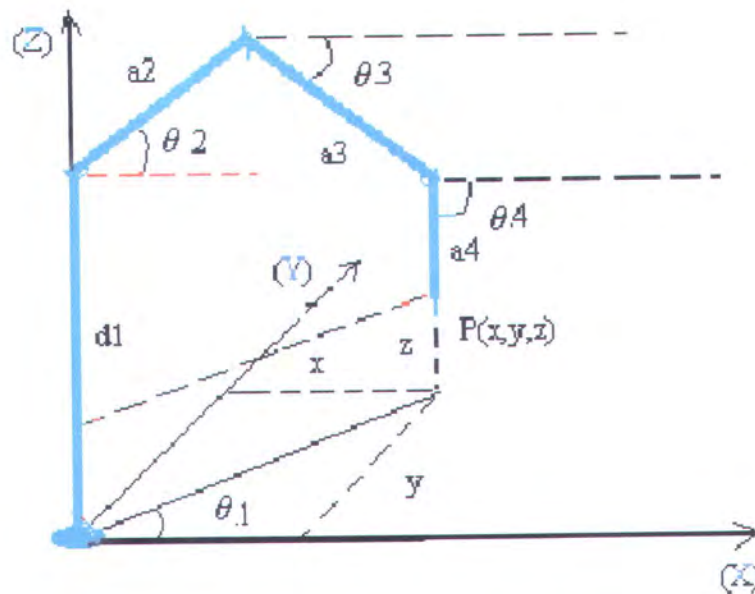
$$X = (a_2 \times \cos(\theta_2) + a_3 \times \cos(\theta_3) + a_4 \times \cos(\theta_4)) \times \cos(\theta_1)$$

$$Y = (a_2 \times \cos(\theta_2) + a_3 \times \cos(\theta_3) + a_4 \times \cos(\theta_4)) \times \sin(\theta_1)$$

$$Z = (a_2 \times \sin(\theta_2) + a_3 \times \sin(\theta_3) + a_4 \times \sin(\theta_4)) + d_1$$

$$\alpha = \theta_4$$

(2.6)



Gambar 2.4 Model Geometris Robot 4DoF

Dari Persamaan (2.5) dan (2.6) di atas dapat dihitung sudut putar  $\theta_1$  yaitu dengan membagi Y dengan X :

$$X = \cos \theta_1 (L_4 \cos(\theta_3 + \theta_4) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2)$$

$$Y = \sin \theta_1 (L_4 \cos(\theta_3 + \theta_4) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2)$$

Sehingga didapatkan :

$$\frac{Y}{X} = \tan \theta_1$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2.7)$$

Untuk menentukan sudut eta 4

$$X^2 + Y^2 + (Z-L_1)^2 - (L_2)^2 - (L_3)^2 - (L_4)^2 = 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot \cos(\pi - \theta_4)$$

$$-\cos \theta_4 = \left( \frac{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2 - L_4^2}{2 \times L_2 \times L_3 \times L_4} \right)$$

$$\theta_4 = -\cos^{-1}\left( \frac{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2 - L_4^2}{2 \times L_2 \times L_3 \times L_4} \right) \quad (2.8)$$

Dengan membuat transformasi geometris gambar manipulator 4 DoF

Untuk menentukan Sudut eta 2:

$$\theta_2 = \alpha + \beta$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left( \frac{Z - L_1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (2.9)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left( \frac{(X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2 + L_2^2 - L_3^2 - L_4^2)}{2 \times L_2 \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2}} \right) \quad (2.10)$$

Sehingga didapatkan sudut eta-2 :

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left( \frac{Z - L_1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) + \cos^{-1}\left( \frac{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2 + L_2^2 - L_3^2 - L_4^2}{2 \times L_2 \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - L_1)^2}} \right) \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Mencari Persamaan Kinematika Balik (*Inverse Kinematics*)

Setelah didapatkan Persamaan kinematika langsung berupa Persamaan posisi dan orientasi dari ujung lengan, maka tahap selanjutnya adalah mencari Persamaan *invers*.. Tujuannya untuk menghitung sudut-sudut  $\theta_i$  jika diketahui posisi dan orientasi ujung

lengan terhadap susunan sumbu koordinat acuan. Untuk mendapatkan parameter sudut joint dimodelkan geometris robot 4 *DoF* seperti Gambar 2.4.

Pada kinematika *invers* informasi posisi dan orientasi dari *end effector* dan parameter *link* diberikan sebagai masukan untuk mendapatkan posisi *joint*. Untuk mendapatkan kinematika *invers* pada robot 4 *DOF* secara geometris dapat dijelaskan dengan memperhatikan Gambar 2.4 Kinematika *invers* sistem koordinat diatas dapat diperoleh sebagai berikut :

$$\theta_1 = A \tan\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\theta_2 = A \tan\left(\frac{z - a_4 \times \sin(\alpha)}{\sqrt{x^2 + y^2} - a_4 \times \cos(\alpha)}\right) - A \tan\left(\frac{a_3 \times \sin(\theta_3)}{a_2 + a_3 \times \sin(\theta_3)}\right)$$

$$\theta_3 = A \cos\left(\frac{((z - a_4 \times \sin(\alpha))^2 + (\sqrt{x^2 + y^2} - a_4 \times \cos(\alpha))^2 - a_2^2 - a_3^2)}{2 \times a_2 \times a_3}\right)$$

$$\theta_4 = \alpha \tag{2.12}$$

### 2.3.3 Kinematika Kecepatan

Kinematika kecepatan memberikan hubungan antara kecepatan *linier* dan kecepatan sudut *end-effector* dengan kecepatan *joint*. Seperti telah ditunjukkan pada Gambar 2.4 sebelumnya, bahwa Persamaan kinematika yang berhubungan dengan *end effector* ( $x, y, z$ ) dan perpindahan *joint* ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ), perubahan sangat kecil dari sudut *joint manipulator* akan menyebabkan perubahan posisi dan orientasi *end effector*, oleh karenanya dengan menurunkan Persamaan 2.5 yang merupakan hubungan antara posisi *end effector* ( $x, y, z, \alpha$ ) terhadap posisi *joint* ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ), maka diperoleh :



$$\begin{aligned}
dx &= \frac{\partial x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_2} d\theta_2 \\
&\quad + \frac{\partial x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_4} d\theta_4 \\
dy &= \frac{\partial y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_4} d\theta_4 \\
&\quad + \frac{\partial y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_4} d\theta_4 \\
dz &= \frac{\partial z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_2} d\theta_2 \\
&\quad + \frac{\partial z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{\partial \theta_4} d\theta_4 \\
d\alpha &= \frac{\partial \alpha(\theta_4)}{\partial \theta_4} d\theta_4
\end{aligned} \tag{2.13}$$

bentuk Persamaan 2.12 dapat dituliskan dalam bentuk *vektor*

$$d\mathbf{x} = J d\boldsymbol{\theta} \tag{2.14}$$

$d\mathbf{x}$  dan  $d$  merupakan *vektor* perpindahan yang sangat kecil yang didefinisikan sebagai,

$$d\mathbf{x} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\alpha \end{bmatrix}, \text{ dan } d = \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ d\theta_4 \end{bmatrix}$$

dan matriks  $J$  disebut sebagai *manipulator Jacobian* dengan

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial z}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_3} & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Matriks *Jacobian*  $J$  di atas terdiri atas turunan *parsial* dari fungsi,  $x(1,2,3,4)$ ,  $y(1,2,3,4)$ ,  $z(1,2,3,4)$ , dan  $\alpha(1,2,3,4)$  berhubungan dengan perpindahan *joint* 1, 2, 3, 4. Matriks *Jacobian* ini menyatakan hubungan perubahan yang sangat kecil dari perpindahan *joint* terhadap perubahan posisi dan orientasi *end effector*. Dengan membagi Persamaan 2.14 terhadap perubahan waktu yang sangat kecil maka diperoleh :

$$\frac{dx}{dt} = J \frac{d\theta}{dt} \quad (2.16)$$

dengan demikian

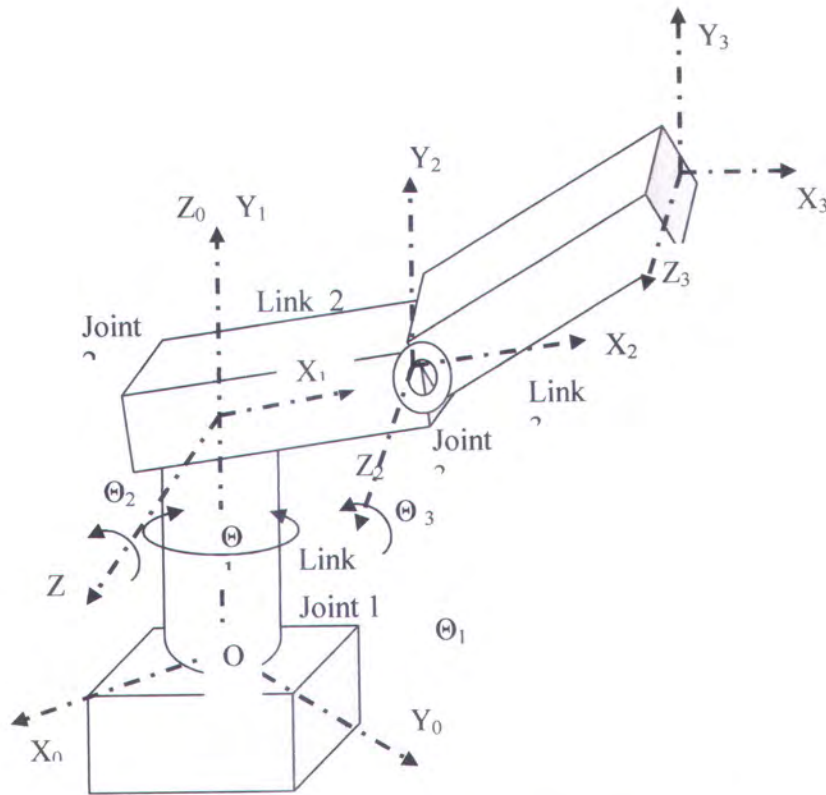
$$\dot{x} = J \dot{\theta} = J \varpi \quad (2.17)$$

dimana  $\dot{x}$  adalah kecepatan *end effector* dan  $\dot{\theta}$  adalah kecepatan sudut *joint*. Persamaan 2.17 di atas disebut sebagai persamaan kinematika *instantaneous*. Untuk mendapatkan kecepatan *joint* dari kecepatan *end effector* diperoleh dengan melakukan *inverse Jacobian*,

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{x} \quad (2.18)$$

#### 2.3.4 Forward Kinematic Solution (FKS)

Kinematika maju (*FKS*) berhubungan dengan persamaan untuk menentukan posisi dan orientasi ujung lengan dengan variabel sendi tertentu . Diasumsikan bahwa tiap sendi hanya memiliki satu derajat kebebasan , sehingga sebuah manipulator robot dengan  $n$  jumlah sendi, akan memiliki jumlah lengan  $n+1$ . Sendi ke- $i$  menghubungkan lengan  $i - 1$  dan  $i$ . Variabel sendi ke- $i$  dinyatakan sebagai  $q_i$  , yang menyatakan besar sudut untuk sendi rotasi atau pergeseran untuk sendi *prismatic*. Pada tiap sendi diasumsikan terdapat kerangka koordinat tetap.



Gambar 2.5 Kerangka pada Bagian Robot

Pada Gambar 2.5 tampak bahwa tiap titik pada lengan ke- $i$  tidak berubah koordinatnya terhadap kerangka ke- $i$ . Didefinisikan  $A_i$  adalah matrik homogeneus yang mentransformasikan koordinat sebuah titik yang ditinjau dari kerangka  $i$  ke kerangka  $i - 1$ . Dengan asumsi tiap sendi hanya memiliki satu variabel sendi  $A_i = A_i(q_i)$  seperti:

Matrik homogen yang mentransformasi koordinat dari kerangka  $j$  ke kerangka  $i$  dinamakan matrik Transformasi " $T_i^j$ " dimana berlaku :

$$T_i^j = A_{i+1} \cdot A_{i+2} \cdot \dots \cdot A_{i-1} \cdot A_j \quad \text{jika } i < j$$

$$T_i^i = I \quad \text{jika } i = j$$

$$T_i^j = (T_j^i)^{-1} \quad \text{jika } i > j$$



Untuk sendi sejumlah n maka matriks H menjadi

$$R = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

dimana  $H = T_0^n = A_i(q_i) \cdot A_n(q_n)$

Bentuk ini merupakan bentuk rantai kinematik yang memudahkan perhitungan .

