

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Definisi Robot

Robot berasal dari kata “*robota*” yang dalam bahasa Ceko yang berarti budak, pekerja atau kuli. Pertama kali kata “*robota*” diperkenalkan oleh Karel Capek dalam sebuah pentas sandiwara pada tahun 1921 yang berjudul RUR (Rossum’s Universal Robot)^[2]. Pentas ini mengisahkan mesin yang menyerupai manusia yang dapat bekerja tanpa lelah yang kemudian memberontak dan menguasai manusia. Istilah “*robot*” ini kemudian mulai terkenal dan digunakan untuk menggantikan istilah yang dikenal saat itu yaitu *automation*. Dari berbagai literatur robot dapat didefinisikan sebagai sebuah alat mekanik yang dapat diprogram berdasarkan informasi dari lingkungan (melalui sensor) sehingga dapat melaksanakan beberapa tugas tertentu baik secara otomatis ataupun tidak sesuai program yang di inputkan berdasarkan logika.

2.2 Sejarah dan Perkembangan Robot

Robot pada awalnya diciptakan untuk menggantikan kerja manusia untuk sesuatu yang berulang, membutuhkan ketepatan yang tinggi dan juga untuk menggantikan manusia bila harus berhubungan dengan daerah berbahaya. Penggunaan robot lebih banyak terletak pada industri, misalnya untuk proses *welding* pada industri otomotif. Selain pada industri, penggunaan robot semakin berkembang luas. Sementara itu, pada dunia pendidikan di tingkat universitas telah dilakukan berbagai macam kontes yang memacu para akademisi dan mahasiswa dalam melakukan riset tentang robot. Kedepannya, robot akan semakin berkembang sehingga mampu bergerak dan berpikir seperti manusia berdasarkan logika-logika pemrograman yang diinputkan.

Seiring berkembangnya teknologi, berbagai robot dibuat dengan spesialisasi atau keistimewaan tertentu. Robot dengan keistimewaan tertentu sangat erat kaitannya dengan pemenuhan kebutuhan dalam dunia industri modern, dimana industri modern menuntut adanya suatu alat dengan kemampuan tinggi yang dapat membantu menyelesaikan pekerjaan manusia ataupun menyelesaikan pekerjaan yang tidak mampu diselesaikan manusia. Pemanfaatan teknologi robot mempunyai sisi lain yang

mendatangkan ancaman bagi sebagian orang, karena kehilangan kesempatan kerja. Dari survei yang dilakukan terhadap pemakai robot di Inggris, penghematan tenaga kerja ditulis sebagai faktor terpenting dalam mengambil keputusan untuk mengadopsi robot. Meskipun demikian, walau beberapa pekerjaan dan tugas dihasilkan dengan campur tangan robot, tetapi terdapat kecenderungan untuk tidak menggantikan tenaga manusia seluruhnya. Secara teoritis robot dimasukkan bukan pada faktor produksi yang berupa masukan buruh, melainkan pada masukan modal.

Negara yang paling getol mengadakan penelitian mengenai berbagai macam robot ini adalah Jepang. Hal ini tak lain karena Jepang juga gigih dalam melakukan penelitian teknologi infrastruktur seperti komponen dan piranti mikro (*microdevices*) yang akhirnya bidang ini terbukti sebagai inti dari pengembangan robot modern. Sebenarnya, robot bukanlah 'barang baru' bagi masyarakat Jepang. Robot pertama Jepang sudah diciptakan berabad-abad yang lalu. Tentunya tidak dengan bentuk yang ada saat ini. Mulai dari robot yang bisa menyirami sawah buatan *Kaya no Miko* seperti yang diceritakan dalam koleksi cerita abad ke-12, *Konjaku Monogatari Shu*, hingga boneka robot *karakuri-ningyo* yang dikembangkan dengan tingkat teknologi yang cukup tinggi dan ditampilkan dalam bentuk boneka sebagai hiburan di teater dan dalam festival (hingga sekarang tetap ditampilkan dalam Festival Takayama di Prefektur Gifu).

Pada tahun 1927 muncul robot Jepang yang pertama yang dikembangkan dengan mempergunakan teknologi barat, diberi nama *Gakutensoku*. Robot ini bisa tersenyum, mengedip-ngedipkan mata dan bahkan bisa menulis. Dengan adanya pengembangan robot ini, robot kini bisa menjadi teman, mempunyai kecerdasan, dan perasaan manusia, seperti dalam cerita kartun *Astro Boy*.

Keunggulan dalam teknologi robot tak dapat dipungkiri, telah lama dijadikan ikon kebanggaan negara-negara maju di dunia. Kecanggihan teknologi yang dimiliki, gedung-gedung tinggi yang mencakar langit, tingkat kesejahteraan rakyatnya yang tinggi, kota-kotanya yang modern, belumlah terasa lengkap tanpa popularitas kepriawaian dalam dunia robot. Pada awalnya, aplikasi robot hampir tak dapat dipisahkan dengan industri sehingga muncul istilah *industrial robot* dan robot manipulator. Definisi yang populer ketika itu, robot industri adalah suatu robot tangan

(*arm robot*) yang diciptakan untuk berbagai keperluan dalam meningkatkan produksi, memiliki bentuk lengan-lengan kaku yang terhubung secara seri dan memiliki sendi yang dapat bergerak berputar (rotasi) atau memanjang/memendek (translasi atau prismatic). Satu sisi lengan yang disebut sebagai pangkal ditanam pada bidang atau meja yang statis (tidak bergerak), sedangkan sisi yang lain yang disebut sebagai ujung (*end effector*) dapat dimuati dengan *tool* tertentu sesuai dengan tugas robot. Dalam dunia mekanikal, manipulator ini memiliki dua bagian, yaitu tangan atau lengan (*arm*) dan pergelangan (*wrist*). Pada pergelangan ini dapat diinstall berbagai *tool*. Begitu diminatinya penggunaan manipulator dalam industry, menyebabkan banyak perusahaan besar di dunia menjadikan robot industri sebagai unggulan. Bahkan beberapa perusahaan di Jepang masih menjadikan manipulator sebagai produk utamanya, seperti Fanuc Inc. yang memiliki pabrik utamanya di lereng gunung Fuji.

Dewasa ini mungkin definisi robot industri itu sudah tidak sesuai lagi karena teknologi *mobile robot* juga sudah dipakai meluas sejak awal tahun 1980-an. Seiring itu pula kemudian muncul istilah *humanoid robot* (konstruksi mirip manusia), *animaloid* (mirip binatang), dan sebagainya. Bahkan kini dalam industri spesifik seperti industri perfilman, industri angkasa luar dan industri pertahanan atau mesin perang, *arm robot* atau manipulator bisa jadi hanya menjadi bagian saja sistem robot secara keseluruhan.

2.3 Klasifikasi Umum Robot

Klasifikasi robot belum ada yang baku, tetapi berdasarkan beberapa sumber referensi, robot dapat diklasifikasikan berdasarkan penggunaan aktuator, berdasarkan kebutuhan akan operator robot, dan berdasarkan kegunaannya. Penjelasan lebih detailnya sebagai berikut.

2.3.1 Klasifikasi Robot Berdasarkan Penggunaan Aktuator

Klasifikasi robot berdasarkan penggunaan aktuatornya yaitu manipulator dan *mobile robot*. Penjelasan lebih detail tentang manipulator dan *mobile robot* sebagai berikut.

2.3.1.1 Manipulator

Pada robot industri, manipulator merupakan sebuah rangkaian benda kaku (*rigid bodies*) terbuka yang terdiri atas sendi (*joint*) dan terhubung dengan lengan (*link*)

dimana setiap posisi sendi ditentukan dengan variabel tunggal sehingga jumlah sendi sama dengan nilai derajat kebebasan (*degree of freedom*). Manipulator yang sering dipakai sebagai robot industri pada dasarnya terdiri atas struktur mekanik, penggerak (aktuator), sensor dan sistem kontrol. Dasar (*base*) manipulator sering disebut kerangka dasar (*base frame*) dan ujung dari manipulator biasanya dilengkapi dengan *end effector* yang salah satu jenisnya adalah *gripper*. Untuk lengkapnya, skematik manipulator ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Pada manipulator terdapat sendi (*joint*) yang merupakan tempat sambungan lengan untuk melakukan putaran atau gerakan. Secara umum jenis sendi yang digunakan pada manipulator adalah sendi putar (*revolute joint*). Sendi putar sering digunakan sebagai pinggang (*waist*), bahu (*shoulder*) dan siku (*elbow*), dan pergerakan sendi putar akan menghasilkan satu derajat kebebasan.



Gambar 2.1 Manipulator robot^[3].

Bagian dasar manipulator bisa kaku terpasang pada lantai area kerja ataupun terpasang pada rel. Rel berfungsi sebagai *path* atau alur sehingga memungkinkan robot untuk bergerak dari satu lokasi ke lokasi lainnya dalam satu area kerja. Bagian tambahan merupakan perluasan dari bagian dasar, bisa disebut juga lengan atau *arm*. Bagian ujungnya terpasang pada *end effektor* yang berfungsi untuk mengambil atau mencekam material. Manipulator digerakkan oleh aktuator atau disebut sistem *drive* yang menyebabkan gerakan yang bervariasi dari manipulator.

