

**PEMBANGUNAN SISTEM ROBOT
MENGUNAKAN KAEDAH KEJURUTERAAN
BALIKAN**

Oleh

NORSIHAN MOKHTAR

Tesis yang diserahkan untuk memenuhi
keperluan bagi Ijazah Sarjana Sains

Jun, 2000

PENGHARGAAN

Dengan Nama Allah Yang Amat Pemurah Lagi Amat Mengasihani

Saya ingin mengambil kesempatan ini untuk mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada penyelia projek saya, Dr. Fakhruddin Mohd. Hashim dan Encik Amir Yazid Ali di atas tunjuk ajar, nasihat, dorongan dan kesabaran mereka membantu saya melaksanakan projek ini. Tidak dilupakan, Prof. Madya Mohd. Razali Muhamad, Dr. Zaidi Mohd. Ripin dan Dr. Zahurin Samad yang telah membantu dari segi nasihat dan panduan dalam penyelesaian beberapa permasalahan projek.

Ucapan terima kasih juga ditujukan terutama untuk Encik Baharom, Encik Hamid Fahmi, Encik Zaimi, dan juruteknik-juruteknik lain di Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik yang banyak membantu menyempurnakan kerja-kerja fabrikasi. Saya juga berterima kasih kepada Encik Mohd Najib dan Encik Mohd Ali Shahbana atas pertolongan ikhlas yang telah dihulurkan. Ucapan yang sama ditujukan kepada dekan Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik kerana telah memberi peluang projek penyelidikan ini dilaksanakan. Sekalung penghargaan juga diberikan kepada pihak MCRIA dan juruteknik-juruteknik di Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan dan Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik/Elektronik kerana sudi berkongsi maklumat dan pengalaman yang amat bernilai.

Akhir sekali, penghargaan yang tak terhingga khusus untuk suami dan keluarga saya yang telah memberi sokongan yang tidak berbelah-bagi di belakang tabir.

SENARAI KANDUNGAN

	Muka Surat
PENGHARGAAN	ii
SENARAI KANDUNGAN	iii
SENARAI LAMPIRAN	x
SENARAI RAJAH	xi
SENARAI JADUAL	xiii
KATA KUNCI	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
BAB 1 PENGENALAN	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Permasalahan Projek	2
1.3 Objektif Penyelidikan	2
1.4 Skop Kerja Penyelidikan	4
1.5 Aturan Tesis	6
BAB 2 TINJAUAN BACAAN	8
2.1 Pendahuluan	8

2.2	Metodologi Rekabentuk Semula	8
2.2.1	Kejuruteraan Balikan	12
2.2.2	Permodelan dan Analisis	14
2.2.2.1	Teknik Penguraian Fungsi	14
2.2.2.2	Rumah Kualiti	15
2.2.2.3	Permodelan Geometri Menggunakan Perisian CAD	17
2.2.3	Rekabentuk Semula	18
2.3	Sistem Robot	19
2.3.1	Komponen Robot	20
2.3.1.1	Lengan Mekanikal	21
2.3.1.2	'End-effector' dan Pergelangan	22
2.3.1.3	Sistem Pemacu	22
2.3.1.4	Sistem Penghantar	24
2.3.2	Konfigurasi Robot	24
2.3.3	Geometri dan Kinematik Robot	25
2.3.4	Prestasi	27
2.3.4.1	Kapasiti Beban	27
2.3.4.2	Kelajuan	28
2.3.4.3	Kebolehulangan	28
2.3.5	Aplikasi Robot	29
2.4	Sistem Kawalan Sel	30
2.4.1	Pengawal (<i>controller</i>) atau Komputer	31
2.4.2	Alat Kawalan Logik Boleh Diaturcara (PLC)	32
2.4.3	Pengaturcaraan <i>Ladder Diagram</i>	33
2.4.4	Penderia	35
2.4.5	Kawalan Gerakan Robot	36

