

## SISTEM KOORDINAT ROBOT INDUSTRI

Adi Purwanto <sup>1</sup>

### ABSTRACT

*Manipulator or Industrial Robot is an equipment which is designed to manipulate human hand motion. Robot is belonging to industrial automation technology there are rapid development progress according to computer technology progress that able to make programmable automations. Robot is one of implementation programmable automation.*

*In order to substitute human labour by robot, there are many aspect must be considered, such as: technical aspect, economical aspect, social and environment work conditions. Select and design of robot type, needed knowledge about joint, coordinate system or robot configuration, and work envelope. So, selecting robot type can work optimally.*

**Key word:** Robot, joint, work envelope

### INTISARI

Robot industri atau manipulator adalah alat yang dirancang untuk memanipulasi gerak dari tangan manusia. Robot termasuk dalam teknologi otomasi industri yang berkembang dengan pesat, seiring dengan kemajuan teknologi komputer yang memungkinkan adanya bentuk otomasi yang mampu program. Robot adalah salah perwujudan dari otomasi mampu program tersebut.

Penggunaan robot sebagai pengganti tenaga kerja manusia harus mempertimbangkan aspek teknis, aspek ekonomi, dan sosial serta kondisi dan situasi lingkungan kerja. Dalam memilih dan merancang bentuk robot diperlukan pengetahuan tentang joint, sistem koordinat atau konfigurasi robot, volume kerja/work envelope sehingga robot yang dipilih dapat berfungsi sebagaimana yang diharapkan.

**Kata kunci:** Robot, joint, work envelope

### PENDAHULUAN

Robot berasal dari kata "robota" bahasa Czech yang berarti pekerja, diperkenalkan pertama kali pada tahun 1920 oleh K. Capek dalam Rossum's Universal Robot. Robot industri mempunyai pengertian yang berbeda dengan pengertian robot secara awam yang berkembang dewasa ini. Robot industri tidak berbentuk humanoid, artinya mesti mempunyai; kepala, badan dan organ lainnya, serta mempunyai kecerdasan buatan (*artificial intelligent*) seperti manusia layaknya, seperti robot R2D2 atau C3PO yang terdapat dalam film Star Wars.

Beberapa definisi tentang robot telah dibuat orang dan hampir semua mempunyai arti berbeda. Dalam kamus Webster, kata "robot" diartikan sebagai suatu alat otomatis yang berfungsi untuk mengerjakan pekerjaan yang biasa

dilakukan oleh manusia. Kata kunci tentang robot menurut *Robot Institute of America*, adalah sebagai berikut; Sebuah robot adalah mesin yang dapat diprogram, multifungsi, dibuat untuk mengerjakan, memindahkan, material-material, komponen, perkakas dan benda-benda tertentu, melalui sebuah pergerakan yang dapat berubah-ubah sesuai dengan program yang ditentukan, sehingga mempunyai performansi untuk dapat mengerjakan tugas yang cukup banyak. Menurut *International Organization for Standardization (ISO)* yang dimaksud dengan robot industri adalah sebagai berikut: Suatu mesin yang terbentuk dari mekanisme yang mempunyai beberapa derajat kebebasan, biasanya mempunyai penampilan berbentuk satu atau lebih lengan dengan ujung pergelangan yang mampu memegang

<sup>1</sup> Staf pengajar Jurusan Teknik Mesin, ISTA, Yogyakarta

pahat, benda kerja, atau sebuah peralatan inspeksi.

Sebuah definisi robot menurut *Robotic Industries Association (RIA)* adalah suatu peralatan manipulator yang mampu program (*programm-able*), mempunyai berbagai fungsi, yang dirancang untuk memindahkan bahan, komponen-komponen, peralatan atau alat khusus, melalui berbagai gerakan yang terprogram untuk pelaksanaan berbagai tugas. Selanjutnya sesuai dengan penerapannya, robot industri bukanlah peralatan yang dirancang untuk menirukan seluruh kemampuan manusia, tetapi robot industri lebih menyerupai tangan manusia, serta dirancang untuk memanipulasi gerak dari organ tersebut. Oleh karenanya robot industri dikenal juga dengan nama robot tangan atau manipulator.

Sehubungan dengan definisi tentang robot yang begitu beragam, maka untuk membedakan apakah itu robot atau mesin otomatis lainnya, terdapat kriteria untuk mengklasifikasikan robot sebagai berikut; **fleksibilitas, spesifikasi, kontrol memori, dan obsolete**. Fleksibilitas suatu robot dibuat mampu program ulang, dengan mengubah program berarti robot sudah berubah fungsi. Spesifikasi robot dibuat multi fungsi dan versatil, tidak seperti *specialized machine* yang dibuat khusus untuk mengerjakan pekerjaan yang lebih spesifik. Kontrol memori diperlukan pada robot untuk mengendalikan posisi *end effector*. Program pengendali dimasukkan dalam memori, dan memori ini-lah yang selanjutnya mengatur transformasi koordinat gerakan robot. Suatu robot boleh dikata tidak pernah *obsolete*, karena dengan penggantian *end effector* dan merubah program pengendali, robot telah siap dengan tugas yang baru.

### Klasifikasi Robot

Secara umum robot yang digunakan pada industri maupun robot yang dikembangkan untuk skala penelitian laboratorium dapat diklasifikasikan dalam 3 (tiga) golongan, yaitu:

1. **Mechano Chiropods**, adalah penggabungan peralatan dan/atau per-

engkapan mekanik (*mechanical attachment*) dengan organ manusia, termasuk dalam hal ini adalah:

a) **Mechano Chiropods**, yaitu peralatan mekanik yang dipasangkan pada tubuh manusia.

b) **Sceptrology**, yaitu perlengkapan mekanik yang dipasang pada tubuh manusia pada anggota badan yang cacat.

c) **Exoskeleton**, yaitu manusia robot.