2.3.1.2 Mobile robot

Mobile robot merupakan sebuah robot yang dapat bergerak dengan leluasa karena memiliki alat gerak untuk berpindah posisi. Secara umum dan mendasar sebuah *mobile robot* dibedakan oleh *locomotion system* atau sistem penggerak. *Locomotion* merupakan gerakan melintasi permukaan datar. Semua ini disesuaikan dengan medan yang akan dilalui dan juga oleh tugas yang diberikan kepada robot. Berikut adalah klasifikasi robot menurut jenis *locomotion*.

a. Robot Beroda (*wheeled car*)

Robot yang seringkali dijumpai adalah robot yang bergerak dengan menggunakan roda. Roda merupakan teknik tertua, paling mudah, dan paling efisien untuk menggerakkan robot melintasi permukaan datar. Roda seringkali dipilih, karena memberikan *traction* yang bagus, mudah diperoleh dan dipakai, dan juga mudah untuk memasangnya pada robot. *Traction* merupakan variabel dari material roda dan permukaan yang dilintasi oleh roda. Material roda yang lebih lembut memiliki koefisien *traction* yang besar, dan koefisien *traction* yang besar ini member gesekan (*friction*) yang besar pula, dan memperbesar daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor. Jumlah roda yang digunakan pada robot beragam, dan dipilih sesuai selera si pembuat robot. Robot dapat dibangun dengan menggunakan berbagai macam roda, misalnya beroda dua, beroda empat, beroda enam, atau beroda caterpillar (*tank-treaded*) yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



(a)



(b)

Gambar 2.2 Robot beroda dua (a) dan robot beroda caterpillar (b)^[4].

b. Robot Berkaki

Robot berkaki sangat mudah beradaptasi dengan medan yang tidak menentu, misalnya untuk menaiki tangga. Semua itu tidak lepas dari penelitian yang dilakukan dengan meniru *gait* dari berbagai makhluk hidup termasuk juga manusia. Ini juga merupakan bagian penting dari riset biologis dan *biorobotika*. Sedangkan untuk melewati medan–medan yang tidak menentu robot berkaki sangat baik dipilih karena robot berkaki lebih mudah beradaptasi bila dibandingkan menggunakan roda seperti untuk menaiki tangga.

Bipedalism adalah sebuah paham dimana organisme bergerak dengan 2 buah tungkai atau alat penggerak (kaki). Binatang atau mesin yang bergerak secara *bipedal* biasa disebut *biped*. *Biped* terdiri dari berjalan, berlari, atau meloncat dengan 2 kaki.



Gambar 2.3 Robot ASIMO^[5].

Riset robot mengenai robot *bipedal* sangat intensif seperti yang dilakukan Honda yang menciptakan ASIMO (*Advance Step in Inovative Mobility*). ASIMO saat ini mempunyai beberapa kemampuan seperti manusia sehingga mampu menggantikan berbagai tugas manusia misalnya menjadi penjaga tamu. Gambar robot ASIMO dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2.3.2 Klasifikasi Robot Berdasarkan Kebutuhan Akan Operator Robot

Klasifikasi robot berdasarkan kebutuhan akan operator robot ada tiga jenis yaitu *Autonomous robot*, *teleoperated robot* dan *semi autonomous*. Penjelasan tentang masing-masing jenis robot tersebut sebagai berikut.

2.3.2.1 *Autonomous Robot*

Robot *Autonomous* adalah robot yang dapat melakukan tugas-tugas yang diinginkan dalam lingkungan yang tidak terstruktur tanpa bimbingan manusia terus menerus berdasarkan logika-logika yang diberikan manusia kepada robot. Banyak jenis robot memiliki beberapa tingkat otonomi. Tingkatan otonomi sangat diinginkan dalam bidang-bidang seperti eksplorasi ruang angkasa, membersihkan lantai, memotong rumput, dan pengolahan air limbah. Salah satu contoh *autonomous robot* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Autonomous robot*^[6].

2.3.2.2 *Teleoperated Robot*

Robot ini dalam pengoperasian mesinnya dikendalikan dari kejauhan. Hal ini mirip dalam arti untuk frase "*remote control*", dikendalikan oleh operator (manusia) dengan menggunakan *remote control*. Pada Gambar 2.5 terlihat *mobile robot* dan alat pengontrolnya.



Gambar 2.5 *Mobile robot dan remote control*^[7].

2.3.2.3 Semi *Autonomous*

Robot semi *autonomous* adalah robot yang pengendaliannya secara otonomi dan pengendalian jarak jauh dengan menggunakan *remote control*. Hal ini bertujuan robot dapat melewati lingkungan atau lintasan yang berbahaya bagi manusia. Pada Gambar 2.6 terlihat *semi autonomous legged robot* atau dikenal dengan “*big dog*” buatan Amerika Serikat yang didesain untuk membantu pekerjaan tentara.



Gambar 2.6 *Semi autonomous legged robot*^[8].

2.3.3 Klasifikasi Robot Berdasarkan Kegunaan

Klasifikasi robot berdasarkan kegunaan ada dua jenis yaitu robot industri (*industrial robot*) dan robot pelayan (*service robot*). Penjelasan jenis robot industri dan *service robot* sebagai berikut.

2.3.3.1 Robot Industri (*Industrial Robot*)

Robot industri merupakan robot yang digunakan di dunia industri. Robot industri ini digunakan untuk otomatisasi proses produksi, misalnya untuk proses pengelasan (*welding*), perakitan dan pengepakan sesuatu barang. Pada Gambar 2.7 adalah robot industri yang digunakan dalam proses pengelasan.



Gambar 2.7 Robot industri^[9].

2.3.3.2 Robot Pelayan (*Service Robot*)

Service robot merupakan robot yang digunakan untuk melayani kebutuhan manusia sehari-hari. Robot ini digunakan untuk membantu pekerjaan yang kotor, berbahaya, berulang-ulang dan termasuk pekerjaan rumah tangga. Robot yang berfungsi dalam pekerjaan rumah tangga dapat dilihat pada Gambar 2.8.



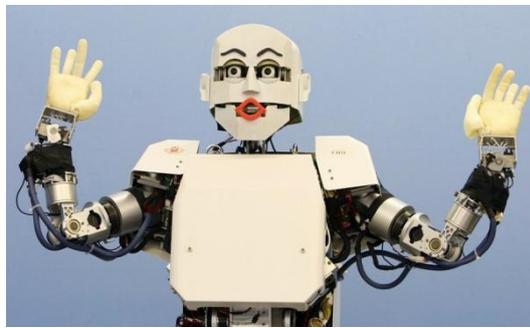
Gambar 2.8 *Service robot*^[10].

2.4 Struktur Umum Robot

Secara umum struktur robot memiliki badan (*body*), lengan (*arm*), pergelangan (*wrist*), ujung (*end effector*), penggerak (*actuator*), sensor, pengendali (*controller*) dan catu daya (*power supply*). Penjelasan lebih detail tentang struktur umum robot sebagai berikut.

2.4.1 Badan (*body*)

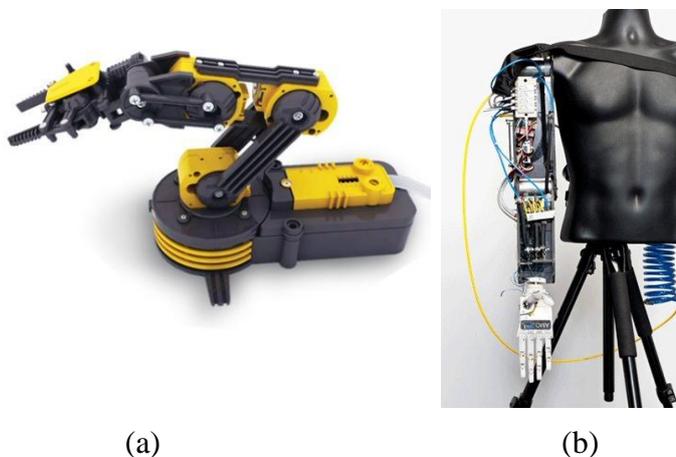
Pada *humanoid robot*, badan robot merupakan komponen robot yang menghubungkan semua bagian anggota tubuh (*limbs*) yaitu lengan, kepala, dan kaki. Gambar 2.9 menunjukkan badan dan *limbs* pada *humanoid robot*.



Gambar 2.9 Badan dan *limbs* *humanoid robot*^[11].

2.4.2 Lengan (*arm*)

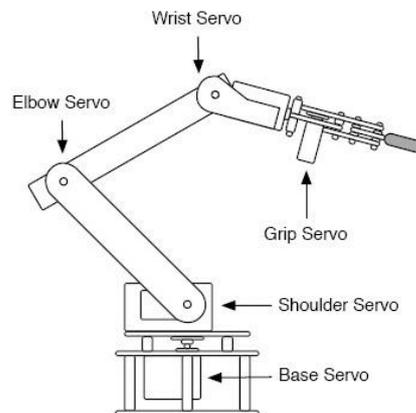
Lengan robot merupakan komponen robot yang memiliki fungsi untuk melakukan pergerakan robot. Gambar 2.10 adalah lengan robot (*arm robot*) dan lengan pada *humanoid robot*.



Gambar 2.10 Lengan robot (a) dan lengan pada *humanoid robot* (b)^[12].