### 2.3.5 Representasi *Danavit-Hartenberg*.

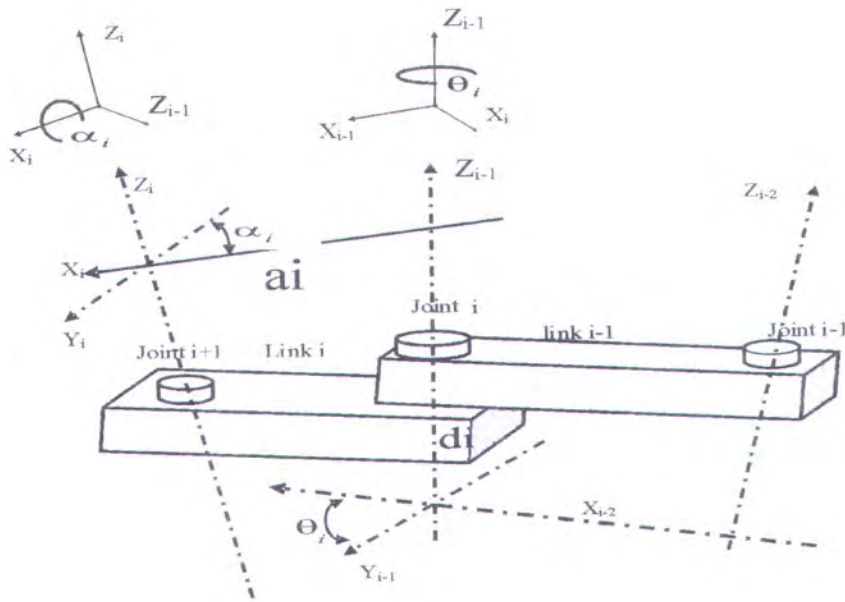
Sebuah konvensi yang dipakai dalam aplikasi *robotic* untuk pemilihan kerangka adalah konvensi *Denavit-Hartenberg* selanjutnya disingkat *D-H*. Dalam konvensi ini transformasi homogen  $A_i$  dinyatakan sebagai hasilkali empat transformasi dasar yaitu :

$$A_i = R_{Z,\theta_i} \cdot T_{Z,d_i} \cdot T_{X,a_i} \cdot R_{X,\alpha_i} \quad (2.20)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_i = \begin{pmatrix} c\theta & -s\theta.c\alpha & s\theta.s\alpha & a_i.c\theta \\ s\theta & c\theta.c\alpha & -c\theta.s\alpha & a_i.s\theta \\ 0 & s\alpha & c\alpha & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Tampak bahwa konvensi ini diwakili oleh empat lambang parameter dengan “a” diartikan *leng*, “ $\alpha$ ” diartikan *twist*, “d” diartikan *offset*, dan “ $\theta$ ” diartikan *angle*. Konvensi ini juga mengatur bahwa tiap matriks  $A_i$  hanya tergantung pada satu variabel, dengan demikian tiga variabel lainnya konstan. Untuk sendi *prismatic* hanya “d” sebagai *variable* sedangkan sendi *revolute* “ $\theta$ ” sebagai *variable*.



Gambar 2.6 Kerangka *D-H* Parameter

Konvensi lain dari matrik *D-H* Parameter adalah sebagai berikut : ( $DH_1$ ) sebagai sumbu  $X_i$  tegak lurus terhadap sumbu  $Z_i$ . Dan ( $DH_2$ ) sebagai sumbu  $X_{i-1}$  berpotongan dengan  $Z_{i-1}$ . Sudut " $\alpha$ " dan " $\theta$ " positif seperti aturan tangan kanan. Dan " $a$ " jarak antara sumbu  $Z_i$  dan  $Z_{i-1}$  sepanjang sumbu  $X$ . Kemudian " $d$ " adalah jarak antara titik  $O_{i-1}$  dengan perpotongan sumbu  $X_i$  pada sumbu  $Z_{i-1}$  diukur sepanjang sumbu  $Z_{i-1}$

Dengan demikian keseluruhan prosedur konvensi *D-H* Parameter sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi sendi dan menamakan sumbu sendi  $Z_0 \dots Z_{n-1}$ .
2. Menentukan kerangka dasar, dimana  $Z_0$  sudah ada, menyesuaikan sumbu  $X_0$  dan  $Y_0$  dengan kaidah tangan kanan.

Dalam *D-H* Parameter langkah- langkah maupun proses dalam menentukan titik-titiknya seperti yang tertuang pada Gambar 2.6, maka penulis tuangkan secara berurutan dengan tujuan untuk mempermudah dalam menelaah. Seperti pada halaman berikut.

Untuk  $i = 1$  sampai  $n-1$ , diulangi langkah-langkah berikut ini :

1. Menentukan lokasi titik asal  $O_i$  , jika  $Z_{i-1}$  berpotongan dengan  $Z_i$ , maka  $O_i$  pada titik potongnya. Jika  $Z_{i-1}$  paralel dengan  $Z_i$  maka letakkan  $O_i$  pada sendi  $i$ .
2. Menentukan  $X_i$  sedemikian sehingga merupakan garis normal dari bidang  $Z_i$  dan  $Z_{i-1}$  .Sumbu  $X_i$  tegak lurus  $Z_i$  maupun  $Z_{i-1}$ .
3. Menentukan  $Y_i$  dengan aturan tangan kanan.
4. Menentukan kerangka akhir  $O_n X_n Y_n Z_n$  . diasumsikan sendi ke- $n$  *revolute*, set  $k_n = a$  searah  $Z_i$ . Menentukan  $O_n$  pada pusat alat kerja, set  $j_n = s$  searah gerak jepit *gripper* dan  $i_n = n$  sebagai *vector*  $s \times a$ .
5. Menentukan tabel dari parameter lengan  $a_i$  ,  $d_i$ ,  $\alpha_i$  dan  $O_i$ , dimana  $a_i$  menyatakan jarak sepanjang  $X_i$  dari  $O_i$  ke perpotongan  $X_i$  dan  $Z_i$ . Untuk  $d_i$  menyatakan jarak sepanjang  $Z_{i-1}$  dari  $O_{i-1}$  ke perpotongan  $X_i$  dan  $Z_{i-1}$ , parameter  $d_i$  merupakan variabel jika sendinya prismatic. Selanjutnya  $\alpha_i$  menyatakan sudut antara  $Z_{i-1}$  dan  $Z_i$  diukur dari sumbu  $X_i$ . Sedangkan  $O_i$ , menyatakan sudut antara  $X_{i-1}$  dan  $X_i$  diukur dari sumbu  $Z_{i-1}$ , parameter  $O_i$ , merupakan variabel jika sendinya *revolute*.
6. Membentuk matriks transformasi *homogeneous*  $A_i$  dengan cara substitusi parameter di atas ke Persamaan (2.5)
7. Membentuk matriks  $T^n_0 = A_1 \dots A_n$ , yang memberikan posisi dan orientasi dari kerangka alat kerja terhadap kerangka dasar.

Dengan demikian lokasi titik asal, titik dan garis, titik dengan aturan tangan kanan, kerangka akhir, tabel, dapat ditentukan juga matriks-matriks dapat terbentuk dimana  $n$  menyatakan jumlah sendi manipulator pada suatu lengan robot.



### 2.3.6 Invers Posisi

*Invers* posisi dilakukan dengan pendekatan geometris *vector*  $p_c$  untuk setiap konfigurasi robot. Yaitu dengan mengambil tiga komponen pada kolom terakhir pada matriks transformasi *homogeneous* hasil akhir. Ketiga komponen ini mewakili posisi ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ) dari pusat pergelangan terhadap pusat kerangka dasar. Untuk jelasnya dapat dilihat pada persamaan 2.6 penurunan model matematik lengan robot.

### 2.3.7 Invers Orientasi

Dari *invers* posisi dihasilkan tiga variabel sendi pertama, sedangkan dari *invers* orientasi dihasilkan tiga variabel sendi terakhir. Dalam penyusunan tesis ini tidak memperhitungkan *invers* orientasi. Dengan demikian *trajectory* yang diatur diasumsikan posisi lintasan dari pusat pergelangan.

### 2.3.8 Sudut-sudut Euler

Dimisalkan  $U=(U_{ij}) \in \text{sin}\theta$  (3) dari matriks rotasi pergelangan,  $R_3^6$  adalah matrik dalam bentuk transformasi sudut *Euler* :

$$R_3^6 = \begin{pmatrix} c\phi.c\theta.c\psi - s\phi.s\psi & -c\phi.c\theta.s\psi - s\phi.c\psi & c\phi.s\theta \\ s\phi.c\theta.c\psi - c\phi.s\psi & -s\phi.c\theta.s\psi + c\theta.c\psi & s\phi.s\theta \\ -s\theta.s\psi & s\theta.c\psi & c\theta \end{pmatrix}$$

$$R_3^6 = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Misalkan  $U_{13}$ ,  $U_{23}$  tidak nol keduanya, maka  $\text{sin}\theta \neq 0$ , dengan demikian tidak mungkin

$U_{13}$  dan  $U_{23}$  sama dengan nol dan  $U_{33} \neq \pm 1$ , sehingga dari  $\text{cos}\theta = U_{33}$  diperoleh :

$$\sin\theta = \pm\sqrt{(1-U_{33})^2} \quad (2.23)$$

Sehingga diperoleh dua solusi seperti ditunjukkan dari Persamaan (2.24) dan (2.25) :

$$\theta = \tan^{-1} (U_{33} + \sqrt{(1-U_{33})^2}) \quad (2.24)$$

$$\theta = \tan^{-1} (U_{33} - \sqrt{(1-U_{33})^2}) \quad (2.25)$$

Dengan asumsi bahwa:  $\tan^{-1} (a,b) = \tan^{-1} b/a$ . Jika dipilih Persamaan (2.24) maka diperoleh  $\sin \theta > 0$  dan dari  $U_{13}$  dan  $U_{23}$  pada kolom ketiga diperoleh hubungan untuk mencari sudut  $\phi$ , serta dari  $U_{31}$  dan  $U_{32}$  diperoleh sudut  $\psi$  yang dinyatakan dalam Persamaan (2.26) dan (2.27) :

$$\Phi = \tan^{-1} (U_{13} , U_{23}) \quad (2.26)$$

$$\Psi = \tan^{-1} (U_{31} , U_{32}) \quad (2.27)$$

Sebaliknya jika dipilih Persamaan (2.25) maka  $\sin \theta < 0$  maka diperoleh hubungan untuk mencari sudut  $\phi$  dan sudut  $\psi$  diperoleh melalui Persamaan (2.28) dan (2.29):

$$\Phi = \tan^{-1} (-U_{13} , U_{23}) \quad (2.28)$$

$$\Psi = \tan^{-1} (U_{31} , U_{32}) \quad (2.29)$$

Sehingga untuk mendapatkan solusi sudut *Euler* tergantung pada pemilihan sudut  $\theta$ .

#### 2.4 Interpolasi Gerakan.

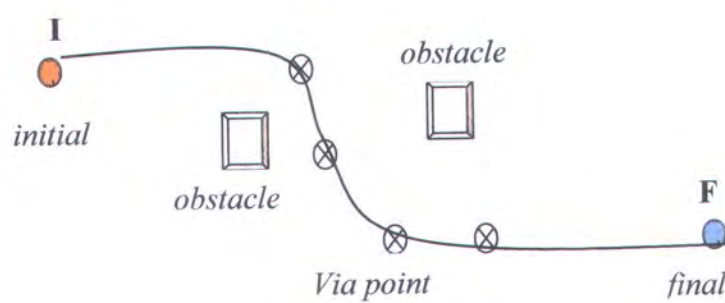
Jenis gerakan robot paling sederhana adalah gerak *Point to Point* (PTP). Tipe ini memerintahkan robot untuk bergerak dari konfigurasi *initial*  $T_0^n_{init}$  ke konfigurasi akhir  $T_0^n_{final}$  tanpa mengatur lintasan antaranya. Tipe ini cocok untuk tugas dimana ruang kerjanya bebas dari halangan (*obstacle*). Sistem pengaturan ini dinamakan *teach and playback mode*, robot diprogram dengan serangkaian gerakan oleh piranti pengajar.