Pada jenis *mechano chiropods* yang terakhir atau manusia robot terdapat perbedaan dengan *cyborg*. *Cyborg* berasal dari kata *cybernetic* dan *organism*, yakni penanaman memori buatan pada manusia untuk kemudahan memberi komando.

2. **Telechirs**, atau biasa disebut **Hand at A Distance**. *Telechirs* lebih tepat disebut *manipulator*, yakni lengan robot yang dapat dikendalikan dari jarak jauh oleh penggunaannya, dengan kata lain *telechirs* adalah kepanjangan tangan dari penggunaannya dimana organ tubuh pengguna tidak langsung bersentuhan dengan material yang di-*handling*, karena keterbatasan tenaga maupun untuk memperoleh jarak yang aman bagi pengguna. Tujuan penggunaan *telechirs* ini, antara lain adalah:

a) **untuk ekstensi kekuatan dan daya**. Contoh: pengambilan batuan atau material pada permukaan planet menggunakan manipulator, pengambilan harta karun pada ekspedisi bawah laut, operator mengoperasikan lengan robot dengan menggunakan lengan pengajar (*teaching arm*) untuk meraih material yang dimaksud.

b) **untuk keperluan pada tempat berbahaya**. Contoh: pekerjaan penjinakaan bom (*EOD task force*), pekerjaan atau proses pada reaktor nuklir, dalam hal ini operator mengoperasikan lengan robot dengan menggunakan lengan pengajar (*teaching arm*) untuk operasi yang dimaksud.

c) untuk teknologi mikro atau nano. Contoh: penelitian pengembangan rangkaian terpadu berskala luas (VLSI wafer manufacturing), pekerjaan pada rekayasa genetika (penanaman embrio, cloning) pekerjaan ini tidak mungkin dilakukan oleh manusia – dengan tangan dan mata telanjang – melainkan harus menggunakan manipulator mikro.

3. **Industrial Robot.** Adalah robot yang dikembangkan untuk otomatisasi proses produksi atau tujuan lain pada industri. Robot industri dapat diklasifikasikan antara lain berdasarkan a) jangkauan dan posisi robot, b) keberadaan sensor dan gerak robot.

a) **jangkau dan posisi robot.** Suatu robot hanya dapat memanipulasi obyek yang dapat dijangkaunya. Ruang kerjanya terbatas oleh perpanjangan maksimum dari *joint* yang dimiliki robot tersebut. Untuk mengatasi problem yang disebabkan oleh keterbatasan jangkauan lengan robot, diatasi melalui pendekatan: (McKerrow, 1993: 400)

- ① **Fixed in place robot,** adalah robot yang dipasang permanen pada lantai *plant* manufaktur dilengkapi dengan *conveyor* atau *mechanical feed devices*, seperti pada *flexible manufacturing cell*.
- ② **Gantry robot,** adalah robot yang dipasang dan dapat bergerak pada *overhead rail* untuk menambah atau melipatkan jangkauan robot.
- ③ **Mobile robot,** adalah robot yang dilengkapi dengan roda untuk dapat bergerak dan melakukan tugas sepanjang lantai pabrik.

b) **keberadaan sensor dan gerak robot.** Suatu robot dalam aplikasinya pada industri dapat berupa:

- ① **Senseless, immobile robot,** robot ini tidak dilengkapi dengan sensor dan bekerja stationer ditempat-nya.
- ② **Limited sensory, immobile robot,** adalah robot yang diberi

beberapa sensor, misal; sensor suhu, sensor, cahaya, sensor *tactile*, dll.

- ③ **Mobile robot,** robot ini dapat bergerak ketempat lain untuk kepentingan operasi berjarak agak jauh.
- ④ **Sensory, mobile robot,** adalah robot bergerak yang dilengkapi dengan sensor, serta dapat dikendalikan dengan mudah.

Robot industri dapat juga diklasifikasikan berdasarkan; a) generasi robot dibuat, b) tingkat kecerdasannya, c) tingkat pengendalian, d) tingkat bahasa pemrograman yang dipakai.

Menurut John Phillip McKerrow dalam bukunya *Introduction to Robotics*, terdapat 5 (lima) klasifikasi robot industri berdasarkan generasinya. Generasi robot tersebut adalah:

- ① **Playback robots.** Robot generasi pertama ini adalah robot yang dapat memainkan kembali urutan perintah yang telah direkam. Robot ini kebanyakan menggunakan kendali *loop* terbuka, dengan *mechanical stop* untuk membatasi gerak, misal; robot untuk mengelas dan mengecat, robot *pick and place*.
- ② **Sensor controlled robots.** Adalah robot generasi kedua, yang mana robot bekerja dengan menggunakan kendali *loop* tertutup untuk manipulasi gerakan. Perintah atau pengambilan keputusan berdasar pada masukan dari *sensor*.
- ③ **Vision controlled robots.** Adalah robot yang dapat memanipulasi suatu obyek dengan menggunakan *visual sensing* (*machine vision* atau *computer vision*). Robot generasi ketiga ini menggunakan kamera optik untuk dapat mengenali bentuk dan keberadaan suatu obyek.
- ④ **Adaptively controlled robots.** Generasi keempat dari robot industri ini adalah robot yang dapat secara otomatis diprogram ulang gerakannya berdasarkan pada masukan-masukan dari *sensory*.
- ⑤ **Artificially intelligent robots.** Adalah robot yang menggunakan teknik kecerdasan buatan untuk

membuat keputusan sendiri dalam mengatasi masalah. Robot generasi kelima ini mampu melaksanakan beberapa tugas dan fungsi yang dilakukan oleh manusia, dilengkapi dengan berbagai macam *sensor* dengan kemampuan melihat (*machine vision*) dan meraba (*touching*).