2.4.3 Pergelangan (*wrist*)

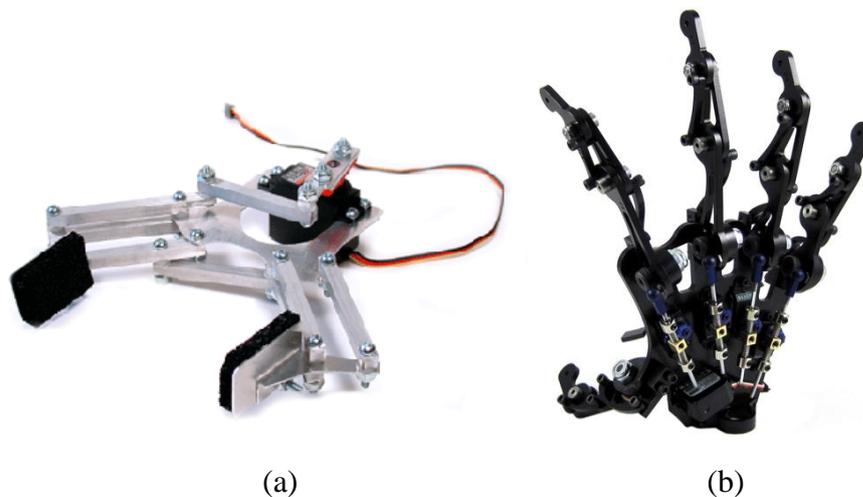
Pergelangan pada robot berfungsi untuk menghubungkan lengan robot dengan *end effector*. Gambar 2.11 menunjukkan pergelangan (*wrist*) pada *arm robot*.



Gambar 2.11 Pergelangan robot^[13].

2.4.4 Ujung (*end effector*)

End effector berfungsi sebagai bagian terakhir yang menghubungkan antara manipulator dengan objek yang akan dijadikan kerja dari robot. *End effector* jika disamakan dengan manusia seperti jari-jari tangan yang dapat digerakkan untuk memindah atau mengangkat material ataupun peralatan yang dapat digunakan untuk mengelas, mengecat, menempa, mengisi botol dan lain-lain sesuai dengan kebutuhan. Bentuk efektor banyak memiliki banyak jenis, salah satunya adalah *gripper*. Gambar 2.12 menunjukkan *end effector* pada *arm robot* dan *humanoid robot*.



Gambar 2.12 *End effector arm robot* (a) dan *end effector humanoid robot* (b)^[14].

2.3.5 Aktuator (*Actuator*)

Aktuator adalah komponen mekanik yang digunakan untuk menghasilkan gerakan pada robot. Sumber gerakan mekanik utama pada robot untuk menggerakkan bagian-bagian tubuh dari robot berupa motor. Aktuator bisa menggunakan elektrik, hidrolis ataupun pneumatik.

Aktuator elektrik adalah aktuator yang menggunakan listrik sebagai tenaga penggerakannya. Beberapa aktuator elektrik yang biasa digunakan antara lain: solenoid, motor DC (*Direct Current*), motor stepper, motor servo, dan motor AC (*Alternating Current*). Pada Gambar 2.13 menunjukkan salah satu aktuator elektrik yaitu solenoid.



Gambar 2.13 Solenoid^[15].

Aktuator hidrolis adalah aktuator yang menggunakan fluida dalam bentuk cairan sebagai pemacu gerakannya. Aktuator ini memiliki torsi yang besar tetapi responya cukup lambat. Prinsip kerja hidrolis menggunakan perbedaan volume cairan yang ditekan atau dimampatkan untuk membangkitkan tekanan pada piston. Pada Gambar 2.14 menunjukkan salah satu aktuator hidrolis.



Gambar 2.14 Aktuator hidrolis^[15].

Aktuator Pneumatik adalah aktuator yang menggunakan udara sebagai pemicu gerakannya. Kelebihan aktuator pneumatik adalah memiliki respon yang lebih cepat. Prinsip kerja pneumatik menggunakan perbedaan volume udara yang ditekan atau dimampatkan untuk membangkitkan tekanan pada piston. Aktuator pneumatik dapat dilihat pada Gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2.15 Aktuator pneumatik^[15].

2.4.6 Sensor

Sensor pada robot umumnya dibuat dengan meniru cara kerja dan fungsi panca indra manusia. Dengan sensor, sebuah robot dapat menerima sebuah rangsangan dari lingkungannya sama seperti halnya manusia menerima rangsangan melalui indranya. Alasannya peniruan ini adalah cita-cita utama dari pembuatan robot itu sendiri dari awalnya, yakni membuat sebuah robot yang meyerupai seorang manusia.

Rangsangan yang diterima oleh sensor robot dari lingkungannya berupa data analog, misalnya suara. Sedangkan robot adalah sebuah perangkat elektromekanis yang tidak dapat mengerti data analog sehingga data analog ini perlu dikonversi terlebih dahulu menjadi data digital. Pengonversian ini dapat dilakukan pada pusat pengolahan data atau langsung pada sensornya. Kelebihan dan kekurangannya adalah jika dilakukan pada pusat pengolahan data maka pemrosesan data memakan waktu lebih lama dan pemrograman menjadi lebih rumit. Sedangkan jika dilakukan pada sensor berarti tiap sensor harus dilengkapi dengan chip untuk konversi, yang ini berarti bertambahnya komponen yang dibutuhkan. Ada banyak sekali jenis sensor yang dapat digunakan pada sebuah robot. Sebaiknya penggunaan sensor ini disesuaikan dengan fungsi dari robot itu

sendiri. Tidak perlu memasang sensor yang tidak dibutuhkan. Gambar 2.16 adalah sensor warna yang berfungsi untuk mendeteksi warna.



Gambar 2.16 Sensor warna^[16].

2.4.7 Pengendali (*controller*)

Kontroler merupakan jantung dari sistem robot sehingga keberadaannya sangat penting. Kontroler menyimpan informasi yang berkaitan dengan data-data robot, dalam hal ini data gerakan robot yang telah diprogram sebelumnya. Gambar 2.12 memberikan gambaran sebuah kontroler dan manipulator robot. Kontroler berfungsi untuk mengontrol pergerakan dan manipulator robot. Kontroler sendiri diatur oleh sebuah informasi atau program yang diisikan dengan menggunakan bahasa pemrograman tertentu. Informasi tersebut kemudian disimpan di dalam memori. Dahulu kontroler dibuat dari drum mekanik yang bekerja *step by step* secara sequential dan sangat sederhana. Dimasa sekarang salah satu jenis kontroler menggunakan PLC (*programmable logic control*) yang dapat bekerja dengan pergerakan yang sangat kompleks dari sistem robot. Pada Gambar 2.17 robot manipulator dan kontrolernya.

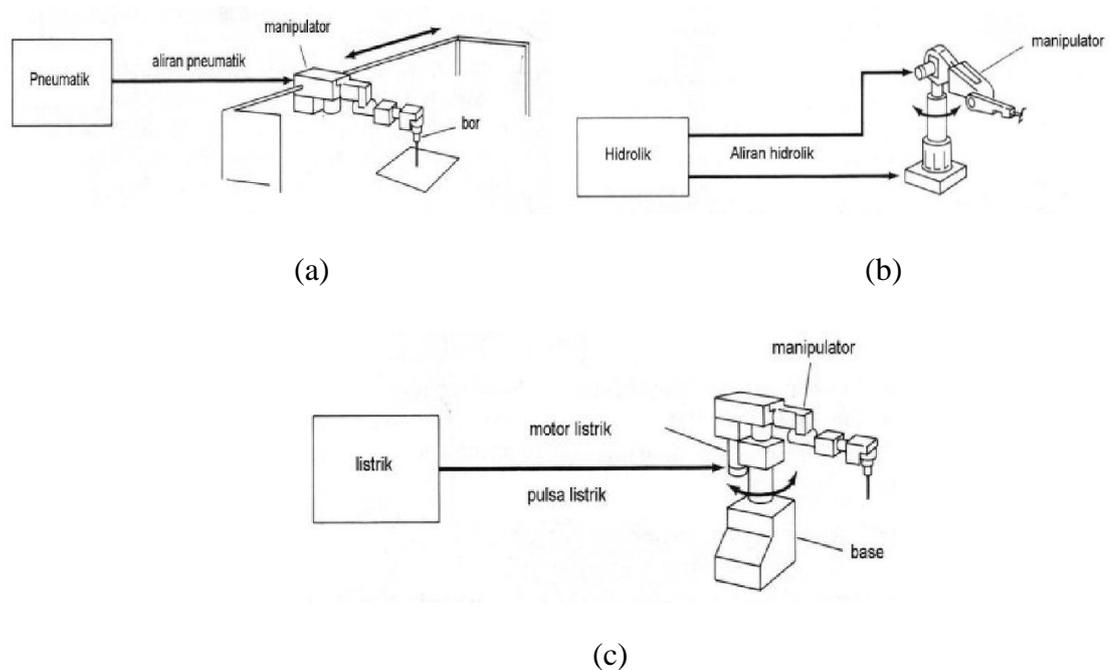
Salah satu jenis kontroler yang banyak digunakan dalam prototipe *arm* robot adalah mikrokontroler arduino uno. Arduino uno merupakan *platform* yang terdiri dari *software* dan *hardware*. Pada umumnya *hardware* arduino sama dengan mikrokontroler. *Software* arduino merupakan *software open source* sehingga dapat di *download* secara gratis. *Software* ini digunakan untuk membuat dan memasukkan program ke dalam arduino.



Gambar 2.17 Robot dan kontroler^[17].

2.4.8 Catu Daya (*Power Supply*)

Power supply adalah sebuah unit yang menyediakan tenaga pada kontroler dan manipulator sehingga dapat bekerja. *Power supply* dalam suatu sistem robot dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian untuk kontroler dan bagian untuk manipulator. Bagian kontroler menggunakan elektrik sedangkan bagian manipulator bisa menggunakan elektrik, pneumatik, hidrolik ataupun ketiganya. Gambar 2.18 menunjukkan jenis *power supply*.