Konfigurasi gerakan robot kemudian direkam dan dapat dieksekusi kembali, dengan gerakan sendi yang tidak terkoordinasi untuk mencapai target.

Teknik pengajaran lainnya adalah *lead rough teaching*, dimana dirancang sebuah manipulator yang terdiri dari beberapa *encoder*, dengan konfigurasi manipulator tertentu. Data yang diisikan dapat berupa variabel sendi, dan atau variabel posisi. Jika variabel sendi yang diisikan maka data tersebut hanya dapat dipakai oleh robot dengan konfigurasi yang sama dengan konfigurasi manipulator. Robot dengan sistem ini juga tidak memerlukan perhitungan kinematika. Gerakan yang diinginkan cukup disimpan dalam sudut sendi (biasanya dalam satu set nilai *encoder*). Apabila variabel yang dimasukkan data posisi linier, maka data ini dapat dipakai oleh berbagai jenis manipulator robot.

Pada sistem terprogram, dimana hanya diisikan posisi awal dan akhir serta orientasi ujung lengan, maka solusi *invers* kinematik harus dihitung.

Untuk tujuan gerakan *trajectory* dalam menghindari halangan, diperlukan titik-titik penghubung (*via point*) untuk menghindari rintangan seperti ditunjukkan pada Gambar (2.7).



Gambar.2.7 Rintangan dalam Lintasan Robot



Untuk manipulator yang difungsikan memindahkan benda dari suatu titik awal ke titik akhir memerlukan suatu sistem pengendalian. Dalam hal ini gerakan manipulator membutuhkan pengendalian kecepatan. Untuk pengendalian kecepatan dapat dilakukan dengan beberapa pengendalian variabel sendi mengikuti suatu lintasan tertentu seperti lintasan kubik, LSPB, dan juga dapat menggunakan metode waktu tempuh minimum.

#### 2.4.1 LSPB (*linier segment wi parabolic blends*).

Tipe gerakan ini untuk menghasilkan kecepatan sendi konstan sepanjang gerakan tertentu. LSPB memiliki kecepatan menaik sampai nilai tertentu dan kemudian turun sampai posisi akhir. LSPB dibagi menjadi tiga bagian, bagian pertama merupakan *polynomial* kwadratik antar  $t_0$  dan  $t_b$ . Setelah waktu  $t_b$  kecepatannya konstan. Pada bagian interval akhir antar  $t_f - t_b$  lintasan menjadi *polynomial* kwadratik perlambatan.

Dari grafik pada Gambar 2.7 dapat diasumsikan bahwa  $q_i(t_f) = q_i(t_0) = 0$ , sehingga antara waktu 0 dan  $t_b$  berlaku :

$$\dot{q}_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (2.30)$$

$$\ddot{q}_i(t) = a_1 + 2a_2 t \quad (2.31)$$

Dengan posisi joint awal  $q_0 = 0$  dan  $q(t) = 0$  maka diperoleh ;  $a_0 = q_0$  dan  $a_1 = 0$ . dan pada saat interval waktu  $t_b$  kecepatan menjadi konstan  $V$ , sehingga

$$\ddot{q}(t_b) = 2a_2 t_b = V \quad (2.32)$$

$$a_2 = \frac{V}{2.t_b} \quad (2.33)$$

Dengan demikian gerakan yang diperlukan antara 0 dan  $t_b$  adalah :

$$q_i(t) = q_0 + \frac{V}{2.t_b} t^2 = q_0 + \frac{a}{2} t^2$$

$$\dot{q}(t) = \frac{V}{t_b} t = at \quad (2.34)$$

$$\ddot{q} = \frac{V}{t_b} = a \quad (2.35)$$

Dimana  $a$  menyatakan akselerasi dan antara  $t_b$  dan  $t_f - t_b$  gerakannya linier, kecepatan konstan, sehingga :

$$\dot{q}_i(t) = a_0 + a_i.t = a_0 + V_i \quad (2.36)$$

$$\dot{q}_i\left(\frac{t_f}{2}\right) = (q_0 + q_i)/2 = a_0 + V \frac{t_f}{2}$$

$$a_0 = \frac{q_0 + q_i - V.t_f}{2} \quad (2.37)$$

Dan karena kedua bagian harus berkesinambungan pada saat  $t_b$  maka :

$$q_0 = V.t_b/2 = (q_0 + q_i - V.t_f)/2 + V.t_b$$

$$t_b = (q_0 + q_i - V.t_f)/V \quad (2.38)$$

kendala yang ada adalah  $0 < t_b < t_f/2$  atau :

$$\frac{q_f - q_0}{V} \leq t_f \leq 2 \frac{q_f - q_0}{V} \quad (2.39)$$

Dari persamaan tersebut dapat dituliskan untuk variabel sendi yaitu :

$$\frac{q_f - q_0}{t_f} \leq V \leq 2 \frac{q_f - q_0}{t_f} \quad (2.40)$$

Karena grafik LSPB menunjukkan kondisi simetris antara interval  $t_c$  dan  $t_f - t_c$  pada bagian awal dan bagian akhir sehingga diperoleh :

$$\dot{q}_i(t) = q_f - \frac{at_f^2}{2} + at_f t + \frac{a}{2} t^2 \quad (2.41)$$

#### 2.4.2 Gerakan Waktu Minimum

Tipe gerakan ini meminimumkan waktu akhir  $t_f$ , mempercepat gerakan antara  $q_0$ , dan  $q_i$  dengan akselerasi  $a$ . gerakan ini memaksimalkan nilai  $+a$  hingga mendekati waktu peralihan  $t_c$  dan meminimumkan  $-a$  sampai mendekati waktu  $t_f$ . Apabila diasumsikan bahwa pada saat initial dan final kecepatannya adalah nol, waktu peralihan  $t_m = t_f/2$ , maka dapat ditulis persamaan gerak :

$$V_s = a \cdot t_m \quad (2.42)$$

Besar gerakan  $q$  dapat dicari dari hubungan  $v$  dan  $t$  yang dinyatakan dalam;

$$q_i - q_0 = v_s (t_f - t_m) \quad (2.43)$$

dari persamaan ini maka dapat dihitung waktu minimum :

$$t_m = \frac{q_0 - q_i + v_s t_f}{v_s} \quad (2.44)$$

#### 2.4.3 Perencanaan Gerakan

Perencanaan gerakan *B-Spline* ditransformasi dari problema kontrol optimal ke problema optimisasi parameter. Problema tersebut diselesaikan dengan metode optimisasi berbasis-gradien di mana gradien ditentukan secara analitik. Salah satu metode untuk estimasi sifat-sifat fisik manipulator robot adalah dengan identifikasi massa secara eksperimental. Identifikasi dilaksanakan secara *off-line* dengan jalan mengumpulkan data yang diperlukan untuk estimasi sifat-sifat massa.



## BAB III

### PERANCANGAN GERAKAN ROBOT LENGAN

Suatu gerakan robot lengan berbasis *B-Spline* dilakukan dengan memakai komputer. Jenis robot lengan yang disimulasikan adalah bentuk konfigurasi *revolute* dengan empat derajat kebebasan (*4DoF*). Perancangan dimulai dengan melakukan identifikasi lalu merencanakan model matematik sistem. Pemodelan ini dilakukan untuk mendapatkan parameter dan variabel masing-masing *joint* dan *link* dari robot lengan, sehingga selanjutnya dapat dilakukan perancangan gerakan suatu robot lengan yang digunakan untuk melayani pengisian BBM.

#### 3.1 Studi Pustaka dan Survei Lapangan

Sebagai tahap awal suatu penelitian, sangat penting untuk mencari dan mengumpulkan sebanyak mungkin informasi serta literatur yang menunjang langkah penelitian tersebut untuk mengidentifikasi. Materi yang terkumpul selanjutnya ditelaah kembali untuk mendapatkan kajian yang sesuai dalam perancangan dan pengendalian robot. Melalui sejumlah journal dan referensi secara teori, maka studi pustaka ini dilaksanakan untuk:

- a. Mempelajari model *plant* dan permasalahannya agar dapat diperoleh bentuk pemodelan matematiknya.
- b. Mempelajari sistem gerakan berbasis *B-Spline*, terutama sistem yang hampir sama yang telah diteliti oleh peneliti terdahulu untuk peneliti kembangkan.
- c. Mempelajari simulasi dalam penerapannya ke program komputer.

Sedangkan kajian atau survai lapangan diharapkan mampu mempelajari situasi riil dilapangan terutama untuk konstruksi robot yang akan dirancang gerakannya.

### **3.2 Perencanaan Sistem Gerakan**

Pada penelitian ini, konfigurasi sistem gerakan yang direncanakan untuk memberikan signal masukan (*input*) yang berupa signal gerakan untuk *set point*. Hal tersebut merepresentasikan tindakan yang harus diambil oleh *set point* ketika harga variabel gerakan mengalami penyimpangan. Dimana mekanisme pengendalian gerakannya dirancang menggunakan metode *B-Spline*.

Identifikasi dan formulasi parameter berfungsi untuk memformulasikan persamaan sedangkan untuk *plant* agar memiliki respon sesuai dengan yang dikehendaki. Karena pada tugas penelitian ini merupakan perencanaan dan simulasi yang dijalankan secara *on-line*, maka peran akan digantikan oleh komputer melalui bahasa pemrograman.

#### **3.2.1 Perencanaan Software**

Perencanaan *software* yang berbasis bahasa pemrograman komputer, meliputi perencanaan *software* untuk gerakan, estimator dan simulasi proses. Dengan menggunakan *Matlab 7* hasil identifikasi adalah merupakan data masukan untuk di simulasikan.

#### **3.2.2 Perencanaan Ruang gerak Join**

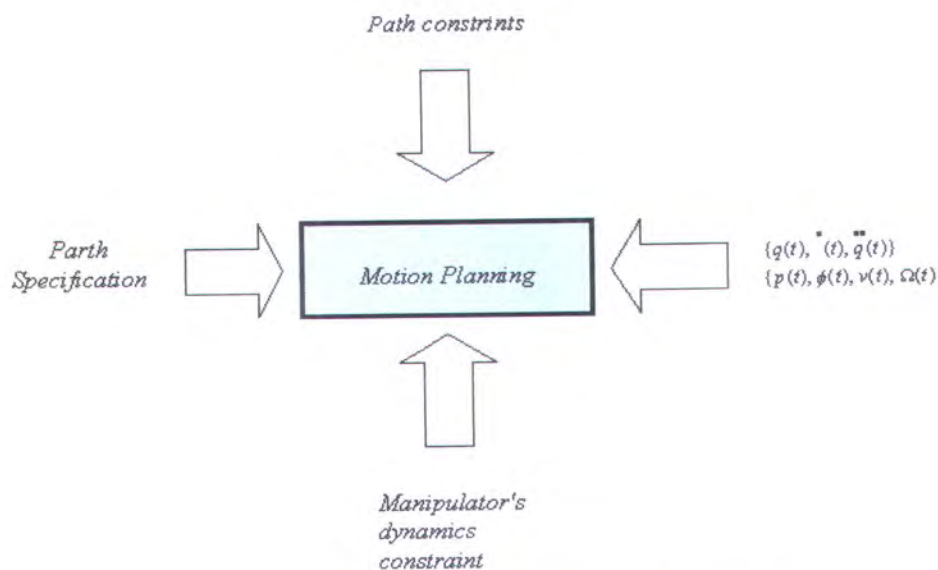
Untuk perencanaan data ruang join semua *variable joint* sebagai fungsi waktu dan dua turunan pertamanya direncanakan untuk menggambarkan gerakan manipulator sesuai dengan yang diinginkan.