Asosiasi robot yang ada di Jepang (JIRA) mengklasifikasikan robot menjadi 6 (enam) klas berdasar pada **tingkat kecerdasannya**, yaitu:

- ① **Manual handling devices**, dikendalikan oleh manusia/operator.
- ② **Fixed sequence robots**, perintah urutan gerak berulang robot berdasarkan kontrol memori yang telah dibuat.
- ③ **Variable sequence robots**, dalam hal ini seorang operator dapat memodifikasi dengan mudah urutan gerak dari robot.
- ④ **Play back robots**, dalam hal ini manusia/operator mengendalikan robot untuk suatu tugas atau gerakan tertentu.
- ⑤ **Numerically controlled robots**, dalam hal ini operator memasok program gerakan, atau dengan mengajarkan tugas atau gerakan secara manual.
- ⑥ **Intelligent robots**, adalah robot yang dapat memahami dan berinteraksi terhadap perubahan yang terjadi pada lingkungan.

Coiffet dan Chirouze (1982) dalam bukunya *An Introduction to Robot Technology*, mengelompokkan program pengendali robot berdasarkan tingkatannya (*level of control*), menjadi:

- ① **Artificial intelligence level**, adalah program yang dapat menerima perintah seperti; "*Pick up the bearing*" dan kemudian menguraikannya menjadi urutan dari perintah dengan tingkatan yang lebih rendah, berbasis pada model strategi dari tugas.
- ② **Control mode level**, adalah program yang mana gerakan dari sistem dimodelkan, termasuk interaksi dina-

mis antara mekanisme yang berbeda, trayektori yang direncanakan, dan titik tangkap terpilih. Dari model ini strategi kontrol diformulasikan, dan perintah kontrol dikeluarkan kepada tingkat berikutnya yang lebih rendah.

- ③ **Servo system level**, yang mana aktuator mengendalikan parameter-parameter mekanis menggunakan umpan balik dari data sensor internal. Juga, koreksi dan deteksi kegagalan pada mekanis, diimplementasikan pada tahap ini.

Klasifikasi robot yang lain adalah berdasarkan tingkatan bahasa pemrograman. Efektivitas pemakaian robot untuk dapat melakukan berbagai variasi dan keeluasaan tugas adalah tergantung dari pengembangan bahasa pemrograman robot tingkat tinggi. Meskipun telah banyak muncul bahasa pemrograman lanjut untuk robot, tetapi kebanyakan hanya tersedia untuk skala penelitian laboratorium.

Menurut Lozano-Perez (1983) dalam tulisannya pada jurnal IEEE, yang berjudul *Spatial Planning: A Configuration Space Approach*, membuat kategori sistem pemrograman untuk robot secara luas menjadi tiga kategori:

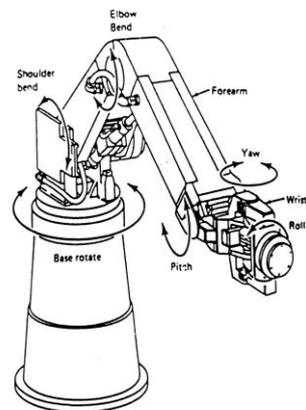
- ① **Guiding system**, dalam hal ini, pemakai mengajarkan robot melalui gerakan yang dibuat.
- ② **Robot-level programming systems**, dalam hal ini pemakai menulis program komputer untuk gerakan spesifik dan penginderaan.
- ③ **The task-level programming system**, dalam hal ini pemakai membuat spesifik operasi dengan gerakannya pada obyek robot untuk dimanipulasi.

Namun demikian, kemampuan dari perangkat lunak pengendali robot, ditentukan oleh; a) pemakaian dan keluwesan, b) perancangan mekanik, dan c) ketersediaan sensor.

## PEMBAHASAN

### Pemakaian Robot atau Manipulator pada Industri

Pemakaian manipulator atau robot industri di tiap-tiap negara mempunyai latar belakang berbeda, begitu juga dengan perkembangan robot atau manipulator tersebut. Robot atau manipulator adalah penggabungan antara komponen mekanik dan elektronik yang demikian menyatu dan bekerja dengan sangat bagus sekali, yang selama ini dikenal dengan nama produk mekatronik. Gabungan peralatan mekanis dan elektronik sebagai pengendali tersebut pada umumnya adalah berbasis pada komputer atau mikrokontroler.



Gambar 1. Robot Industri dengan sistem koordinat *anthropomorphic*  
Sumber: Charles A. Schuler, *Industrial Electronic and Robotic*

Faktor lain yang ikut mendorong pesatnya pemakaian manipulator atau robot industri adalah mahalnya biaya produksi dengan sistem padat karya. Sebagai contoh, Jepang adalah negara dengan industri manufaktur yang mempunyai pertumbuhan sangat cepat sekali. Dari GDP sebesar 13 % pada 1955, mencapai peningkatan hingga 28 % pada 1990. Sehingga kenyataan yang ada membuat generasi muda Jepang tidak suka bekerja di pabrik dengan alasan “3K”—*kitsui* (kerja keras), *kitanai* (kotor), dan *kiken* (berbahaya). Hal tersebut mempercepat pemakaian robot atau manipulator serta penerapan

*otomasi industri (factory automation)* dan sistem *manufaktur berintegrasi komputer* yang merupakan kunci keberhasilan manu-faktur di Jepang.

Pemakaian manipulator atau robot industri di Amerika mulai diperkenalkan pada awal 1960-an, dengan kaidah pemakaian robot berdasarkan aturan “3D” (**dull, dirty, and dangerous**) dan “3H”, yaitu **hot, heavy, dan hazardous**, oleh karena aturan tersebut, sehingga dirasa perlu menggantikan tenaga manusia dengan manipulator atau robot.

Namun demikian pemakaian robot atau manipulator di industri manufaktur dapat dikelompokkan berdasarkan pekerjaan yang digantikannya, yaitu untuk; a) memindahkan barang, b) mengoperasikan suatu proses, c) pembongkaran dan perakitan, serta d) pengendalian kualitas.