Gambar 2.18 Catu daya pneumatik(a), catu daya hidrolik(b), dan catu daya listrik(c) ^[3].

2.5 Motor Penggerak

2.5.1 Pengertian Motor

Motor adalah sebuah motor listrik bertenaga AC (*Alternating Current*) atau DC (*Direct Current*), yang berperan sebagai bagian pelaksana dari perintah-perintah yang diberikan oleh otak robot. Berdasarkan fungsinya, terdapat beberapa macam motor yang biasa digunakan pada robot, yaitu motor DC untuk aplikasi yang membutuhkan kecepatan tinggi, motor stepper untuk aplikasi dengan akurasi tinggi, dan motor servo untuk gerakan-gerakan berupa gerakan sudut. Pada Gambar 2.19 menunjukkan beberapa jenis motor pada robot.



Gambar 2.19 Jenis-jenis motor pada robot, yaitu Motor AC (a), motor DC (b), motor stepper (c) dan motor servo (d)^[18].

Dalam mengendalikan motor-motor tersebut, otak robot tidak dapat langsung mengakses motor, kecuali motor servo yang sudah memiliki antarmuka. Namun demikian, dengan menggunakan antarmuka *servo controller*, maka proses pengendalian motor servo akan lebih mudah dilakukan

2.5.2 Jenis-Jenis Motor

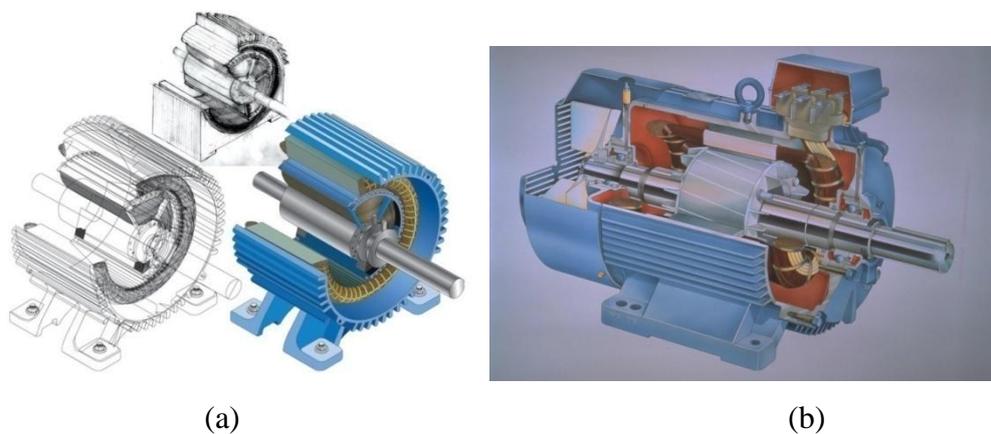
Jenis-jenis motor yang digunakan dalam robotika adalah motor AC (*Alternating Current*) dan motor DC (*Direct Current*). Motor AC terdiri dari *synchronous motor* dan *induction motor*. Sedangkan, motor DC terdiri dari *brushed*, *synchronous*, *brushless*, *uncommutated*, motor stepper dan *servomotor*. Penjelasan tentang jenis-jenis motor lebih detail sebagai berikut.

2.5.2.1 Motor AC (*Alternating Current*)

Terdiri dari 2 bagian dasar, yaitu stator untuk menghasilkan medan magnet berputar dan rotor pada output shaft yang menerima torka dari medan magnet yang berputar. Ada 2 jenis motor AC, yaitu:

- a. *Synchronous motor*, berputar sesuai frekuensi dari sumber listrik AC. Medan magnet pada rotor diciptakan dari arus yang melewati slip ring, atau dari magnet permanen.
- b. *Induction motor*, putarannya lebih lambat dari pada frekuensi sumber listrik AC. Medan magnet pada rotor diciptakan dari arus yang diinduksikan.

Pada gambar 2.20 menunjukkan kerangka dari *Synchronous motor* dan *Induction motor*.



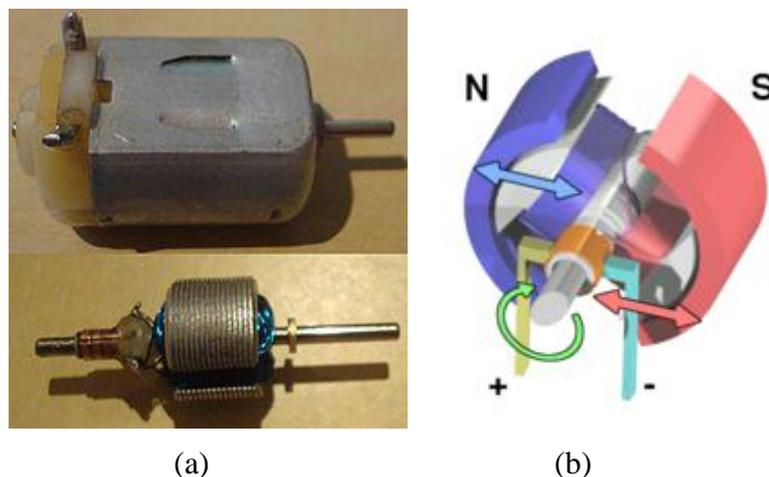
Gambar 2.20 *Synchronous motor* (a) dan *Induction motor* (b) ^[19].

2.5.2.2 Motor DC (*Direct Current*)

Motor DC terdiri dari rotor dan stator juga seperti motor AC, hanya saja motor ini bergerak menggunakan arus DC. Motor ini adalah motor yang paling sederhana untuk pengaktifannya. Hanya dengan memberikan tegangan DC, motor ini akan berputar secara kontinu. Membalik arah putaran motor dapat dilakukan dengan mengubah polaritas arus yang mengalir pada motor. Motor DC biasanya mempunyai kecepatan putar yang cukup tinggi dan sangat cocok untuk roda robot yang membutuhkan kecepatan gerak yang tinggi. Juga dapat digunakan pada baling-baling robot pemadam api. Kendali motor ini membutuhkan rangkaian *half bridge*. Rangkaian ini akan membuat arus mengalir pada motor melalui 2 kutubnya secara bergantian sesuai arah yang diinginkan. Jenis-jenis motor DC antara lain:

a. *Brushed*

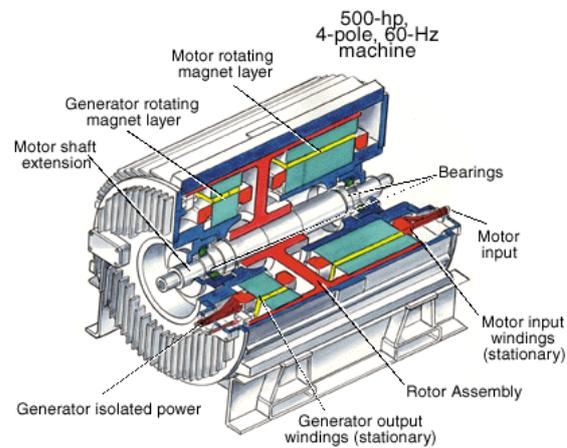
Membentuk torka langsung dari listrik DC yang terhubung ke motor dengan menggunakan *internal commutation*, magnet permanen stasioner, dan magnet elektrik berputar. Bekerja dengan prinsip Lorentz, yaitu jika konduktor penghantar arus ditempatkan di medan magnet eksternal akan mengalami torka atau gaya yang dikenal sebagai gaya Lorentz. Gambar 2.21 terlihat *Brushed motor DC* dan sistem rotasinya.



Gambar 2.21 *Brushed motor DC* (a) dan *DC motor rotation* (b) ^[20].

b. *Synchronous*

Memerlukan *commutation* eksternal untuk menciptakan torka. Kontruksi *synchronous motor* dapat dilihat pada Gambar 2.22 di bawah ini.



Gambar 2.22 Kontruksi *synchronous motor*^[21].

c. *Brushless*

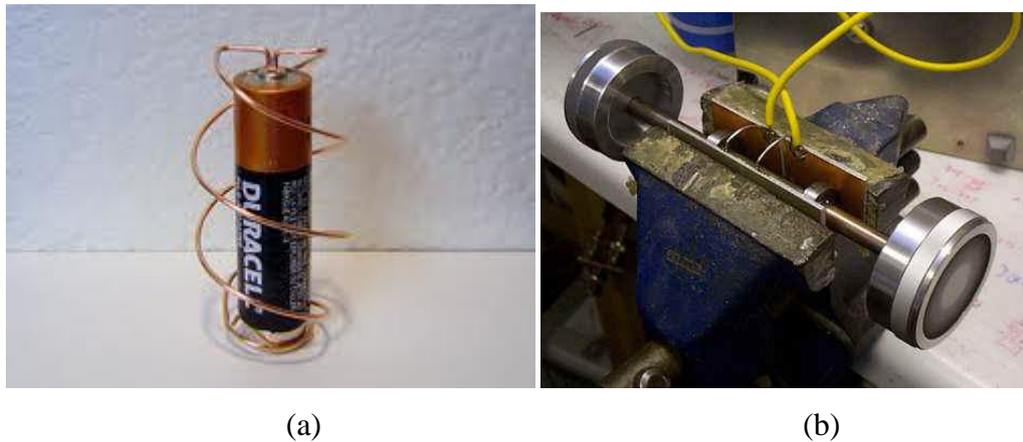
Menggunakan magnet permanen berputar dalam rotor, dan magnet listrik stasioner pada housing motor. Desain ini lebih simple dari pada motor brushed karena mengeliminasi komplikasi dari pemindahan power dari luar motor ke rotor yang berputar. Gambar 2.23 terlihat kumparan dari *brushless motor*.