### 3.3 Unsur-unsur Perencanaan Gerakan

Simulasi gerakan robot lengan dilakukan dengan memakai komputer. Jenis robot lengan yang disimulasikan adalah bentuk konfigurasi *revolute* dengan empat derajat kebebasan (*4 DoF*). Perencanaan dimulai dengan melakukan model matematik sistem. Pemodelan ini dilakukan untuk mendapatkan parameter dan variabel masing-masing *joint* dan *link* dari robot lengan yang didisain.

Syarat minimal untuk sebuah manipulator adalah memiliki kemampuan untuk berubah dari suatu konfigurasi awal ( $q_i$ ) kesuatu konfigurasi final ( $q_f$ ). Performasi perubahan konfigurasi yang terjadi diharapkan sesuai dengan disain penelitian dengan cara menerapkan algoritma pengendalian yang tepat. Pengendalian dalam manipulator robot dapat dibagi menjadi dua masalah utama yaitu : perencanaan gerakan atau lintasan (*motion or trajectory*) dan pengendalian gerakan (*motion control*). Pada penelitian ini memfokuskan pada perencanaan gerakan untuk gerakan bebas tanpa rintangan (*obstacle*).

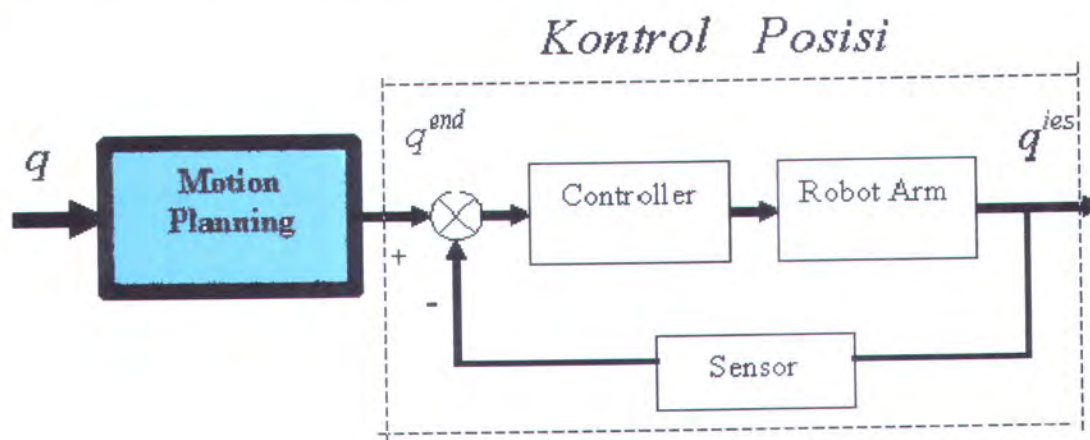


Gambar 3.1 Diagram Unsur *Motion Planner*[7]



Secara prinsip, dapat dimengerti bahwa *variable input* untuk suatu algoritma perencanaan gerakan berupa gambaran gerakan dari titik-titik koordinat secara berurutan dalam ruang join (*part discription*), batasan lintasan (*path constraints*), dan batasan dinamika manipulator (*manipulator dynamics constraints*). Sedangkan outputnya merupakan gerakan *end-effector* dalam bentuk sebuah fungsi dalam domain waktu. Dari turunan fungsi dapat diperoleh posisi, kecepatan dan percepatan. Kontribusi dari beberapa unsur tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 3.2.[7]

Apabila digambarkan secara *schematic* blok diagram hubungan antara *motion planning* terhadap kontrol posisi manipulator adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Blok diagram *Motion Planner*[2]

Pendekatan dengan *motion planning* dengan menentukan sebuah himpunan koordinat titik yang disebut "*knot point*" sepanjang lintasan dari *end-effektor*. Kemudian dipilih gerakan yang dijadikan parameter dari suatu fungsi *polynomial* yang menginterpolasi *knot points*. Dari titik-titik ini manipulator membentuk suatu sistem gerakan secara terkoordinasi antara join yang satu dengan join lainnya.[6]

### 3.4 Kurva Gerakan *B-Spline*

Kurva *B-Spline* adalah suatu kurva polinomial potong demi potong (*piecewise*) yang ditentukan oleh serangkaian titik-titik kontrol di mana umumnya kurva tidak berinterpolasi. Fungsi basis *B-Spline*, yang tidak nol pada satu daerah, tetapi nol pada daerah lain, adalah untuk membentuk kurva *B-Spline* dengan jalan menjumlah perkalian masing-masing basis dengan titik kontrol yang berasosiasi dengan basis tersebut. Tingkat polinomialnya ditentukan secara independen oleh jumlah titik kontrol.

Pengendalian secara lokal terhadap bentuk kurva dapat dilakukan karena perubahan lokasi titik kontrol tidak menyebarkan perubahan bentuk secara global, dan pengaruh titik-titik kontrol hanya terbatas pada beberapa segmen kurva yang dekat.

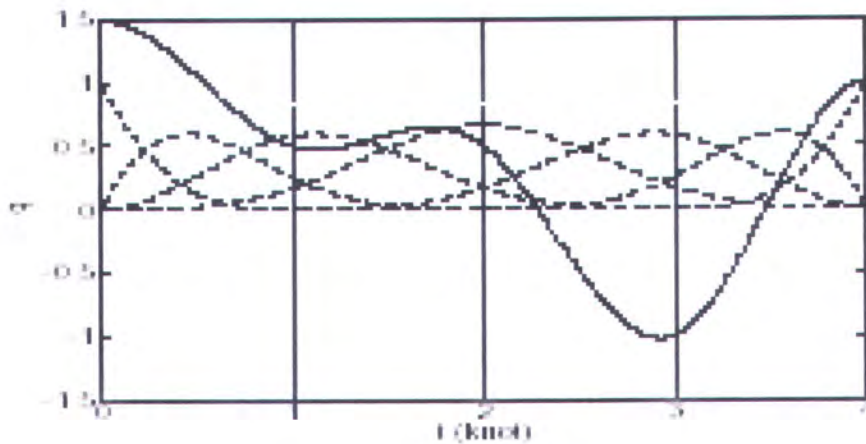
Sifat *B-Spline* yang sangat penting mereka adalah tidak berubah pada *affine transformation* (translasi, rotasi, skala atau geser). Sifat-sifat ini menyebabkan kurva *B-Spline* cocok untuk simulasi pendekatan.

### 3.5 Konstruksi *B-Spline*

Kurva dari sesuatu versus waktu dapat didekati dengan satu set potongan-potongan polinomial *B-Splines* pada jarak antar titik dengan urutan waktu yang teratur (*ordered time sequence*).

Suatu sifat istimewa dari kurva *B-Spline* adalah pengendalian secara lokal, artinya perubahan posisi satu titik data hanya menyebabkan sebagian kurva saja yang berubah dan tidak mempengaruhi terhadap titik yang lainnya. Untuk lebih memperjelas dalam uraian dalam tulisan ini diperlihatkan pada Gambar 3.3 sebagai contoh tampilan kurva *cubic B-Spline*.

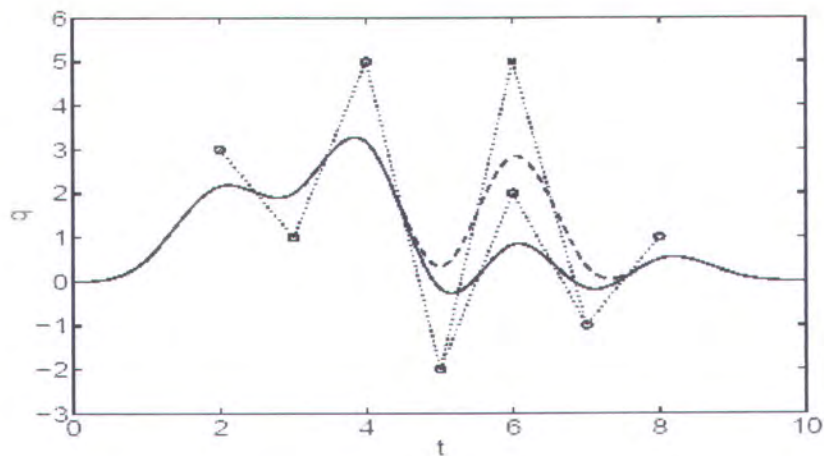




Gambar 3.3 Kurva *cubic B-Spline*

Sebagai perbandingan pada Gambar 3.2 ditampilkan pula kurva pengendalian gerakan *B-Spline* secara lokal, di mana suatu kurva *cubic B-Spline* digambar dengan garis menerus (*solid line*) dengan titik-titik kontrol (bersimbol lingkaran),  $\{3, 1, 5, -2, p^* = 2, -1, 1\}$  pada ruang batas  $\{0, 1, 2, \dots, 10\}$ .

Dengan memindahkan titik kontrol  $p^*$  dari "2" ke "5", kurva berubah menjadi garis putus-putus yang bentuknya hanya berubah secara lokal pada daerah tertentu. [5]



Gambar 3.4 Kurva Pengendalian *B-Spline* Secara Lokal



Misalkan ruang simpul (*knot space*) adalah  $\{t_0 \leq \dots \leq t_{k-1} \leq t_k \leq \dots \leq t_m \leq t_{m+1} \leq \dots \leq t_{m+k}\}$ , kurva *B-Spline*-nya  $q \in \mathcal{H}$ , dituliskan sebagai

$$q(t, P) = \sum_{j=0}^m p_j B_{j,k}(t) \quad (3.1)$$

di mana  $P = \{p_0, \dots, p_m\}$ , dengan  $p_j \in \mathcal{H}$  merupakan titik-titik kontrol, dan  $B_{j,k}$  adalah fungsi basis *B-Spline*. Indek  $k$  menyatakan orde polinomial basis, misalnya  $k = 4$  untuk *cubic*, atau  $k = 6$  untuk *quintic*. (Jika  $B_{j,k}$  tidak mempunyai simpul-simpul berulang (*repeated knots*), dia adalah  $C^{k-2}$  kontinyu, yaitu kontinyu pada derivatif orde 2 dari  $k$ ). Persamaan (3.1) adalah kasus khusus dari kurva-kurva *Non-Uniform Rational B-Spline* (*NURBS*), yang didefinisikan dengan

$$q(t, p) = \frac{\sum_{j=0}^m h_j p_j B_{j,k}(t)}{\sum_{j=0}^m h_j B_{j,k}(t)} \quad (3.2)$$

di mana  $h_j$  adalah berat. Jika  $h_j = 1$  untuk semua harga  $j$ , maka karena  $\sum_{j=0}^m B_{j,k}(t) = 1$  (sifat *convex hull* dari *B-Spline*), Persamaan (3.1) direduksi menjadi bentuk *nonrational B-Spline* pada Persamaan (3.2)

### 3.6 Basis Fungsi *B-Spline*

Dari beberapa nilai  $t_i \leq \dots \leq t_{i+1}$  the  $l^{\text{th}}$  ] maka dihasilkan persamaan

$$[t_i(l) : x] f(x) = f(t_i) \quad (3.3)$$

Untuk  $e = 0$  dan untuk  $e \geq 1$  dengan

$$[t_i(l) : x] f(x) = \begin{cases} \frac{[t_{i+1}(l-1) : x] f(x) - [t_i(l-1) : x] f(x)}{t_{i+1} - t_i} & \text{if } t_{i+1} \neq t_i \\ \frac{1}{l!} \frac{d^l}{dx^l} f(x) |_{x=t_i} & \text{if } t_{i+1} = t_i \end{cases} \quad (3.4)$$

Dengan menentukan sebuah operator *plus* ,  $(\bullet)^+$  , seperti berikut ini.

$$(\bullet)^+ = \begin{cases} (\bullet) & \text{if } (\bullet) \geq 0 \\ 0 & \text{if } (\bullet) < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Fungsi dasar *B-Spline* didefinisikan sebagai berikut:

Diberikan titik-titik  $t_0, \dots, t_m, \dots, t_{m+k}$  dan diasumsikan bahwa  $j \leq m$ , *B-Spline* dari  $k$  dihubungkan dengan titik-titik  $t_j, \dots, t_{j+k}$ . Diberikan dengan:

$$B_{j,k}(t) = (-1)^k (t_{j+k} - t_j) [t_j : x] (t - x)_+^{k-1} \quad (3.6)$$

Maka perlu diperhatikan bahwa  $B_{j,k}(t)$  adalah kosong jika  $t_j = t_{j+k}$ .