Beberapa faktor yang harus dipertimbangkan dalam memutuskan penggunaan manipulator atau robot industri adalah menyangkut beberapa aspek sebagai berikut; aspek teknis, aspek ekonomi, aspek sosial, serta kondisi dan situasi lingkungan kerja. Dua aspek tersebut terakhir, diantaranya adalah:

### Lingkungan kerja yang berbahaya bagi manusia

Jika lingkungan kerja tidak aman, berbahaya, tidak nyaman atau tidak sehat bagi manusia atau pekerja, maka peran pekerja tersebut dapat digantikan oleh robot. Misalnya pada pekerjaan; *die casting, forging, stamping presses, welding, coating, injection molding, press tools operation*.

### Siklus kerja yang berulang-ulang (*repetitive work cycle*)

Jika pekerja harus melakukan jenis pekerjaan yang berulang-ulang dalam waktu yang lama, maka akan menimbulkan kejenuhan atau bosan, sehingga hasil pekerjaan cenderung tidak konsisten. Inkonsisten ini akan menurunkan kualitas dan kapasitas produksi. Untuk hal tersebut peran pekerja dapat digantikan robot. Misal pada proses perakitan dan proses inspeksi.

### **Pekerjaan yang sulit dilakukan manusia.**

Manusia mempunyai keterbatasan kemampuan kerja, oleh karenanya salah satu aspek teknologi adalah sebagai ekstensi manusia. Begitu juga beberapa jenis pekerjaan yang memerlukan tenaga, kecepatan waktu, ketepatan posisi, dan lain pekerjaan yang tak terjangkau tangan manusia maka dapat digantikan oleh robot, karena robot dapat diprogram dengan posisi obyek tertentu dengan keandalan yang tinggi.

### **Pekerjaan pada shift III.**

Pada sistem manufaktur luwes (FMS) yang mana industri harus tanggap dan peka terhadap perubahan permintaan pasar, seringkali sebuah plan dengan kapasitas produksi terbatas harus melipat-gandakan jumlah produk dalam tiga shift dalam sehari terus menerus. Padahal ongkos tenaga kerja untuk lembur (malam hari) sangat mahal, maka dalam hal ini robot dapat diprogram untuk menggantikan tenaga manusia untuk kerja lembur (*shift III*) tersebut.

### **Tahapan pekerjaan yang sering berubah.**

Telah diketahui bahwa *unit cost* sebuah produk adalah merupakan fungsi dari metode produksi dan volume produksi, oleh karena permintaan pasar yang sering berubah, terkait dengan perubahan jenis dan jumlah produk, maka proses produksi harus sering berganti dengan dengan tahapan proses yang sering bervariasi. Maka penggunaan robot lebih tepat dan cepat beradaptasi (dengan diprogram ulang) dengan berbagai perubahan pada tahapan kerja tersebut.

Berikut ini adalah beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dan/atau berpengaruh pada perancangan, pemilihan robot yang akan dipakai pada plant-plant manufaktur, antara lain:

- (a) Kapasitas mengangkut beban
- (b) Kecepatan gerakan
- (c) Keandalan
- (d) Keterulangan

- (e) Konfigurasi lengan
- (f) Derajat kebebasan
- (g) Sistem kendali
- (h) Memori program
- (i) Jangkau atau volume kerja (*work envelope*)

### **JENIS SAMBUNGAN PADA ROBOT (THE ROBOTIC JOINTS)**

Sambungan pada robot adalah mekanik yang dapat meneruskan gerakan relatif antara bagian-bagian lengan robot. Jenis sambungan pada robot dirancang agar dapat memungkinkan robot untuk menggerakkan *end-effector*-nya sepanjang lintasan dari satu posisi menuju posisi lain yang dikehendaki.

### **Gerakan dasar robot.**

Gerakan dasar yang diperlukan untuk membentuk lintasan yang diinginkan pada sebagian besar robot industri adalah:

- ❶ Gerakan rotasional; adalah gerakan yang memungkinkan robot untuk menempatkan lengannya di segala arah pada bidang horisontal.
- ❷ Gerakan radial; adalah gerakan yang memungkinkan robot untuk menggerakkan *end-effector*-nya secara radial untuk meraih jarak terhadap suatu titik.
- ❸ Gerakan vertikal; adalah gerakan yang memungkinkan robot untuk menempatkan *end-effector*-nya pada tinggi yang berbeda.

Derajat kebebasan merupakan besaran pada lengan dari robot (*manipulator*) yang dapat diatur bebas, independen di dalam batas-batas tertentu. Derajat kebebasan adalah jumlah arah yang independen, dimana *end-effector* dari sebuah robot dapat bergerak. Dari pengalaman dan penelitian menunjukkan bahwa suatu robot dengan derajat kebebasan  $>6$  akan mempunyai kemampuan yang lebih tinggi, tetapi memerlukan pengendali yang lebih banyak dan lebih rumit. Sedangkan bila derajat kebebasan  $<6$ , kemampuan robot menurun karena tidak semua keadaan yang diinginkan ketika suatu robot sedang bekerja dapat diperoleh,

meskipun pengendalian robot ini menjadi lebih sederhana.

Jika ditinjau secara alami gerakan relatif dari suatu sambungan dapat diklasifikasikan menjadi: (Singh, 1996; 310)

- 1) *prismatic joint*, atau disebut *sliding* atau *linear joint*. Disebut *prismatic* karena penampang lintang dari sambungan pada umumnya berbentuk prisma.
- 2) *Revolute joint*, hanya dapat bergerak memutar antar sambungan. Variasi dari *revolute joint* termasuk: *rotational joint*, *twisting joint* dan *revolving joint*.

### Notasi Sambungan (*Joint Notation*)

Konfigurasi fisik robot-robot industri dapat dinyatakan dengan notasi sambungan-nya, yang dalam hal ini notasi adalah merupakan tipe sambungan yang digunakan. Tipe sambungan dan notasi yang digunakan untuk membentuk konfigurasi fisik robot, dapat dilihat seperti pada Gambar 2. Kelima *joint* tersebut adalah:

- a) *linear joint* (*type L joint*),
- b) *orthogonal joint* (*type O joint*),
- c) *rotational joint*, (*type R joint*),
- d) *twisting joint*, (*type T joint*), dan
- e) *revolving joint*, (*type V joint*).