Gambar 2.23 *Brushless motor*^[22].

d. *Uncommutated*

Motor DC tipe lain yang tidak membutuhkan *commutation*. Pada gambar 2.24 adalah contoh *uncommutated motor*, yaitu *homopolar motor* dan *ball bearing motor*.



Gambar 2.24 *homopolar motor* (a) dan *ball bearing motor* (b)^[23].

e. Motor Stepper

Pada dasarnya ada 2 jenis motor stepper, yaitu *bipolar* dan *unipolar*. Sebuah motor stepper berputar 1 step apabila terjadi perubahan arus pada koilnya yang mengubah pole magnetik di sekitar pole stator. Motor stepper dapat dilihat pada Gambar 2.25 di bawah ini.



Gambar 2.25 Motor stepper^[24].

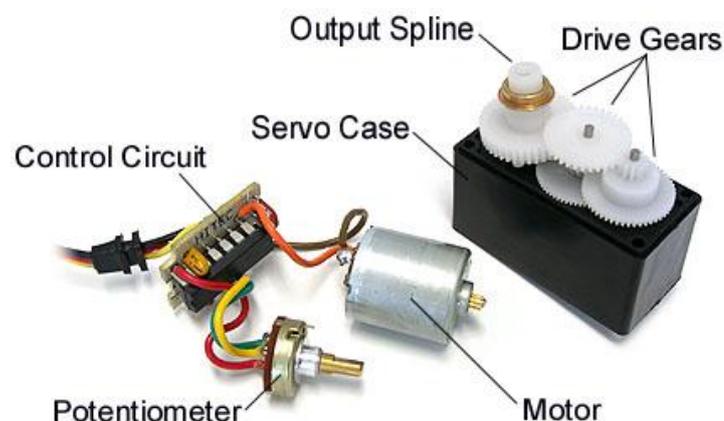
f. Motor Servo (*Servomotor*)

Servomotor adalah sebuah motor dengan sistem *closed feedback* di mana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam *servomotor*. Motor ini terdiri dari sebuah motor, serangkaian *gear*, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi untuk menentukan batas sudut dari putaran servo. Sedangkan sudut dari sumbu motor servo diatur berdasarkan lebar pulsa yang

dikirim melalui kaki sinyal dari kabel motor. Tampak pada gambar dengan pulsa 1,5 ms pada periode selebar 2 ms maka sudut dari sumbu motor akan berada pada posisi tengah. Semakin lebar pulsa OFF maka akan semakin besar gerakan sumbu ke arah jarum jam dan semakin kecil pulsa OFF maka akan semakin besar gerakan sumbu ke arah yang berlawanan dengan jarum jam.

Servomotor biasanya hanya bergerak mencapai sudut tertentu saja dan tidak kontinyu seperti motor DC maupun motor stepper. Walau demikian, untuk beberapa keperluan tertentu, *Servomotor* dapat dimodifikasi agar bergerak kontinyu. Pada robot, motor ini sering digunakan untuk bagian kaki, lengan atau bagian-bagian lain yang mempunyai gerakan terbatas. *Servomotor* adalah motor yang mampu bekerja dua arah, yaitu searah jarum jam/ *clockwise* (CW) dan berlawanan arah jarum jam/ *counterclockwise* (CCW) dimana arah dan sudut pergerakan rotornya dapat dikendalikan hanya dengan memberikan pengaturan *duty cycle* sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) pada bagian pin kontrolnya. *Servomotor* merupakan sebuah motor DC yang memiliki rangkaian kontrol elektronik dan *internal gear* untuk mengendalikan pergerakan dan sudut angularnya. Sistem mekanik pada *servomotor* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26 memiliki :

- a. 3 jalur kabel : *power*, *ground*, dan *control*
- b. Sinyal kontrol mengendalikan posisi
- c. Operasional dari *servomotor* dikendalikan oleh sebuah pulsa selebar ± 20 ms, dimana lebar pulsa antara 0,5 ms dan 2 ms menyatakan akhir dari range sudut maksimum.
- d. Konstruksi didalamnya meliputi internal gear, potensiometer, dan *feedback control*.



Gambar 2.26 Sistem mekanik *servomotor*^[25].

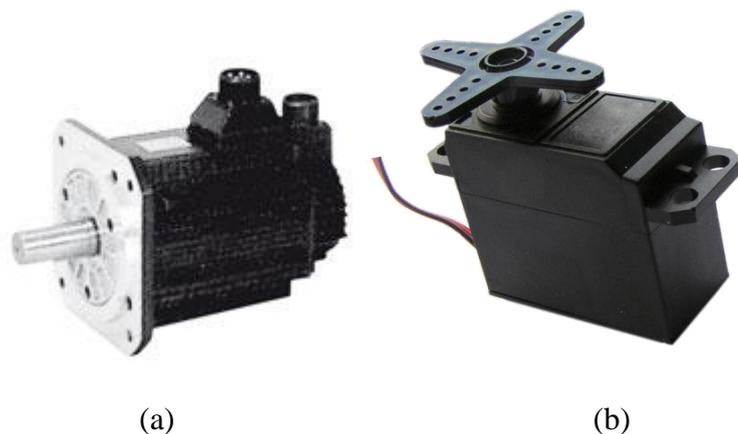
Jenis-jenis servomotor diantaranya adalah sebagai berikut:

a. *Servomotor Standar 180°*

Servomotor jenis ini hanya mampu bergerak dua arah (CW dan CCW) dengan defleksi masing-masing sudut mencapai 90° sehingga total defleksi sudut dari kanan – tengah – kiri adalah 180° . Terlihat pada Gambar 2.27 (a) merupakan motor servo standar.

b. *Servomotor Continuous*

Servomotor jenis ini mampu bergerak dua arah (CW dan CCW) tanpa batasan defleksi sudut putar (dapat berputar secara kontinyu). Pada Gambar 2.27 (b) menunjukkan *servomotor continuous*.

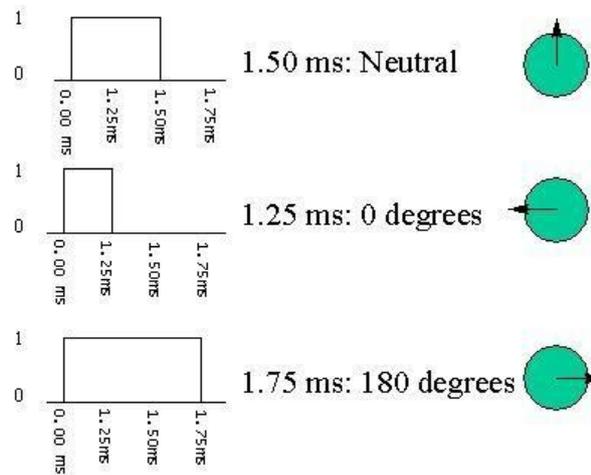


Gambar 2.27 Motor servo standar (a) dan *servomotor continuous* (b)^[25].

2.5.3 Cara Pengendalian *Servomotor*

Kabel kontrol digunakan untuk mengatur sudut posisi dari batang output. Sudut posisi ditentukan oleh durasi pulsa yang diberikan oleh kabel kontrol. *Servomotor* digerakkan dengan menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM). *Servomotor* akan mengecek pulsa setiap 20 milisecond (0,2 detik). Panjang pulsa akan menentukan seberapa jauh motor akan berputar. Contohnya, pada pulsa 1,5 milisecond akan membuat motor berputar sejauh 90° (lebih sering disebut posisi netral). Jika pulsa lebih pendek dari 1,5 milisecond, maka motor akan berputar lebih dekat ke 0° . Jika lebih

panjang dari 1,5ms, maka akan berputar mendekati 180°. Dari Gambar 2.28 di bawah, durasi pulsa menentukan sudut dari batang output.



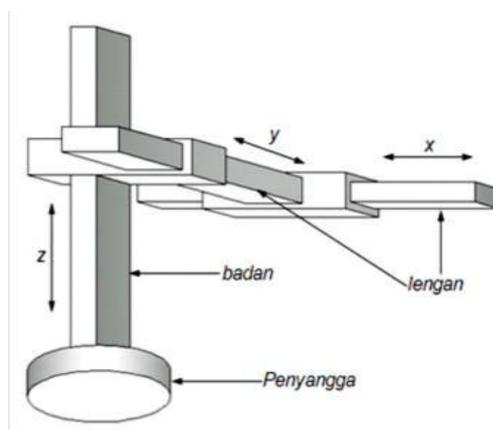
Gambar 2.28 Pergerakan *servomotor* ^[25].

2.6 Konfigurasi Robot

Konfigurasi robot adalah pola susunan *link* dan *joint* yang menghasilkan karakteristik gerakan tertentu. Secara umum konfigurasi robot dibagi menjadi beberapa jenis tergantung pada *joint* yang digunakan, antara lain:

2.6.1 Konfigurasi Kartesian

Struktur Robot ini terdiri dari tiga sumbu linier (*prismatic*). Masing-masing sumbu dapat bergerak ke arah sumbu x-y-z. Keuntungan robot ini adalah pengontrolan posisi yang mudah dan mempunyai struktur yang lebih kokoh.