### 3.7 Algoritma *Recursion B-Spline*

*B-Spline* dalam algoritmaya adalah memperlihatkan suatu gambaran fungsional perulangan yang menghasilkan sebuah *B-Spline* kuadratik. Fungsi kurva berbentuk topi (*hat function*)  $B_{i,2}(t)$  dihasilkan dari menjumlahkan sebuah faktor linier kali fungsi tangga (*step function*)  $B_{i,1}(t)$ , dan sebuah faktor linear kali fungsi tangga  $B_{i+1,1}(t)$ . Fungsi topi  $B_{i+1,2}(t)$  dihasilkan dengan cara yang serupa dari faktor-faktor linear fungsi-fungsi tangga  $B_{i+1,1}(t)$  dan  $B_{i+2,1}(t)$ . Akhirnya, fungsi kurva berbentuk bukit kuadratik (*quadratic hump function*)  $B_{i,3}(t)$  dihasilkan dari menjumlahkan sebuah faktor linear kali  $B_{i,2}(t)$  dan sebuah faktor linear kali  $B_{i+1,2}(t)$ .

Fungsi dasar juga dapat diperoleh dengan cara penyulangan, dimana penyulangan untuk *Recursion B-Spline* adalah:

$$B_{j,k}(t) = \frac{t - t_j}{t_{j+k-1} - t_j} B_{j,k-1}(t) + \frac{t_{j+k} - t}{t_{j+k} - t_{j+1}} B_{j+1,k-1}(t) \quad (3.7)$$

Dimulai dengan

$$B_{j,l}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_j \leq t < t_{j+1} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.8)$$

### 3.8 Identifikasi *Plant*

Sebagai bahan pertimbangan didalam perancangan gerakan robot lengan pengisian BBM, identifikasi lapangan diperlukan sebagai pertimbangan didalam perhitungan. Robot lengan yang dipekerjakan sebagai pengganti seseorang yang bekerja pada pelayanan pengisian BBM, selain itu ada suatu ketentuan yang lebih spesifik dibanding dengan robot lengan secara umum.

Kekususan didalam robot lengan pengisian BBM maka yang diutamakan adalah masalah keselamatan yang terkait dengan daerah kerja, robot lengan yang dipkerjakan pada lingkungan yang banyak Gas maka semua peralatan listrik harus *Explosion Proof* (mampu menahan ledakan) atau ditempatkan pada panel *Explosion Proof*. Untuk barang maupun alat yang bergerak harus dari bahan yang tidak mudah menimbulkan api dan tidak mudah terbakar, serta tidak diperkenakan mengoperasikan peralatan yang menggunakan sikat arang.

#### 3.8.1 Konstruksi Robot Lengan

Bahan robot lengan: pipa aluninium

Lengan 1 : 2m

Lengan 2 : 1,33m

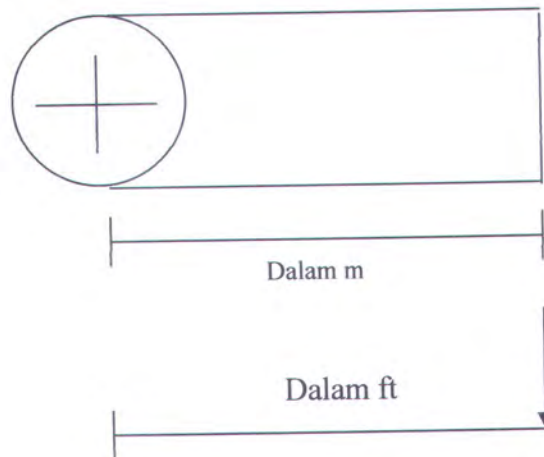
Lengan 3 : 1,33m

Lengan 4 : 0,7m

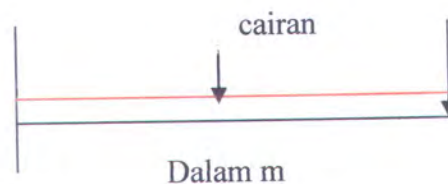


Untuk ntuk melengkapi data-data identifikasi dalam penulisan tesis ini maka juga penulis tuangkan perhitungan secara keseluruhan dari hasil identifikasi.

### 3.8.2 Perhitungan Pipa dan Motor Pada Tiap-tiap *Link*



Gambar 3.5 Diameter Dan Panjang Pipa Lengan



Gambar 3.6 Berat Cairan dan Berat Selang

*Load Overhange* pada *link* 4:

$$LO4 = \text{berat cairan} + \text{berat slang}$$

$$\text{Berat Cairan} = \pi / 4 D^2 L \gamma$$

$$= 0,785 ( 7,5 \text{ Cm})^2 \times 70 \text{ Cm} \times 0,00084 \text{ kg/cm}^2 = 2,596 \text{ kg}$$

Berat selang 2 kg/m, maka berat selang dengan ukuran diatas menjadi:

$$2 \times 0,7 \text{ m} = 1,4 \text{ kg}$$

$$\text{Berat total ( cairan + selang )} = 4 \text{ kg}$$

$$\text{LO4} = 1,399 \text{ kg m} \times 2,2 \text{ lb/kg} \times 3,2808 \text{ ft/m} = 10 \text{ lb ft.}$$

Daya motor berdasarkan *Load Overchange*:

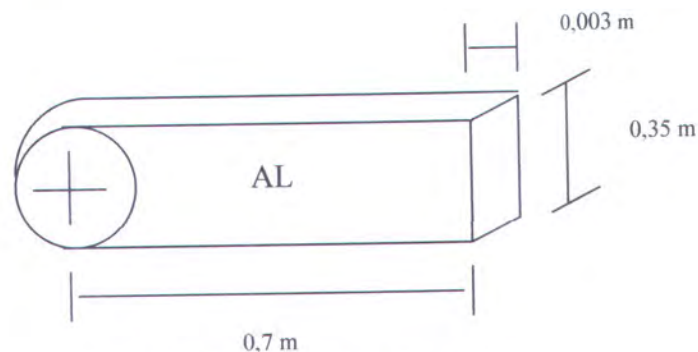
$$\text{Daya Motor} = \text{Lo} \times \omega$$

$$= 1,399 \text{ kg m} \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 0,22 \text{ kg m/dt ( HP)} = 164 \text{ Watt}$$

$$= 90^\circ / 10 \text{ dt} = 0,05 \times \pi / \text{det} \text{ ( 1 Putaran )}$$

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ Watt}$$

Bila beban diperhitungkan :



Gambar 3.7 Potongan Lengan 4

$$\text{Berat} = ( 0,7 \times 0,35 \times 0,03 ) \times 2669 \text{ Kg/m}^3 = 19,617 \text{ kg.}$$

$$\text{Momen total} = 10,366 \text{ kg}$$

$$\text{Nm} = 10,336 \text{ kg m} \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 1,6 \text{ HP} = 1214,7 \text{ Watt}$$

*Load Overhange* pada link 3:

$$\text{Load overhange L3} = \text{Berat cairan} + \text{Berat selang} + \text{Berat link 4} + \text{berat motor 4}$$

$$\begin{aligned} \text{LO3} &= (0,785 (7,5)^2 \times 133) \times 0,00084 \text{ kg} + (2 \times 1,33 \text{ kg}) + 19,617 + 5,5 \text{ kg} \\ &= 32,71 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Beban dianggap merata maka =

$$\text{LO3} = 32,71 \text{ kg} \times 1,015 \text{ m} = 33,20 \text{ kg m (berat tanpa bebannya sendiri)}$$

$$\text{Daya M3} = \text{LO3} \times \omega^3$$

$$= 33,20 \text{ kg m} \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 5,2 \text{ HP} = 3890,498 \text{ Watt}$$

$$\text{Berat L3} = 19,617 \text{ kg} / 0,7 \text{ m} \times 1,33 = 37,272 \text{ kg}$$

$$\text{Berat total} = 32,71 + 37,272 = 70 \text{ kg}$$

$$\text{LO3} = 70 \text{ kg} \times 1,015 \text{ m} = 71,032 \text{ kg m}$$

$$\text{Daya total motor 3} = 71,032 \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 11,157 \text{ HP} = 8323,634 \text{ Watt.}$$

*Load Overhange* pada *link 2*

$$\text{Berat overhange L2} = \text{Berat cairan} + \text{berat selang} + \text{berat L3} + \text{berat motor 3}$$

$$\text{LO3} = (0,785 (7,5)^2 \times 1,33) \times 0,00084 + 2,133 + 37,272 \text{ kg} + 11 \text{ kg} = 55,865 \text{ kg}$$

$$\text{LO2} = 55,865 \text{ kg} \times 1,68 = 93,85 \text{ kg m (Tanpa bebannya sendiri)}$$

$$\text{Daya motor 2} = \text{LO2} \times \omega^2$$

$$= 93,865 \text{ kg m} \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 14,742 \text{ HP} = 10997,844 \text{ Watt}$$

$$\text{Berat Link 2} = 19,617 / 0,7 \times 1,33 = 37,272 \text{ kg}$$

$$\text{Berat total} = 55,865 + 37,272$$

$$= 93,137 \text{ kg}$$

$$\text{LO2} = 93,137 \text{ kg} \times 1,68 \text{ m} = 156,470 \text{ kg m.}$$

$$\text{Daya total motor 2} = 156,47 \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 24,578 \text{ HP} = 18335,393 \text{ Watt}$$



*Load Overhange* pada base frame (link 1)

Berat *overhange* L1 = Berat cairan + berat selang + berat L2 + berat motar 2

$$LO1 = [ 0,785 \times ( 7,5 )^2 \times 3,20 ] \times 0,00084 + ( 2 \times 3,2 ) + 93,137 \text{ kg} + 22 \text{ kg} = 133,406 \text{ kg}$$

$$LO1 = 133,406 \times 1,68 = 224,122 \text{ kg m ( tanpa bebannya sendiri )}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya total motor 1} &= LO1 \times \omega_1 = 224,122 \text{ kg m} \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 35,2 \text{ HP} \\ &= 26262,94 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\text{Berat Link 1} = 19,617 \text{ kg} / 0,7 \text{ m} = 89,677 \text{ kg}$$

$$\text{Berat total} = 133,406 + 89,677 = 233,084 \text{ kg}$$

$$LO1 = 233,084 \times 1,68 = 374,781 \text{ kg m}$$

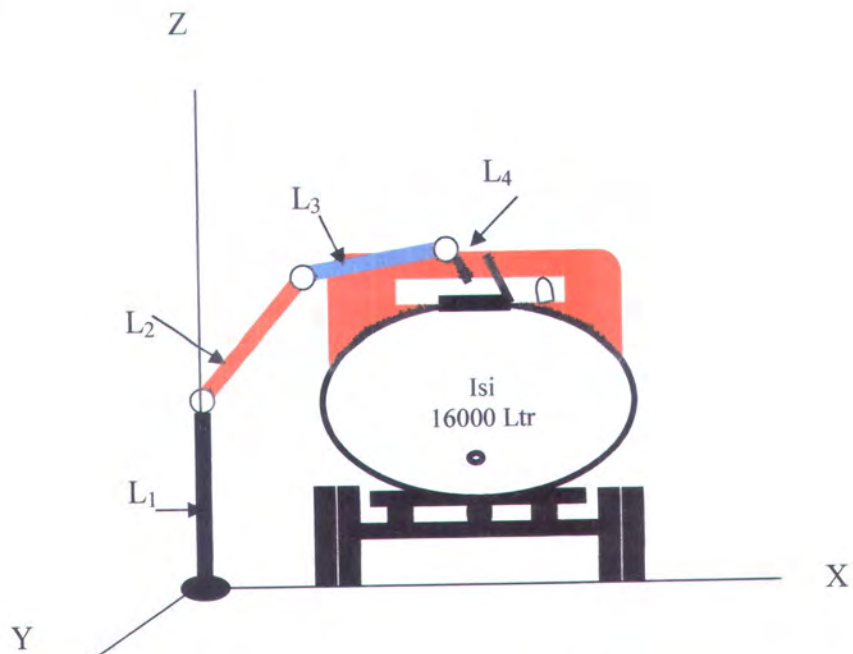
$$\text{Daya total motor} = 374,781 \times 0,05 \times \pi / \text{det} = 58,87 \text{ HP} = 43917,322 \text{ Watt.}$$