Sehingga dengan demikian untuk keperluan industri dapat dibuat konfigurasi: robot LRL, robot RRL, robot TRL, robot LVL, dan sebagainya.

### Transformasi Robot Dua *Joint*

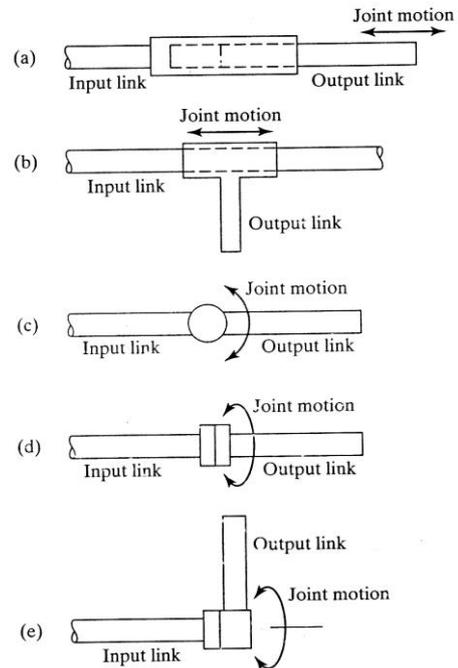
Pemetaan ruang gerak joint terhadap koordinat ruang disebut transformasi maju, dan sebaliknya dari koordinat ruang ke dalam gerak joint disebut transformasi balik. Transformasi maju dan transformasi balik pada robot Cartesian dapat diketahui secara langsung. Untuk transformasi maju adalah:

$$x = \lambda_2 \text{ dan } z = \lambda_1 \quad (1)$$

dan untuk transformasi balik,

$$\lambda_1 = z \text{ dan } \lambda_2 = x \quad (2)$$

dalam hal ini  $x$  dan  $z$  adalah harga koordinat ruang koordinat, dan  $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$  adalah harga pada joint.



Gambar 2. Lima jenis joint yang umum digunakan pada robot industri  
Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Volume kerja dari robot RR mempunyai sepasang alternatif kemungkinan harga joint yang disebut konfigurasi "atas" dan "bawah". Harga  $r_1$  dan  $r_2$  pada robot RR, adalah:

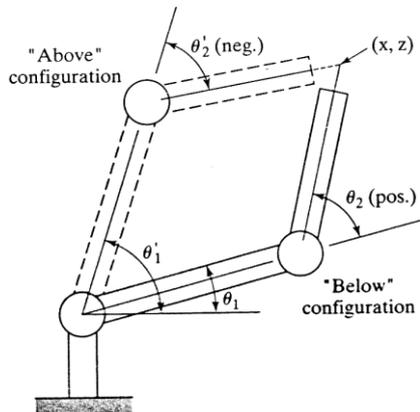
$$r_1 = \{L_1 \cos \theta_1, L_1 \sin \theta_2\} \quad (3a)$$

$$r_2 = \{L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \quad (3b)$$

Vektor dari  $r_1$  dan  $r_2$  (dengan memperhitungkan  $L_0$ ) akan didapat harga koordinat  $x$  dan  $z$  pada ujung lengan:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4a)$$

$$z = L_0 + L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4b)$$



Gambar 3. Robot artikulasi 2 joint  
(Robot RR)

Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Jika diketahui posisi koordinat  $x$  dan  $z$  pada koordinat ruang, maka pada robot RR harus terlebih dahulu ditentukan menggunakan konfigurasi "atas" atau "bawah" terlebih dahulu. Jika ditentukan konfigurasi bawah, maka kedua sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  berharga positif. Jika diketahui panjang lengan  $L_1$  dan  $L_2$ , maka harga  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + (z - L_0)^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (5a)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\{(z - L_0)(L_1 + L_2 \cos \theta_2) - xL_2 \sin \theta_2\}}{\{x(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + (z - L_0)L_2 \sin \theta_2\}} \quad (5b)$$

### Transformasi Robot Tiga Joint

Pada robot atau manipulator (*body-arm*) dengan 3 derajat kebebasan dengan ketiga joint jenis R, maka robot tersebut dapat disebut robot RR:R.

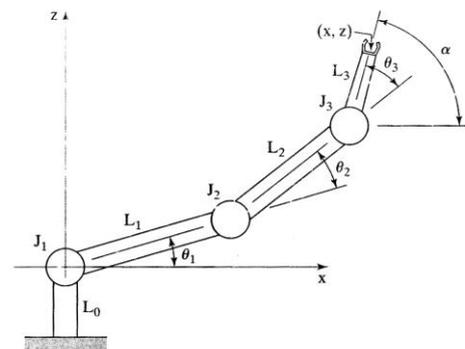
Pengamatan pada robot RR: terhadap bidang  $x$ - $z$  dengan joint 1 ( $J_1$ ) yang terletak pada base  $L_0$ , mempunyai panjang  $L_1$  dan sudut  $\theta_1$ , joint 2 ( $J_2$ ) panjang  $L_2$  dan sudut  $\theta_2$ , joint 3 ( $J_3$ ) panjang  $L_3$  dan sudut  $\theta_3$ , untuk transformasi maju, koordinat  $x$  dan  $z$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (6a)$$

$$z = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (6b)$$

Besarnya sudut yang dibentuk oleh lengan  $L_3$  terhadap sumbu  $x$  adalah sama dengan jumlah ke tiga sudut yang dibentuk oleh masing-masing lengan. Sehingga dapat dituliskan:

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (6c)$$



Gambar 4. Robot dengan konfigurasi  
RR:R

Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Pada transformasi balik, jika diketahui *world coordinat*  $x$ ,  $z$ , dan  $\alpha$  dan diinginkan untuk menghitung  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , dan  $\theta_3$  ditentukan terlebih dahulu koordinat pada *joint 3* ( $J_3$ ). Koordinat  $J_3$  adalah:

$$x_3 = x - L_3 \cos \alpha \quad (4)$$

$$z_3 = z - L_3 \sin \alpha \quad (5)$$

dengan telah diketahui koordinat *joint 3* ( $J_3$ ) maka  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  dapat dihitung. Jika diketahui panjang  $L_1$  dan  $L_2$  maka besar sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  terhadap sumbu  $x$  dapat dihitung.

$$\cos \theta_2 = \frac{x_3^2 + z_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (6)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\{z_3(L_1 + L_2 \cos \theta_2) - x_3L_2 \sin \theta_2\}}{\{x_3(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + z_3L_2 \sin \theta_2\}} \quad (7)$$

Besarnya sudut pada joint 3 ( $J_3$ ) ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_3 = \alpha - (\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

### Transformasi Robot Empat Joint

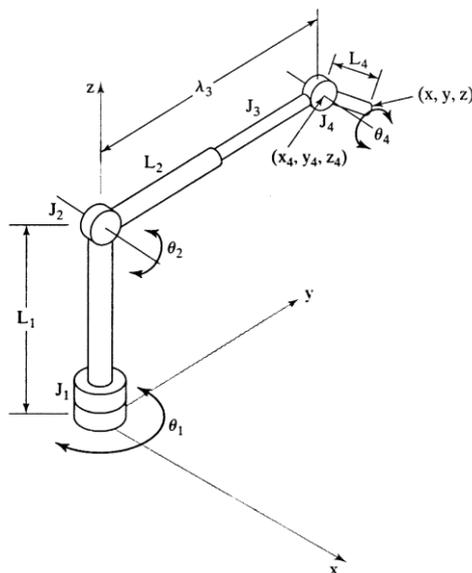
Semua robot untuk proses (misal; pengelasan) mempunyai volume kerja 3D. Robot dengan konfigurasi TRL:R seperti pada Gambar 5 Joint 1 (tipe T) digunakan untuk berputar pada sumbu z. Joint 2 (tipe R) disediakan untuk rotasi pada sumbu horizontal yang mana arahnya ditentukan oleh joint 1. Joint 3 (tipe L) adalah lengan prismatic dengan gerakan linier dengan arah ditentukan oleh joint 1 dan 2. Dan Joint 4 (tipe R) menyediakan rotasi pada sumbu yang paralel terhadap joint 2. Harga dari keempat joint, masing-masing  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\theta_4$ , untuk transformasi maju dapat diketahui dari persamaan:

$$x = \cos\theta_1(\lambda_3 \cos\theta_2 + L_4 \cos\alpha) \quad (9a)$$

$$y = \sin\theta_1(\lambda_3 \cos\theta_2 + L_4 \cos\alpha) \quad (9b)$$

$$z = L_1 + \lambda_3 \sin\theta_2 + L_4 \sin\alpha \quad (9c)$$

dalam hal ini  $\alpha = \theta_2 + \theta_4$



Gambar 5. Robot 4 derajat kebebasan dengan konfigurasi TRL:R  
Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Pada tranformasi balik, diketahui koordinat ruang  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , dan  $\alpha$ .  $\alpha$  adalah orientasi spesifik, paling tidak untuk perpanjangan konfigurasi dan mampu berorientasi hanya dengan *wrist joint*. Untuk mendapatkan nilai joint dapat ditentukan koordinat keempat joint seperti penurunan persamaan pada robot 3 joint.

$$\tan \theta_1 = \frac{y}{x} \quad (10a)$$

$$x_4 = x - \cos\theta_1(L_4 \cos\alpha) \quad (10b)$$

$$y_4 = y - \sin\theta_1(L_4 \cos\alpha) \quad (10c)$$

$$z_4 = z - L_4 \sin\alpha \quad (10d)$$

$$\lambda_3 = \sqrt{x_4^2 + y_4^2 + (z_4 - L_1)^2} \quad (10e)$$

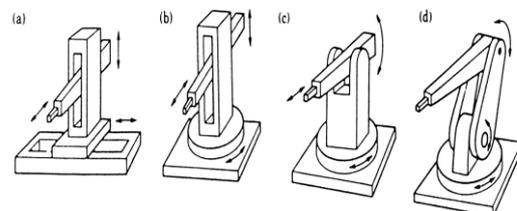
$$\sin \theta_2 = \frac{z_4 - L_1}{\lambda_3} \quad (10f)$$

$$\theta_4 = \alpha - \theta_2 \quad (10g)$$

### SISTEM KOORDINAT ROBOT

Robot dalam kenyataanya, meskipun secara ideal dapat diprogram untuk melakukan pekerjaan apapun, namun dalam perancangannya hanyalah untuk menangani jenis pekerjaan tertentu saja. Rancangan robot biasanya didasarkan pada kebutuhan spesifik yang menyangkut lingkup atau ruang kerjanya. Oleh karenanya harus mengacu pada jenis konfigurasi yang dipakai.

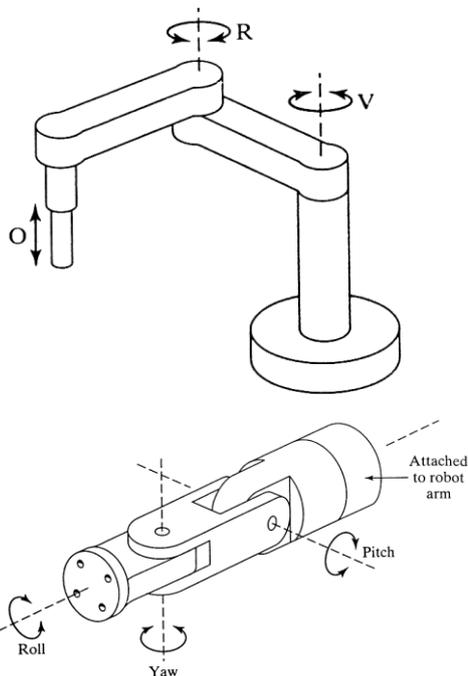
Tiga jenis derajat kebebasan X, Y, dan Z, dapat dibentuk dengan mengatur struktur robot dalam berbagai cara. Dari analisis matematis suatu problem menunjukkan bahwa terdapat 37 kemungkinan konfigurasi robot yang dapat dibentuk. Namun demikian hanya beberapa konfigurasi atau sistem koordinat yang sangat populer dalam perancangan robot (Gambar 3).