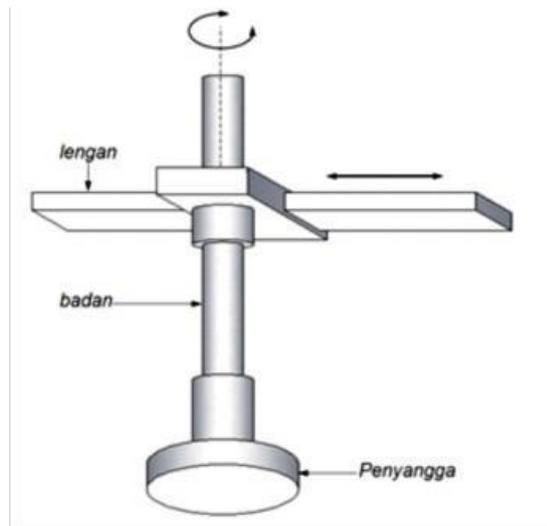


Gambar 2.29 Konfigurasi cartesian ^[26].

Pada Gambar 2.29 memperlihatkan manipulator berkonfigurasi kartesian dimana secara relatif adalah yang paling kokoh untuk tugas mengangkat beban yang berat. Struktur ini banyak dipakai secara permanen pada instalasi pabrik baik untuk mengangkat dan memindah barang-barang produksi maupun untuk mengangkat peralatan-peralatan berat pabrik ketika melakukan kegiatan instalasi.

2.6.2 Konfigurasi Silindris

Struktur dasar dari robot silindris adalah terdiri dari *horizontal arm* dan *vertical arm* yang dapat berputar pada dasar landasannya, dan dapat dilihat pada Gambar 2.30. Jika dibandingkan dengan robot kartesian, robot silindris mempunyai kecepatan gerak lebih tinggi dari *end effector*-nya, tapi kecepatan tersebut tergantung momen inersia dari beban yang dibawanya.

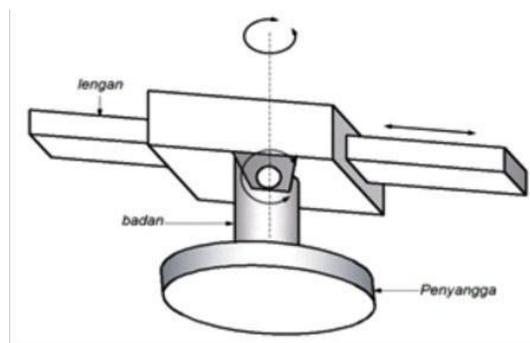


Gambar 2.30 Konfigurasi silinder^[26].

Konfigurasi silinder mempunyai kemampuan jangkauan berbentuk ruang silinder yang lebih baik, meskipun sudut ujung lengan terhadap garis penyangga tetap. Konfigurasi ini banyak diadopsi untuk sistem gantry atau crane karena strukturnya yang kokoh untuk tugas mengangkat beban.

2.6.3 Konfigurasi *Spheris/Polar*

Konfigurasi struktur robot ini mirip dengan sebuah tank dimana terdiri atas *rotary base*, *elevated pivot*, dan *telescopic*. Keuntungan dari robot jenis ini adalah fleksibilitas mekanik yang lebih baik.

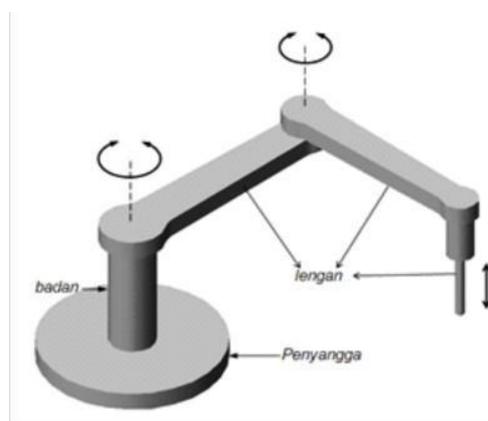


Gambar 2.31 Konfigurasi Polar^[26].

Pada Gambar 31 terlihat konfigurasi polar dimana badan dapat berputar ke kiri atau kanan. Sendi pada badan dapat mengangkat atau menurunkan pangkal lengan secara polar. Lengan ujung dapat digerakkan maju-mundur secara translasi

2.6.4 Konfigurasi SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*)

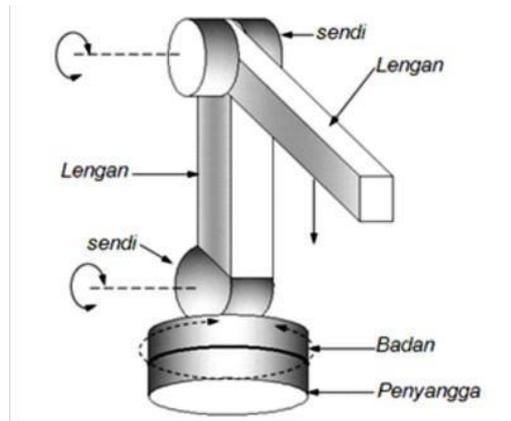
Robot *assembly* bisa didesain menurut koordinat kartesian, silindris maupun spheris. Pada beberapa aplikasi hanya membutuhkan sumbu gerak vertikal, misalnya robot *assembly* yang memasang komponen pada PCB. Robot ini mempunyai lengan dengan dua artikulasi, sedangkan *wrist* mempunyai gerakan *linier* dan *rolling*. Struktur robot *assembly* dapat dilihat pada Gambar 32.



Gambar 2.32 Struktur robot SCARA^[26].

2.6.5 Konfigurasi Sendi Lengan

Robot ini terdiri dari tiga lengan yang dihubungkan dengan dua *revolute joint*. *elbow joint* menghubungkan *force arm* dengan *upper arm*. *Shoulder joint* menghubungkan *upper arm* dengan *base*. Struktur robot artikulasi ini dapat dilihat pada gambar 2.33.



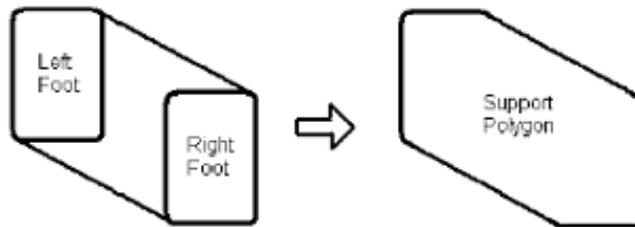
Gambar 2.33 Konfigurasi *joint arm*^[26].

Konfigurasi ini yang paling populer untuk melaksanakan fungsi layaknya pekerja pabrik seperti mengangkat barang, mengelas, memasang komponen mur dan baut, dan sebagainya. Struktur lengan-sendil cocok digunakan untuk menjangkau daerah kerja yang sempit dengan sudut jangkauan yang beragam.

2.7 Dasar Teori *Humanoid Robot*

Humanoid robot dapat didefinisikan sebagai sebuah perangkat cerdas mekanik atau virtual yang memiliki bentuk dan sejumlah karakteristik menyerupai manusia baik secara keseluruhan struktur maupun pergerakan dan dapat melakukan tugas secara otomatis atau dengan bimbingan. Faktor penting dalam merancang *humanoid robot* adalah faktor keseimbangan. Secara sederhana kestabilan dapat dicapai dengan menyeimbangkan (membuat jadi nol) semua gaya - gaya yang bekerja. Titik pada posisi jumlah semua gaya - gaya yang bekerja menjadi nol disebut titik keseimbangan atau *center of gravity*. Keseimbangan dicapai dengan merancang postur stabil dari setiap gerakan *humanoid robot*. Kestabilan robot paling banyak dipengaruhi oleh bagian kaki. Salah satu teknik yang baik untuk membuat robot seimbang ketika berjalan adalah

teknik *support polygon*. *Support polygon* adalah daerah berbentuk segi banyak yang merupakan daerah di antara kedua kaki dengan bantuan garis lurus yang ditarik dari siku luar masing-masing kaki. Prinsip dari teknik ini adalah menempatkan proyeksi vertikal dari titik keseimbangan dari *humanoid robot* untuk selalu berada di dalam *support polygon* ditunjukkan pada Gambar 2.34.



Gambar 2.34 *Support polygon*^[27].

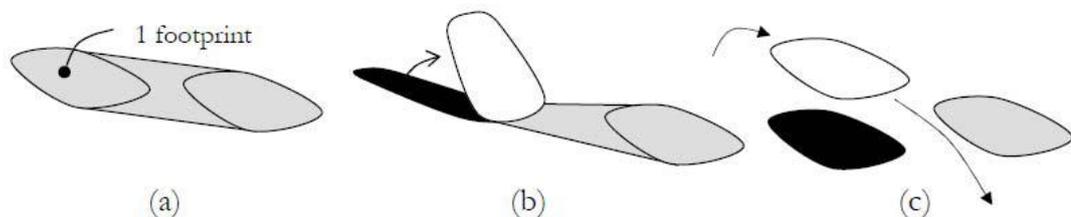
Terdapat 2 macam *support polygon* yang dapat terbentuk pada *humanoid robot*, yaitu:

a. *Double Support Polygon*

Double support polygon adalah kondisi pada saat robot bertumpu pada kedua kakinya tetapi tidak harus kedua permukaannya menempel penuh pada dasar. Gambaran *double support polygon* ini dapat dilihat pada Gambar 2.35 (a) dan (b).

b. *Single Support Polygon*

Single Support Polygon adalah kondisi pada saat robot hanya bertumpu pada salah satu telapak kaki seperti pada Gambar 2.35 (c).