Dalam perhitungan identifikasi tersebut diatas penulis batasi untuk melayani dari salah satu cairan yang dihasilkan oleh Kilang Minyak Cepu, dalam hal ini penulis perhitungkan untuk melayani cairan Premium. Dari hasil identifikasi berat jenis *produc* dan minyak mentah adalah sebagai berikut:

Premium	= 0,73 – 0,79
Kerosine	= 0,81 – 0,83
Solar	= 0,82 – 0,86
PH. Solar	= 0,87 – 0,89 (PH Solar = Wax)
Residu	= 0,90 – 0,91
Minyak mentah	= 0,86 – 0,88

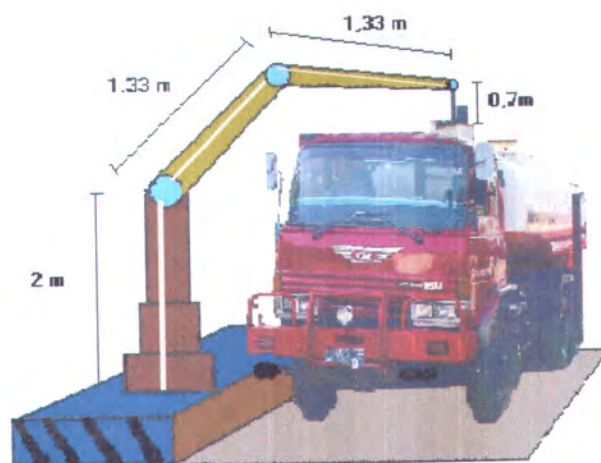
Dengan ragam berat jenis cairan minyak maka cukup variatip dalam perhitungan perancangan lengan robot pengisian BBM.

### 3.8.3 Kerangka Koordinat



Gambar 3.8 Pengisian Dengan Asumsi Lubang Tepat Pada Sumbu Y

### 3.8.4 Rencana Aplikasi Robot Lengan



Gambar 3.9 Rencana Aplikasi Robot Lengan

## BAB IV

### ANALISA DATA MOTION PLANNING

Untuk mendapatkan data posisi ujung lengan (*end-effector*) dan sudut sendi (*joint-angle*) yang presisi, maka sebagai bahan analisa perlu ditetapkannya sejumlah titik data koordinat target, yang membentuk suatu jalur lintasan (*path-planning*) bentuk tertentu, ke dalam program simulasi *motion planing robot*.

Selanjutnya data *output* dari hasil simulasi untuk mendapatkan posisi *joint* dan posisi *end-effector*. Data posisi ujung lengan aktual hasil simulasi, kemudian dibandingkan dengan data posisi ujung lengan target. Dari perbandingan kedua data tersebut, maka dapat dihitung nilai penyimpangannya (*error absolut*) dan juga bisa digambarkan bentuk jalur (*path*) gerakan dan grafik posisi ujung lengan manipulator robot 4DoF.

Untuk mengurangi torsi motor, perbandingan roda gigi dan interaksi roda gigi antara motor dan sambungan harus diperhitungkan dalam formulasi problema.

Hubungan linear antara pergeseran (*displacements*) motor dan pergeseran sendi dinyatakan sebagai matriks  $B$  -  $6 \times 6$  sedemikian rupa sehingga  $\dot{q} = \dot{q}_m$ , di mana  $\dot{q}$  adalah kecepatan poros motor.

Dari hasil tersebut, kami dapat mendeskripsikan torsi motor  $\tau_m$  dalam *term* torsi sambungan  $\tau$  sebagai berikut:

$$\tau^T \dot{q} = \tau_m^T \dot{q}_m \Rightarrow \tau_m = B^T \tau \quad (4.1)$$



#### 4.1. Koordinat Ujung Lengan Robot.

Koordinat posisi ujung lengan ( $X, Y, Z$ ) yang akan dilalui oleh ujung robot lengan ini diperlukan untuk menentukan vektor jarak dari koordinat posisi ujung lengan ke *base frame*. Jarak vektor posisi ujung lengan terhadap pusat koordinat (*base frame*) dapat dihitung dengan persamaan :

$$dn = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (4.2)$$

Sedangkan untuk menghitung nilai penyimpangan (*error absolut*) posisi ujung lengan adalah aktual ( $X_a, Y_a, Z_a$ ) dan posisi target ( $X_t, Y_t, Z_t$ ) adalah dengan persamaan:

$$Error = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + (Y_a - Y_t)^2 + (Z_a - Z_t)^2} \quad (4.3)$$

#### 4.2. Penetapan Titik-titik Gerakan.

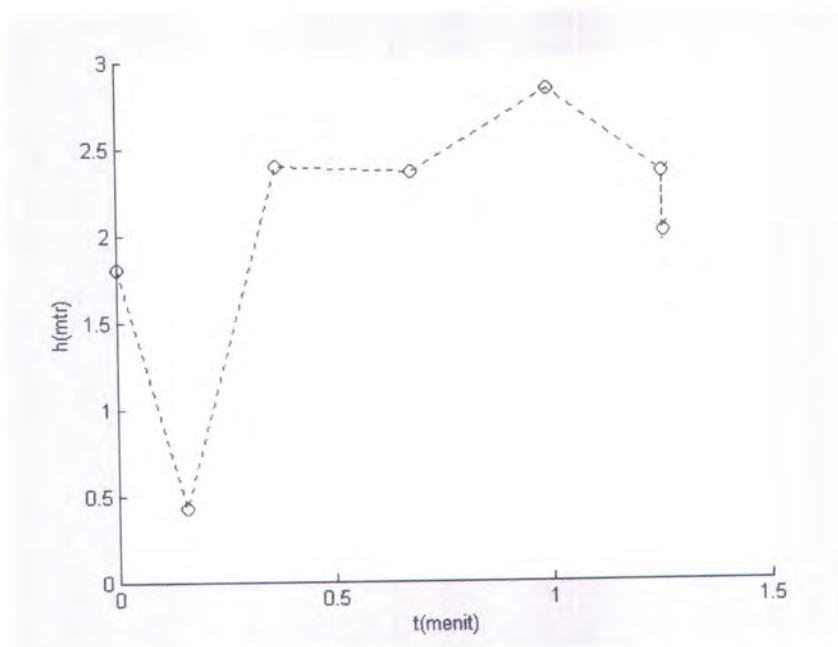
Dengan menetapkan titik-titik kontrol gerakan yang harus dilalui pada jarak antar titik dengan urutan waktu yang teratur (*ordered time sequence*). Sehingga diharapkan ujung robot lengan dapat bergerak sesuai dengan rencana untuk menuju suatu titik target, sehingga dalam kurun waktu yang direncanakan dengan jarak waktu yang berurutan ujung lengan robot yang bergerak pada koordinat maka dapat menghasilkan analisa perbandingan suatu gerakan. Sebelum dituangkan dalam bentuk kurva, perencanaan gerakan kami tuangkan dalam bentuk Tabel. Yaitu pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Perencanaan gerakan ujung robot lengan

$\theta$	Posisi Awal dalam derajat	Gerakan Referensi 1 dalam derajat	Gerakan Referensi 2 dalam derajat	Gerakan Referensi 3 dalam derajat	Gerakan Referensi 4 dalam derajat	Posisi Akhir dalam derajat
$\theta_1$	-30	-30	-30	-30	-30	-30
$\theta_2$	90	90	30	60	30	20
$\theta_3$	-60	50	-20	10	20	2
$\theta_4$	-150	-90	-90	-90	-90	-90

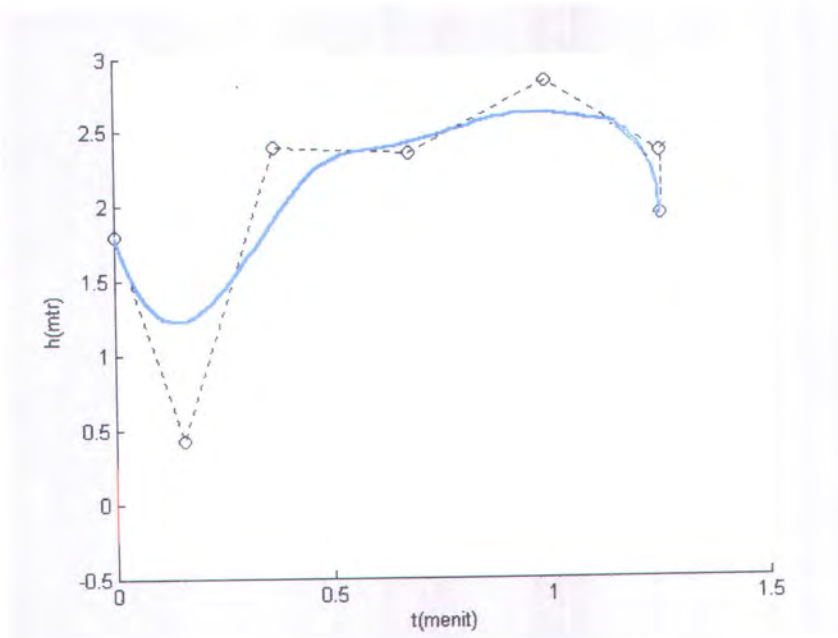
Pada Gambar 4.1 yaitu sederetan titik-titik yang merupakan kurva perencanaan gerakan *end-effector* pada koordinat Z dan X sebelum penjumlahan, Gambar 4.2 memperlihatkan gambar fungsional perulangan yang menghasilkan sebuah *B-spline* kuadratik. Fungsi kurva berbentuk (*hat function*)  $B_{i,2}(t)$  dihasilkan dari menjumlahkan sebuah faktor linear kali fungsi tangga (*step function*)  $B_{i,1}(t)$ , dan sebuah faktor linear kali fungsi tangga  $B_{i+1,1}(t)$ . Fungsi topi  $B_{i+1,2}(t)$  dihasilkan dengan cara yang serupa dari faktor-faktor linear fungsi-fungsi tangga  $B_{i+1,1}(t)$  dan  $B_{i+2,1}(t)$ . Akhirnya, fungsi kurva berbentuk bukit kuadratik (*quadratic hump function*)  $B_{i,3}(t)$  dihasilkan dari menjumlahkan sebuah faktor linear kali  $B_{i,2}(t)$  dan sebuah faktor linear kali  $B_{i+1,2}(t)$ .