Gambar 3. Sistem koordinat robot industri  
Sumber: Kalpakjian Serope, Manufacturing Engineering & Technology

Jumlah derajat kebebasan dalam perancangan lengan robot dapat dibuat sebanyak mungkin, sesuai dengan tingkat kompleksitas atau versatilitas pekerjaan yang akan dilakukan. Akan tetapi semakin banyak jumlah derajat kebebasan yang dimiliki lengan robot, semakin sulit dalam pemrograman, keterulangan, dan tingkat presisinya. Jika dikehendaki robot atau manipulator untuk pekerjaan yang kompleks, biasanya diterapkan koordinasi antara *robot* dengan *robot* atau koordinasi antara *robot* dengan *indexer* atau *attachment* lain yang sesuai.

Jumlah derajat kebebasan robot industri biasanya tidak lebih dari 6 derajat kebebasan, terbagi dalam *body-arm* robot dan *end-effector*. Suatu *body-arm* robot SCARA atau robot tipe VRO dengan 3 derajat kebebasan dan *end-effector* yang mempunyai 3 derajat kebebasan untuk melakukan *pitch*, *yaw*, dan *rolling*, ditunjukkan pada Gambar 4.

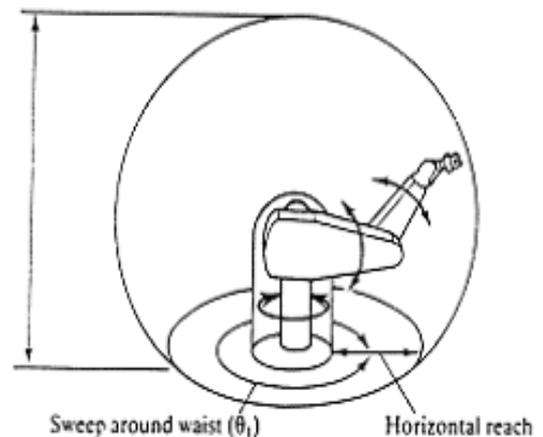


Gambar 4. *Body-arm* dan *end-effector* robot, masing-masing dengan 3 derajat kebebasan.

Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Systems & Computer-Integrated Manufacturing

### Sistem *Anthropomorphic* atau sistem artikulasi.

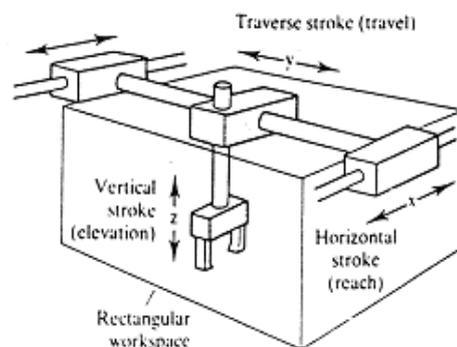
Sistem koordinat robot antropomorfik mempunyai makna yang menunjukkan kesamaan dengan konfigurasi lengan manusia. Jika ditinjau berdasarkan jenis sambungannya maka robot antropo-metrik dapat disebut robot TRR. Volume kerja yang diperoleh mempunyai bentuk ruang yang lebih kompleks menyerupai lingkup kerja lengan/ tangan manusia.



Gambar 5.a. Robot Antropomorphi

### a) Sistem *Cartesian* atau sistem *rectilinear*.

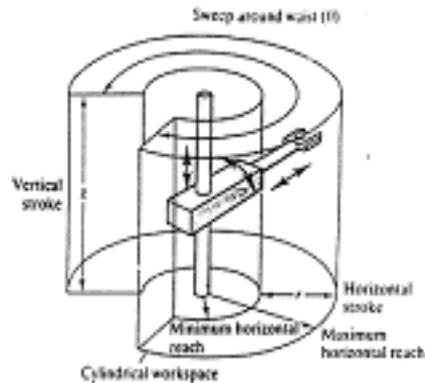
Sistem koordinat robot Cartesian, juga disebut sistem X, Y, Z. Adalah robot yang dibentuk dengan tiga sambungan linear yang independen, oleh karenanya dapat pula disebut robot LLL. Volume kerjanya berbentuk balok persegi panjang.



Gambar 3.b. Robot Cartesian

**b) Sistem Silindrikal.**

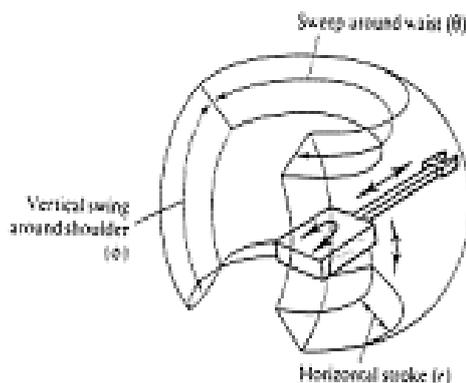
Sistem koordinat robot silinder adalah robot yang mempunyai satu sambungan rotari (R) pada dasar atau badan robot, dan dua buah sambungan linear (L), sehingga dapat disebut robot RLL. Volume kerja yang dimiliki adalah berbentuk silinder.



Gambar 3.c. Robot Silindris.