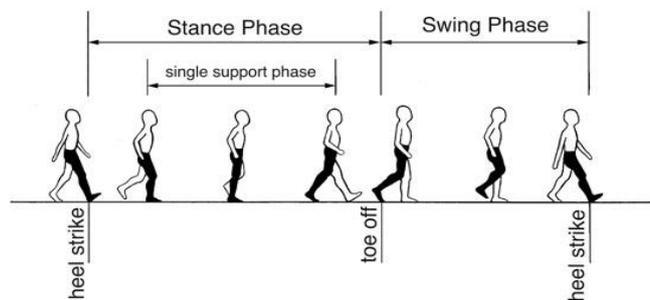


Gambar 2.35 *Support Polygon* dengan Warna Abu-abu : (a) *Double Support Polygon*, (b) *Double Support Polygon (Pre-Swing)*, (c) *Single Support Polygon*^[27].

2.7.1 Gait dua kaki (*Bipedal*)

Humanoid robot pada umumnya memiliki dua kaki, sehingga *humanoid robot* juga disebut dengan istilah *biped robot* yaitu robot yang memiliki dua kaki. Gait pada robot *bipedal* mengikuti gait pada manusia. Karena itu sendi-sendi yang terdapat pada robot ini pun mengikuti sendi manusia. Berikut ini adalah gait manusia dalam berjalan (*walking*).

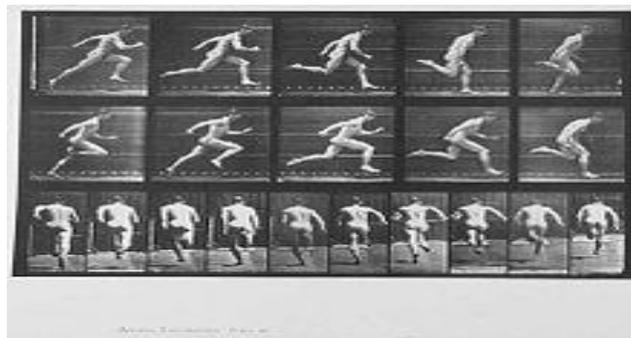
a. Berjalan (*walking*)



Gambar 2.36 Gait manusia berjalan^[28].

Gait normal dibagi menjadi tahap berdiri (*stance*) diperkirakan (60%) dan tahap berjalan (*swing*) sebesar (40%). *Stance* adalah pada saat kaki berada di tanah seperti tampak pada Gambar 2.36. *Swing* adalah pada saat kaki melangkah di udara untuk persiapan ke tahap *stance* selanjutnya. Dengan mengurangi panjang dan kecepatan melangkah memungkinkan untuk menambah stabilitas *bipedal*.

b. Berlari (*running*)



Gambar 2.37 Gait Berlari Manusia^[28].

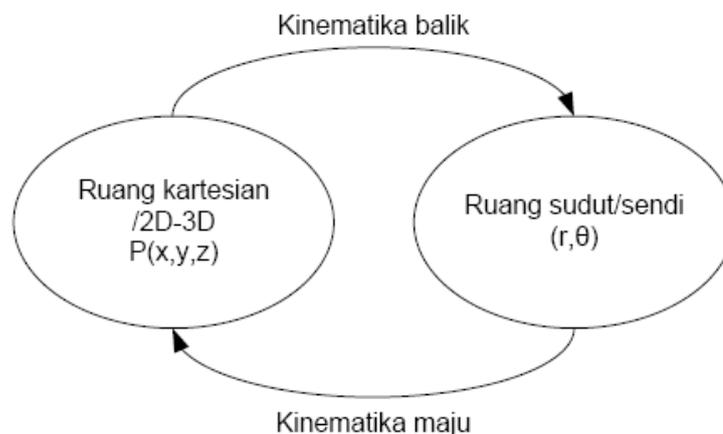
Berlari adalah gerakan yang dilakukan oleh manusia untuk bergerak lebih cepat dengan menggunakan kaki, seperti yang terlihat pada Gambar 3.37. Berlari dapat dikatakan dalam istilah olahraga, dimana kedua kaki tidak menyentuh tanah pada saat yang bersamaan. Ini sangat kontras terhadap berjalan dimana satu kaki selalu kontak dengan tanah.

2.7.2 Pemodelan Kinematik

Kinematika robot adalah studi analitis pergerakan kaki atau lengan robot terhadap sistem kerangka koordinat acuan yang diam/bergerak tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Model kinematika merepresentasikan hubungan *end effector* dalam ruang tiga dimensi dengan variabel sendi dalam ruang sendi. Persamaan kinematika maju mendeskripsikan posisi dan orientasi *end effector* yang dinyatakan dalam posisi sendi. Sedangkan persamaan kinematika balik mendeskripsikan konfigurasi posisi sendi untuk menghasilkan posisi dan orientasi *end effector* tertentu.

2.7.2.1 Konsep Kinematik

Kinematika dalam robotik adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematik geometri dari suatu struktur robot. Dari persamaan kinematika dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu obyek.



Gambar 2.38 Transformasi kinematika maju dan kinematika balik^[29].

Dari Gambar 2.38 dapat diperoleh informasi:

1. Jika jari-jari r dan θ dari suatu struktur robot n -DoF diketahui, maka posisi yang selanjutnya dinyatakan dengan $P(x,y,z)$ dapat dihitung. Jika θ merupakan sebuah fungsi berdasarkan waktu $\theta(t)$, maka posisi dan orientasi $P(t)$ dapat dihitung juga secara pasti. Transformasi koordinat ini dikenal sebagai kinematika maju (*forward kinematics*).
2. Jika posisi dan orientasi $P(t)$ diketahui, maka $\theta(t)$ tidak langsung dapat dihitung tanpa mendefinisikan berapa DoF struktur robot itu. Jumlah sendi n dari n -DoF yang dapat dibuat untuk melaksanakan tugas sesuai dengan posisi dan orientasi $P(t)$ itu dapat bernilai $n=(m,m+1, m+2, \dots, m+p)$ dimana m adalah jumlah sendi minimum dan p adalah jumlah sendi yang dapat ditambahkan. Transformasi ini dikenal sebagai kinematika balik (*invers kinematics*).

2.7.2.2 Denavit-Hartenberg (DH) Parameter

Denavit dan Hartenberg memperkenalkan pendekatan sistematis dan pendekatan umum menggunakan matriks aljabar untuk menyatakan dan menunjukkan geometri spasial pada *link* pada lengan robot dengan frame yang tetap. DH parameter ini menggunakan matriks *homogeneous transformation* 4×4 untuk menyatakan hubungan spasial antara dua *link* yang berhubungan serta menyederhanakan masalah *forward kinematics* pada matriks transformasi *homogeneous* yang berhubungan dengan penempatan spasial dari *frame* koordinat lengan terhadap *frame* koordinat referensi. Matriks transformasi *homogeneous* juga berguna untuk mencari turunan dari persamaan dinamik gerakan lengan robot.

Sehubungan dengan kinematik robotik, yang pertama perlu mendapatkan perhatian adalah matriks rotasi dan matrik transformasi. Matriks rotasi adalah matriks yang memetakan sebuah vektor atau posisi pada satu system koordinat ke sistem koordinat yang lain dalam gerakan rotasi. Matrik rotasi diberi notasi R , apabila berputar terhadap sumbu x diberi notasi R_x , apabila berputar terhadap sumbu y diberi notasi R_y dan apabila berputar terhadap sumbu z diberi notasi R_z . Matrik rotasi dengan sudut theta (θ) dapat ditentukan dengan matrik 3×3 berikut ini:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

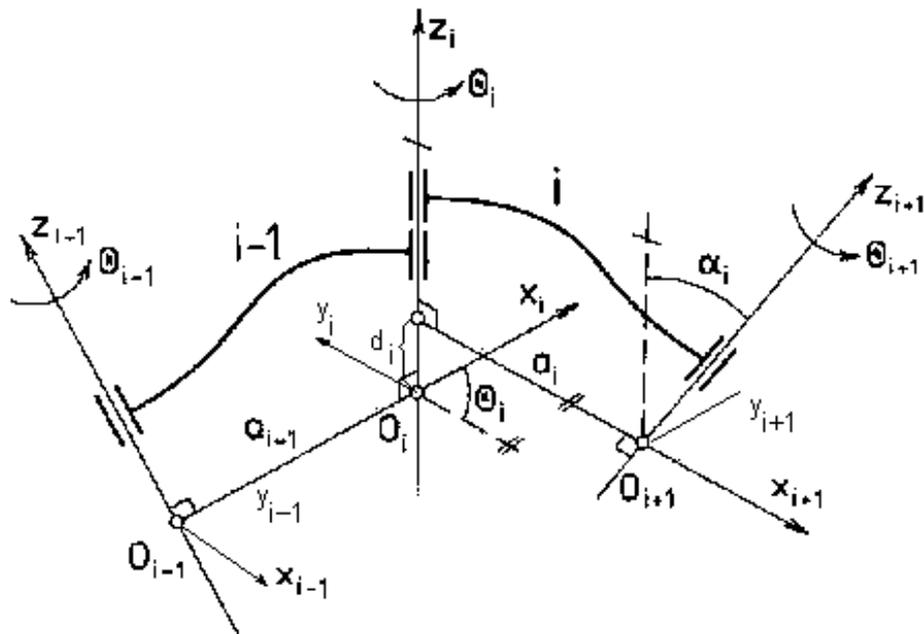
Matriks transformasi adalah matriks yang memetakan sebuah vektor atau posisi pada satu sistem koordinat ke sistem koordinat yang lain dengan memperhatikan rotasi, translasi, penskalaan dan perspektif / sudut pandang. Untuk menyelesaikan permasalahan kinematik, harus mempunyai pengetahuan dasar mengenai matrik transformasi *homogenous*. Penyelesaian permasalahan kinematik dari suatu sistem dapat diselesaikan dengan menggunakan konvensi parameter Denavit-Hartenberg. Konvensi ini dapat dijelaskan dengan beberapa langkah. Langkah pertama adalah menentukan lokasi sendi dengan menamakan sumbu sendi $Z_0 \dots Z_{n-1}$ dengan n = jumlah sendi, serta menyesuaikan sumbu X_0 dan Y_0 seperti yang diberikan pada Gambar 2.39.