Pada Plot 1 sampai dengan 6 memperlihatkan gambar gerakan ujung robot lengan yang menghasilkan sebuah *B-spline* kuadratik ordinat Z dan X, dengan referensi sudut sudutnya ditunjukkan pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Perencanaan Titik-titik Gerakan *End Efektor*

Dari penentuan titik-titik tersebut, untuk sifat gerakan *B-Spline* tidak tepat mengikuti garis lurus, tetapi *Spline*. Seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kurva Gerakan *B-Spline End Efektor* Hasil Perencanaan

## 4.2 Plot Tiga Dimensi Perencanaan Gerakan

Dari titik-titik gerakan yang telah ditentukan, maka bila dilihat pada beberapa plot tiga dimensi, bisa terbaca perubahan gerak dari robot lengan tersebut. Adapun perubahan-perubahan yang telah diencanakan dengan beberapa titik tersebut akan membentuk suatu gambar tiga dimensi serta dengan perubahan sebagai berikut:

### 4.2.1 Plot 1.

Pada plot pertama yang terlihat pada Gambar 4.5, merupakan gambar tiga dimensi perencanaan posisi awal (posisi parkir) ujung lengan robot. Yaitu pada saat kondisi tersebut ditentukan:

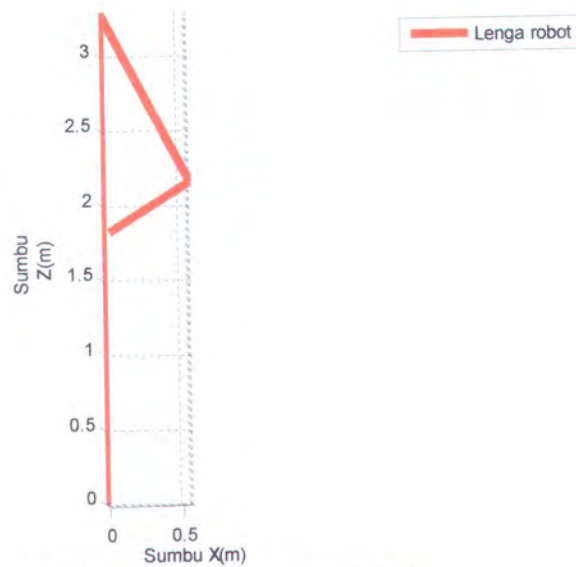


t1 ditentukan pada posisi =  $-30^\circ$

t2 ditentukan pada posisi =  $90^\circ$

t3 ditentukan pada posisi =  $-60^\circ$

t4 ditentukan pada posisi =  $-150^\circ$



Gambar 4.5 Posisi parkir (Posisi 1)

#### 4.2.2 Plot 2.

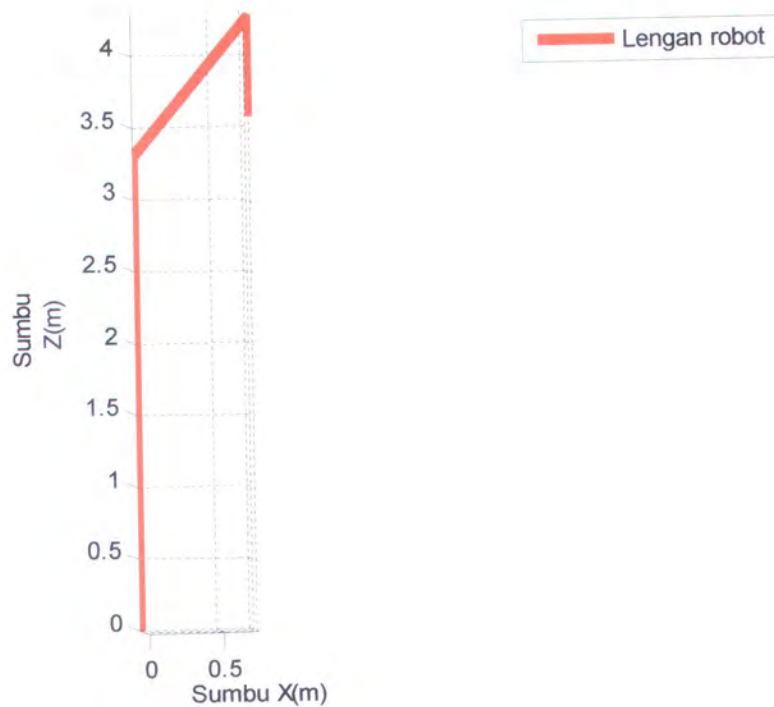
Merupakan gambar tiga dimensi, perencanaan titik yang dituju ujung lengan robot setelah posisi parkir bergerak menuju titik yang berikutnya (gerakan pertama). Yaitu pada saat kondisi tersebut pada Gambar 4.6. ditentukan:

t1 ditentukan pada posisi =  $-30^\circ$

t2 ditentukan pada posisi =  $90^\circ$

t3 ditentukan pada posisi =  $50^\circ$

t4 ditentukan pada posisi =  $-90^\circ$



Gambar 4.6 Posisi ke 2

#### 4.2.3 Plot 3.

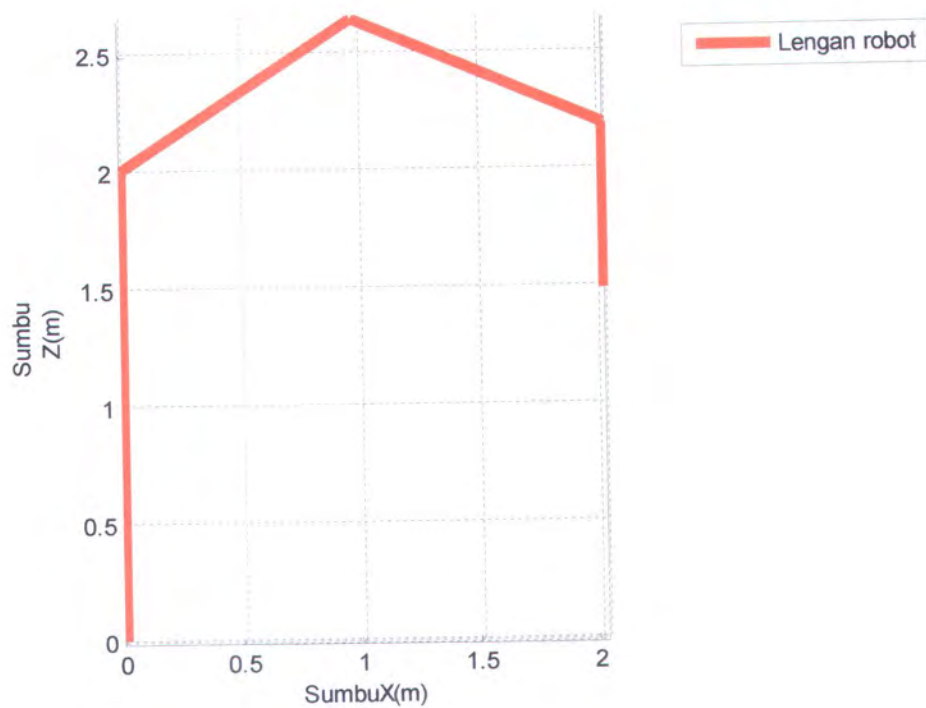
Pada plot ketiga yang terlihat pada Gambar 4.7, merupakan gambar tiga dimensi perencanaan posisi ketiga (gerakan kedua) ujung lengan robot. Yaitu pada saat kondisi tersebut ditentukan:

t1 ditentukan pada posisi =  $-30^{\circ}$

t2 ditentukan pada posisi =  $30^{\circ}$

t3 ditentukan pada posisi =  $-20^{\circ}$

t4 ditentukan pada posisi =  $-90^{\circ}$



Gambar 4.7 Posisi 3

#### 4.2.4 Plot 4.

Pada plot pertama yang terlihat pada Gambar 4.8, merupakan gambar tiga dimensi perencanaan posisi keempat (gerakan ketiga) ujung lengan robot. Yaitu pada saat kondisi tersebut ditentukan:

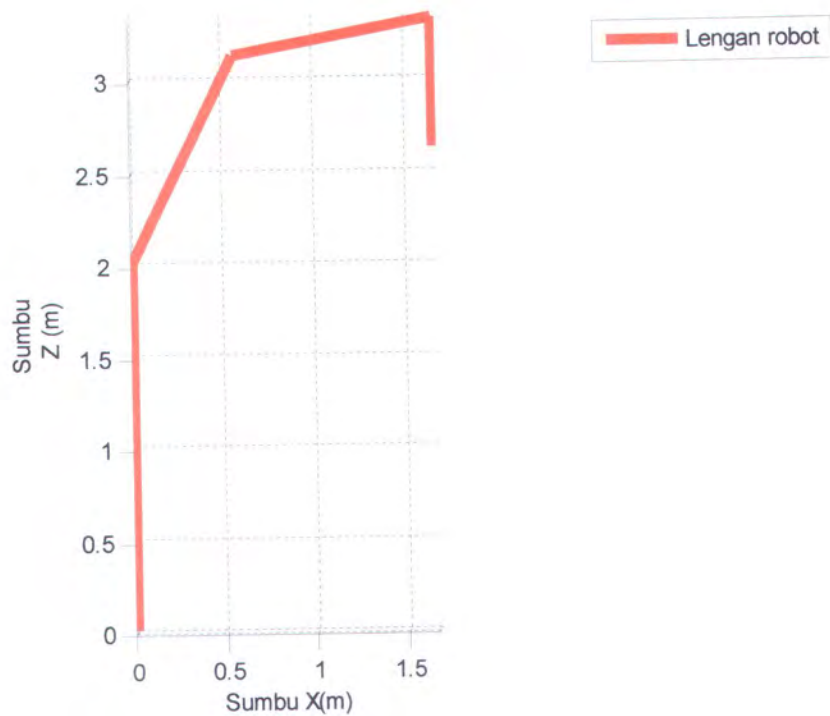
t1 ditentukan pada posisi =  $-30^\circ$

t2 ditentukan pada posisi =  $60^\circ$

t3 ditentukan pada posisi =  $10^\circ$

t4 ditentukan pada posisi =  $-90^\circ$





Gambar 4.8 Posisi 4

#### 4.2.5 Plot 5.

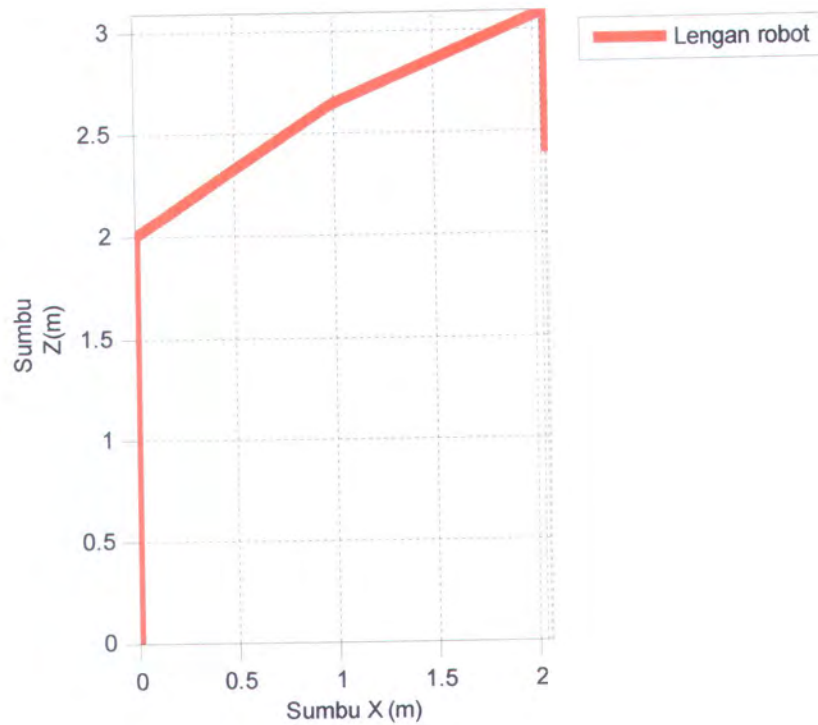
Pada plot kelima yang terlihat pada Gambar 4.9 pada halaman sebelumnya, merupakan gambar tiga dimensi perencanaan posisi kelima (gerakan keempat) ujung lengan robot. Yaitu pada saat kondisi tersebut ditentukan:

t1 ditentukan pada posisi =  $-30^{\circ}$

t2 ditentukan pada posisi =  $30^{\circ}$

t3 ditentukan pada posisi =  $20^{\circ}$

t4 ditentukan pada posisi =  $-90^{\circ}$



Gambar 4.9 Posisi kelima

#### 4.2.6 Plot 6.

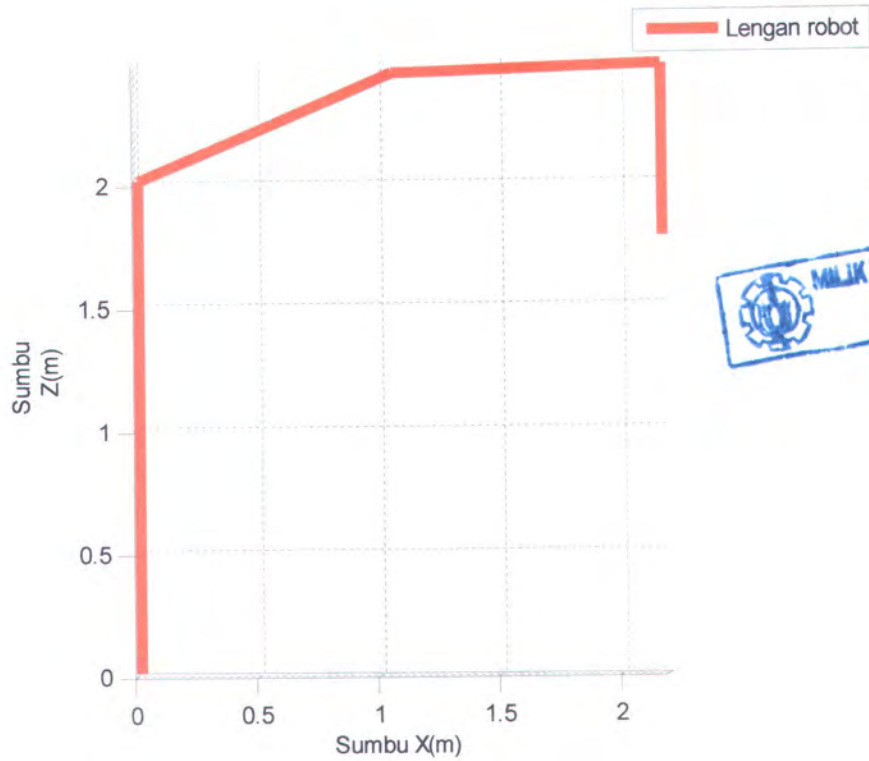
Pada plot keenam yang terlihat pada Gambar 4.10, merupakan gambar tiga dimensi perencanaan posisi keenam (gerakan kelima) ujung lengan robot. Yaitu pada saat kondisi tersebut ditentukan:

t1 ditentukan pada posisi =  $-30^{\circ}$

t2 ditentukan pada posisi =  $20^{\circ}$

t3 ditentukan pada posisi =  $2^{\circ}$

t4 ditentukan pada posisi =  $-90^{\circ}$



Gambar 4.10 Posisi 6

### 4.3 Asumsi Dalam Simulasi

Dalam pengisian bahan bakar dengan asumsi lubang pengisian selalu tepat sejajar dan simetris pada sumbu X serta robot dalam kondisi sempurna, sehingga dalam perencanaan gerakan ini untuk koordinat X selalu dalam posisi 0, sehingga tidak ada gambar untuk koordinat X.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Bila lubang pengisian pada truk tanki diasumsikan selalu tepat sejajar dan simetris maka ordinat X selalu nol.

Dari hasil simulasi penetapan titik titik kontrol lintasan untuk gerakan robot lengan menggunakan metode *recursi B-Spline* dari kurva keluarannya (*point to point* dibandingkan dengan yang penjumlahan) terbaca mengalami ketidak tepatan gerakan pada sumbu Z sebesar 0,095 dengan tingkat akurasi 90,47%.

#### 5.2 Saran

Dalam penelitian perencanaan gerakan untuk robot lengan, kususnya robot lengan untuk pengisian BBM ini masih bisa dibahas yang lebih terperinci bila ada peneliti yang berminat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Djamal Abdul Naser, Sistem Pengaturan Posisi Robot JASURA dengan Metode Neuro- Fuzzy, *Tesis*, Jurusan Teknik Elektro ITS, 2004.
- [2]. Sudirman, Trajectory Planning, Robot Jasua, *Tesis*, Jurusan Teknik Elektro ITS, 2004.
- [3]. Djoko Purwanto, “*Buku Pengantar Kuliah Industrial Robot System S2*”, Dept.of Electrical Engineering ITS Surabaya, 2004.
- [4]. Sutomo, Tinjauan Yuridis Tentang Efektifitas Pendistribusian BBM kepada Masyarakat, *Lembaran Publikasi Ilmiah Pusdiklat Migas*, Vol 11 No.3, Cebu 2004
- [5]. Doctor Chia-Yu Eric Wang, *Dynamic Motion Planning For Robot Manipulators Using B-Spline*, The resulting motion of the two applications can be foundat the web sites (“<http://www.eng.uci.edu/~chawang/project/puma762.html>”),University of California,Irvine, 2001.
- [6]. Patrik Sean Rowe, *Adaptive Motion Planning for Autonomous Mass Excavation*,<http://www.poulos.net/papers/cavoidpaper.pdf> .January.28,1999.
- [7]. Gonzalez, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, Department of Electrical Engineering University of Tennessee, 1987.
- [8]. Eric Paulos, *One Line Collision Avoidance for Multiple Robots Using B-Splines*, January1998. <http://www.cc.gatech.edu/greds/b/Spencer.Brubaker/E90/peper.pdf>.
- [9]. Sciavicco,Lorenzo dan Sisiliano,Bruno, “*Modelling And Control of Robot Manipulation*”, Mc-Graw-Hill Companies, 1996.

- [10]. Mark W. Spong and M.Vidya Sagar," *Robot Dynamics and Control*", John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [11]. H. Asada and J.J.E. Slotine," *Robot Analisis and Control*", John Willey & Sons, New York, 1986.
- [12]. Ben-Zion Sandler," *Robotics Designing the Mechanisms for Automated Machinery*", Prentice-Hall International Inc,Landon, 1991.
- [13]. Cheng F.T dan Sun YY,"Invers Kinematics Solution for Redundant Manipulators Using Compact Formulations," *IEEE/ RST. International Worlshop on Intelegence Robot and System*, Osaka, Japan.
- [14]. Abel Rahman.Tm ," Ageneralized Practical Methode for Analitic Solution of Constrains Invers Kinematic Problem and Redundant Manipulator", *J.Robotic Reseach vol 10*, Th 1991.
- [15]. Ahmad Farobi, "Studi Pendahuluan Sistem-Sistem Robotik Dengan Manipulator Armdroid", *Tesis*, FTI ITB, Bandung , 1983.



## RENCANA KEGIATAN

Untuk melaksanakan penelitian ini direncanakan berlangsung dalam alokasi waktu 5 bulan, yang dimulai dari bulan ke satu sampai dengan bulan ke lima. Implementasi dari kegiatan penelitian penjabarannya adalah pada Tabel Rencana Kegiatan.

Tabel Rencana Kegiatan Penelitian

No.	Jenis Kegiatan	Bulan ke				
		1	2	3	4	5
1	Studi Literatur dan Survei Lapangan serta konsultasi pembimbing					
2	Penerapan data lapangan kedalam Perancangan Sistem dan Simulasi					
3	Pencatatan data hasil simulasi serta menganalisa permasalahan					
4	Penyelesaian Akhir dan Penyusunan Laporan					

## DATA SIMULASI

.Prin out program simulasi B-Spline

```
t = [0 .2 .35 .47 .61 .84 1]*(2*pi);
s=t([1 3 4 5 7]);
knots = augknt(s,4);
sp = spapi(knots,t,sin(t)+1.8);
fnplt(sp,2);
hold on
c = fnbrk(sp,'c');
ts = aveknt(knots,4);
plot(ts,c,':ok')
tt = [s;s;repmat(NaN,size(s))];
ty = repmat(.25*[-1;1;NaN], size(s));
plot(tt(:,1),ty(:,1),'r')
plot(ts(1,:),zeros(size(ts)), '*')
text(knots(5),-.5,'t_5')
text(ts(2),-.45,'t^*_2')
text(knots(1)-.28,-.5,'t_1=t_4')
text(knots(end)-.65,-.45,'t_{n+1}=t^*_n=t_{n+4}')
axis([-1.72 7 -1.5 3.5])
axis off
hold off
save sp;
```

```
function pp=bspline(t>window)
%BSPLINE Plots a B-spline and its polynomial pieces.
%
% BSPLINE(T) plots the B-spline with knot sequence T as well as the
% polynomial pieces of which it is composed.
%
% BSPLINE(T,WINDOW) does the plotting in the WINDOW specified, then
PAUSEs.
%
% PP = BSPLINE(T) plots nothing, but returns the ppform of the
specified
% B-spline, i.e., gives the same result as pp =
fn2fm(spmak(t,1),'pp').
%
% See also BSPLIDEM, BSPLIGUI, SPMK
%
% Copyright 1987-2003 C. de Boor and The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.16 $
%
% C. de Boor / latest change: May 22, 1989
% C. de Boor / latest change: 11 May 1992 (correct misprint (missing
blank))
% C. de Boor / latest change: 21 June 1992 (replace zeros(xx))
```

```

% cb: 14feb96 (v5 compatible); 07apr96 (no plotting if nargout>0)
% cb: 07may96 (correct handling of hold on/off); 27sep96 (adjust
colors)
% cb: 05oct97 (replace use of ANS, to help compilation)
% cb: 04may98 (standardize the help)
% cb: 12mar01 (correct help; update See also)

% Generate the spline description

k=length(t)-1
if (k>1)
    adds=ones(1,k-1);
    tt=[adds*t(1) t(:)' adds*t(k+1)];j=k+1;
    a=[adds*0 1 adds*0];

    % From this, generate the pp description

    inter=find(diff(tt)>0); l=length(inter);
    tx=ones(1,1)*[2-k:k-1]+inter'*ones(1,2*(k-1));tx(:)=tt(tx);
    tx=tx-tt(inter)'*ones(1,2*(k-1));
    b=ones(1,1)*[1-k:0]+inter'*ones(1,k);b(:)=a(b);
    c=sprpp(tx,b);x=[tt(inter) tt(2*k)];
else
    l=1;x=t;c=1;
end

if nargout>0, pp=ppmak(x,c,1); return, end

% Now generate a mesh ...

step=100;xx=x(1)+[-10:step+10]*(x(l+1)-x(1))/step;nstep=length(xx);

% ... and generate and plot the polynomial pieces

if nargin>1, subplot(2,2>window), end
xxx=[xx(1) xx(nstep)]; yyy=[-1 2];
plot(xxx,yyy,'.b'),axis([xxx yyy]), grid off, hold on
bspl = spval(spmak(t,1),xx); plot(xx,bspl,'k','linew',2)
for j=1:(k+1), plot(t([j j]),yyy), end
temp = find(xx>=x(1));jh=temp(1);
jsmax=5;js=jsmax; co=['r';'g';'k';'m';'b'];
for j=1:l;js=js+1;if (js>jsmax), js=1;end
    jl=jh; temp = find(xx>=x(j+1));jh=temp(1);
    pval=polyval(c(j,:),xx-x(j));
    %plot(xx,pval,co(js)); plot(xx(jl:jh),bspl(jl:jh),co(js),'linew',1.3)
end
pause
hold off
% if nargin>1 %, subplot
% else clg
% end

```



## DATA PRIBADI



Nama : Sugiarto  
Tmpt/Tgl Lahir : Blora, 12 Oktober 1955  
Agama : Islam  
Nama Ayah : Said (Almarhum)  
Nama Ibu : Sukilah (Almarhum)  
Alamat : Jalan Cempaka No.40 Mentul  
Indah Karangboyo Cepu.

### Riwayat Pendidikan :

- Sekolah Dasar (SD) Negeri 14 Cepu tahun (1966-1971).
- Sekolah Menengah Pertama (SMP) Kristen Cepu tahun (1972-1974).
- Sekolah Teknik Menengah (STM) Migas Cepu tahun (1975-1977).
- AKAMIGAS Cepu :
  - D. I. Teknik Listrik Perminyakan tahun 1982/1983
  - D. II. Teknik Listrik Perminyakan tahun 1984/1985
  - D. III. Teknik Listrik Perminyakan tahun 1994/1995
- Universitas Diponegoro (UNDIP), Fakultas Teknik, Bidang Studi Teknik Elektro, Program S1 tahun (2000-2003).

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Elektro, Bidang Keahlian Mekatronika tahun (2003-2005).