**c) Sistem Polar atau sistem sferikal.**

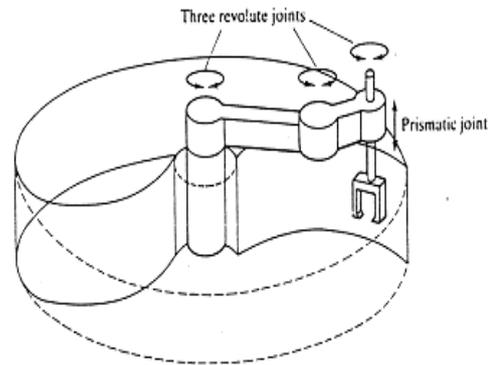
Sistem koordinat robot polar pada umumnya dibentuk oleh lengan yang terhubung dengan badan robot menggunakan *twisting joint* (T) dan sambungan rotari (R), dan/atau diikuti dengan sambungan linear (L). Karena hal tersebut robot ini dinamakan robot TRL. Volume kerjanya berbentuk bola.



Gambar 3.d. Robot Polar

**d) Sistem SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)**

Robot SCARA sebenarnya adalah robot artikulasi horizontal. Menurut McKerrow, nama SCARA tidak berhubungan dengan basis geometri, tetapi diambil dari perilaku yang diinginkan dari sebuah manipulator yang digunakan untuk perakitan, yang mampu mengakomodir kesalahan kecil dari posisi obyek atau komponen dengan komponen lainnya. Jika ditinjau dari jenis sambungan, robot SCARA adalah robot VRL. Volume kerja robot SCARA berbentuk flat silinder tipis.



Gambar 3.e. Robot SCARA

**Jangkauan Robot.**

Suatu robot hanya dapat memanipulasi obyek yang dapat dijangkau. Pada kebanyakan robot industri, posisinya dibuat tetap pada suatu tempat, ruang kerjanya terbatas oleh perpanjangan maksimum dari sambungannya. Komponen-komponen dibawa mendekati robot, kemudian dikirim kembali dengan konveyor atau peralatan pengumpan mekanik. Untuk mengatasi problem yang disebabkan oleh keterbatasan jangkauan lengan robot, diatasi dengan pendekatan: (McKerrow, 1993: 400)

- ❶ *Fixed in place robot*; adalah robot yang dipasang permanen pada lantai *plant* manufaktur dilengkapi dengan *conveyor* atau *mechanical feed devices*, seperti pada *flexible manufacturing cell*.

- ② *Gantry robot*, adalah robot yang dipasang dan dapat bergerak pada *overhead rail* untuk menambah atau melipatkan jangkauan robot.
- ③ *Mobile robot*, adalah robot yang dilengkapi dengan roda untuk dapat bergerak dan melakukan tugas sepanjang lantai pabrik.

### Volume Kerja Robot

Manipulator atau robot industri adalah suatu model hasil peniruan dari lengan manusia. Keseluruhan lengan tersebut dengan amat serasi dapat bergerak, menjangkau menjemput, meraih, dan lain-lain gerak, dengan jarak jangkauan dibatasi oleh lengan itu sendiri. Semua tempat dimana manipulator dapat bergerak untuk meraih, menjemput, menjangkau, dan gerak lainnya adalah sebagai volume kerja atau *work envelopes* dari manipulator. Untuk hal tersebut, robot industri juga dinamakan menurut **jangkauan robot**, atau **volume kerja**, atau **work envelope**-nya..

Pemilihan sistem koordinat robot atau geometri robot, diantaranya adalah menyangkut volume kerja robot, dengan mempertimbangkan; 1) jangkauan robot, 2) cara menghindari tabrakan, dan 3) ke-luasaan gerak dari obyek yang dimanipulasi.

Volume kerja atau work envelope dari ke lima sistem koordinat robot dapat dilihat pada Gambar 4.

### PENUTUP

Dari uraian tersebut diatas dapat diambil beberapa simpulan tentang robot industri sebagai berikut:

- a) Manipulator atau robot industri adalah suatu alat yang dirancang untuk menggantikan tugas manusia dengan gerakan terprogram yang menirukan gerakan tangan manusia.
- b) Pemakaian robot pada industri harus mempertimbangkan beberapa aspek seperti aspek teknis, ekonomi dan sosial serta kondisi dan situasi lingkungan kerja.
- c) Beberapa jenis atau tipe sambungan pada dasarnya adalah untuk membentuk lintasan yang diperlukan, dengan gerakan-gerakan; rotasi, radial, dan vertikal.

- d) Sistem koordinat robot yang populer adalah; artitkulasi, polar, silindris, dan Cartesian, sedangkan sistem koordinat SCARA pada dasarnya adalah sistem koordinat artikulasi horisontal.
- e) Untuk mengatasi problem yang disebabkan oleh keterbatasan jangkauan lengan robot, diatasi dengan pendekatan; robot tetap, robot gantri, dan robot mobil.
- f) Agar pemilihan jenis robot dapat sesuai dengan yang diinginkan, maka pengetahuan tentang sistem koordinat robot terkait dengan volume kerja sangat diperlukan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Fu, K.S., Gonzales R.C., and Lee, C.S.G., *Robotic; Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, New York (1987)
- Groover Mikell P., and Zimmers, Jr. Emory W., *CAD/CAM, Computer Aided Design dan Manufacturing*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1987)
- Kalpakjian, Serope, *Manufacturing Engineering and Technology*, 3<sup>rd</sup> Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts (1995)
- Kartidjo, Muljowidodo, *Motion Control & Automation*, Automation & Robotics Laboratory, Mechanical Engineering Department – ITB, Bandung (1992)
- McKerrow, Phillip John, *Introduction to Robotics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Sidney (1993)
- Sharon D, Hanstein J, and Yantian G., *Robot dan Otomasi industri*, Elex Media Komputindo, PT. Jakarta (1992).
- Singh Nanua, *System Approach to Computer Integrated Design and Manufacturing*, 1<sup>st</sup> Edition, John Willey & Sons, Inc. Toronto (1996)
- Schuler Charles A., and McNamee William L., *Industrial Electronics and Robotics*, International Editions, McGraw-Hill Book Company, San Fransisco (1988)