Gambar 2.39 Koordinat sumbu sendi^[29].

Selanjutnya pada langkah kedua, menentukan lokasi titik asal O_i pada perpotongan Z_{i-1} dengan keadaan bidang normal ke Z_{i-1} dan Z_i seperti yang diberikan pada Gambar 2.40. Jika Z_{i-1} adalah paralel dan sendi i adalah sendi putar (*revolute*), yang diilustrasikan dalam bentuk tabung, maka tentukan O_i sehingga $d_i = 0$. Namun jika sendi i adalah sendi translasi (*prismatic*), yang diilustrasikan dalam bentuk kubus, maka tentukan O_i pada posisi referensi dari sendi $i - 1$.

Kemudian dengan tetap mengacu pada Gambar 2.40 pada langkah ketiga, adalah menentukan sumbu X_i yang mempunyai garis normal terhadap sumbu Z_i dan Z_{i-1} yang mempunyai arah terhadap sendi i ke sendi $i + 1$. Langkah keempat, menentukan Y_i dengan kaidah tangan kanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.39 sebelumnya.

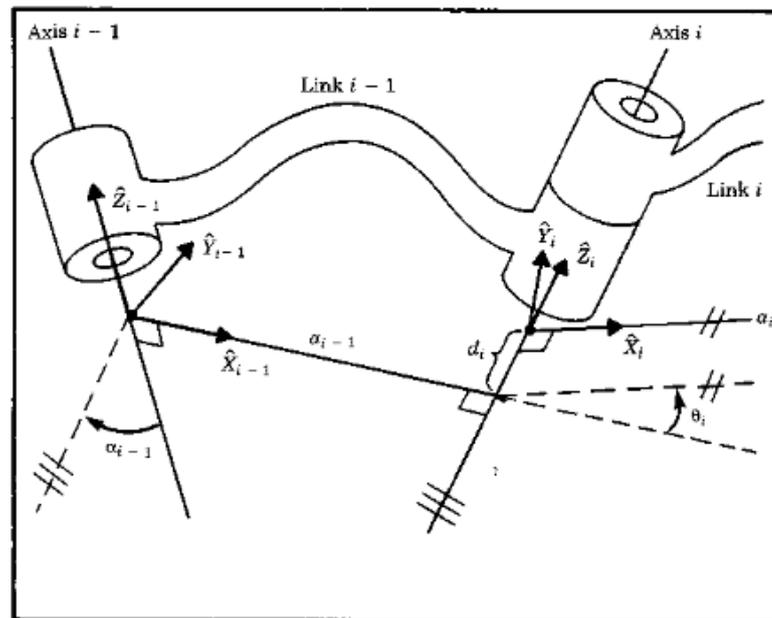


Gambar 3.40 Transformasi *link* konvensi parameter Denavit-Hartenberg^[29].

Langkah kelima, menentukan tabel dari parameter lengan a_i , d_i , α_i dan θ_i , dimana a_i menyatakan jarak sepanjang X_i dari O_i ke perpotongan O_{i+1} , sedangkan d_i menyatakan jarak sepanjang Z_{i-1} dari O_{i-1} ke perpotongan O_i dan d_i merupakan variabel jika sendinya translasi (*prismatic*). Selanjutnya α_i menyatakan sudut antara Z_{i-1} dan Z_i terhadap sumbu X_i yang nilainya positif jika rotasi berlawanan arah jarum jam. Untuk θ_i menyatakan sudut antara X_{i-1} dan X_i terhadap sumbu Z_{i-1} yang nilainya positif jika berlawanan arah jarum jam dan juga parameter θ_i merupakan variabel jika sendinya putar (*revolute*). Langkah keenam, dilakukan dengan cara mensubstitusikan parameter a_i , d_i , α_i dan θ_i ke dalam persamaan matrik transformasi *homogeneous* A_i^{i-1} seperti yang diberikan pada Persamaan (2.1). Selanjutnya, dilakukan perkalian seluruh matrik transformasi *homogeneous* A_i^{i-1} sehingga membentuk persamaan kinematika maju (*forward*

kinematics) ${}^{i-1}T_i = A_1^0 \dots A_n^{n-1}$, yang memberikan posisi dan orientasi dari kerangka ujung terhadap kerangka dasar.

Untuk mengilustrasikan dua buah *link* yang terhubung secara serial ditunjukkan pada Gambar 2.41 di bawah ini.



Gambar 2.41 Notasi *Denavit-Hartenberg*^[30].

Dalam hal ini notasi Denavit-Hartenberg (DH) parameter menggunakan 4 buah parameter, yaitu a_i , d_i , α_i dan θ_i . Untuk robot n -DoF maka keempat parameter tersebut ditentukan hingga yang ke- i . Penjelasannya sebagai berikut:

- θ_i adalah sudut putaran antara sumbu x_i ke x_{i+1} terhadap sumbu z_i
- α_i adalah sudut putaran antara sumbu z_i ke z_{i+1} terhadap sumbu x_i
- d_i adalah jarak dari sumbu x_{i-1} ke x_i terhadap sumbu z_i
- a_i adalah jarak dari sumbu z_i ke z_{i+1} terhadap sumbu x_i

Dari Gambar 2.41 dapat didefinisikan suatu matrik transformasi *homogeneous* yang mengandung unsur rotasi dan translasi, seperti dituliskan pada persamaan berikut:

$${}^{i-1}T_i = R(z, \theta_i)T_{\text{rans}}(0,0,d_i)T_{\text{rans}}(a_i,0,0)R(x,\alpha_i) \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_i & -\sin a_i & 0 \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Untuk *link* dengan konfigurasi sendi putaran, matrik transformasi T pada sendi ke-*i* adalah seperti yang terlihat pada persamaan di bawah ini.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos a_{i-1} & \cos \theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -d_i \sin a_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin a_{i-1} & \cos \theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Untuk robot manipulator yang memiliki *i*-sendi, hubungan rotasi dan translasi antara *end effector* terhadap koordinat dasar dinyatakan dalam matrik *link* 0T_i yang ditentukan dengan menggunakan aturan perkalian rantai matrik transformasi homogen seperti yang terlihat pada persamaan berikut ini:

$${}^0T_i = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{i-1}T_i \quad (2.6)$$

Persamaan kinematika maju yang menyatakan posisi dan orientasi *end effector* terhadap posisi sendi ditentukan dengan mendekomposisi matrik *link* 0T_i untuk menghasilkan vektor posisi *end effector* 0P_i dan matrik orientasi *end effector* 0R_i seperti yang terlihat pada persamaan (2.4) berikut ini.

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.7.3 Persamaan Dinamik *Humanoid Robot*

Dalam menganalisa pergerakan dinamik pada *humanoid robot* menggunakan persamaan *Lagrangian* yang merupakan selisih dari energi kinetik dan energi potensial. Penurunan model *Lagrangian* dimulai dengan memperkenalkan prinsip-prinsip dalam menghitung torsi yang bekerja pada aktuator *humanoid robot* dengan menggunakan pertimbangan energi. Dengan menggunakan penurunan kinematik, koordinat sudut *servomotor* dan posisi yang dibutuhkan dapat diketahui. Dengan posisi dan kecepatan yang diketahui, energi-energi yang bekerja pada *joint robot* dapat ditentukan.

Persamaan *Lagrangian* didasarkan dengan pertimbangan pada energi kinetik (EK) dan energi potensial (EP) dalam sistem mekanisnya. Sebuah sistem mekanis dengan n derajat kebebasan dapat digambarkan dengan n koordinat umum, dilambangkan $q_1 \dots q_n$. Ketika sistem tersebut bergerak dari waktu A ke waktu B, prinsip *Hamilton's* menyatakan bahwa perbedaan energi kinetik dan energi potensial adalah minimal. Ini berarti bahwa integral berikut ini memiliki nilai yang penting, dimana I adalah minimal.

$$I(q, \dot{q}) = \int_A^B L(t, q, \dot{q}) dt \quad (2.8)$$

dimana I adalah fungsi yang didefinisikan pada suatu kurva dengan nilai sebenarnya. $L = \text{EK} - \text{EP}$ disebut *Lagrangian*, t adalah waktu, dan q adalah koordinat umum.

Kondisi yang diperlukan untuk integral untuk menjadi minimal disebut dengan persamaan *Euler-Lagrangian*, yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (2.9)$$

Gaya dari luar Q dapat dihitung dengan menggunakan prinsip *Lagrange-d'Alembert*, yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (2.10)$$

Sudut *servomotor* θ akan digunakan sebagai koordinat umum yang akan menghasilkan perhitungan sederhana. Hal ini juga mengubah gaya eksternal ke torsi yang dihasilkan dari gerakan dan gravitasi pada sistem. Gesekan pada sendi dan gaya dorongan udara akan diabaikan serta gaya pegas dari kabel juga diabaikan. Dengan demikian persamaanya yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (2.11)$$

dimana τ adalah torsi aktuator^[1].