2.5	Rumusan	37
BAB 3	SISTEM ROBOT LATIHAN DAN PENDEKATAN PROJEK	38
3.1	Pendahuluan	38
3.2	Sistem Robot Latihan	38
3.2.1	Unit Tapak Berputar (UTB)	40
3.2.2	Unit Pemacu Pengumpar (UPP)	40
3.2.3	Penggenggam Pneumatik dan Pergelangan	40
3.2.4	Pengawal (<i>Controller</i>)	40
3.3	Konfigurasi, Geometri dan Kinematik	41
3.4	Prestasi	41
3.5	Aplikasi	43
3.6	Pendekatan Projek	43
3.6.1	Prosedur Pengubahsuaian Konfigurasi Robot	44
3.6.2	Prosedur Pembinaan Sistem Kawalan Sel	45
3.7	Rumusan	46
BAB 4	APLIKASI METODOLOGI BALIKAN	47
4.1	Pendahuluan	47
4.2	Analisis Kejuruteraan Balikan	47
4.2.1	Analisis Peringkat Sistem	48
4.2.1.1	Spesifikasi Kepenggunaan	48
4.2.1.2	Sifat Fizikal UPP. dari Pelbagai Sudut Pandangan	49
4.2.1.3	Model 'Kotak Hitam'	51

4.2.1.4	Kekangan-kekangan Rekabentuk	52
4.2.1.5	Rajah Tulang Ikan	54
4.2.1.6	Prinsip-prinsip Fizikal	56
4.2.2	Analisis Peringkat Subsistem	56
4.2.2.1	Tatacara Pengasing	56
4.2.2.2	Spesifikasi Fungsi	57
4.2.2.3	Kekangan-kekangan Rekabentuk	59
4.2.2.4	Interaksi antara Subsistem	60
4.2.2.5	Prinsip-prinsip Fizikal	61
4.2.3	Analisis Peringkat Komponen	61
4.2.3.1	Tatacara Pengasingan	61
4.2.3.2	Spesifikasi Fungsi	65
4.2.3.3	Kekangan-kekangan Rekabentuk	67
4.2.3.4	Interaksi antara Komponen	67
4.2.3.5	Prinsip-prinsip Fizikal	72
4.2.3.6	Metod Penghasilan Komponen	72
4.3	Analisis Kejuruteraan Balikan ke atas Pergelangan	75
4.3.1	Analisis Peringkat Komponen	76
4.3.1.1	Tatacara Pengasingan	76
4.3.1.2	Spesifikasi Fungsi	76
4.3.1.3	Kekangan-kekangan Rekabentuk Komponen	76
4.3.1.4	Interaksi antara Komponen	77
4.3.1.5	Prinsip-prinsip Fizikal	78
4.3.1.6	Metod Penghasilan Komponen	78
4.4	Rumusan	79

BAB 5	ANALISIS DAN PERMODELAN REKABENTUK SEMULA	80
5.1	Pendahuluan	80
5.2	Keperluan dan kekangan Rekabentuk Semula	80
5.2.1	Keperluan Rekabentuk Semula	81
5.2.2	Kekangan Rekabentuk Semula	81
5.3	Analisis Rekabentuk Pergelangan Anjal	82
5.3.1	Faktor Tapak Pemesinan dan Ciri-ciri Bahankerja	82
5.3.1.1	Tapak Pemesinan	83
5.3.1.2	Ciri-ciri Bahankerja	84
5.3.2	Analisis Orientasi	85
5.3.3	Teknik Penguraian Fungsi	86
5.4	Analisis Rekabentuk DOF3	89
5.4.1	Langkah 1: Menterjemah Keperluan-keperluan Rekabentuk DOF3 dalam Bentuk Sasaran Kejuruteraan yang boleh diukur.	90
5.4.2	Langkah 2: Mengenalpasti Parameter-parameter UPP yang Paling Kritikal dalam Memenuhi Keperluan Rekabentuk DOF3	90
5.4.3	Langkah 3: Meneliti Permasalahan Kekangan Rekabentuk Semula Terhadap Ciri-ciri Komponen DOF3	91
5.4.4	Permodelan dan Pengiraan Kejuruteraan	93
5.4.4.1	Memenuhi Keupayaan Jangkauan 400 mm	93
5.4.4.2	Analisis Kesimbangan Daya Statik	95
5.5	Rumusan	95

BAB 6	REKABENTUK SEMULA DAN FABRIKASI PROTOTAIP DOF3	96
6.1	Pendahuluan	96
6.2	Rekabentuk DOF3	96
6.3	Fabrikasi Prototaip DOF3	99
6.3.1	Pemesinan Komponen	100
6.3.2	Pemasangan Komponen	100
6.4	Rumusan	102
BAB 7	PEMBINAAN SISTEM KAWALAN SEL	103
7.1	Pendahuluan	103
7.2	Ciri-ciri Sistem Kawalan Sel	103
7.3	Peringkat-peringkat Pembangunan Sistem Kawalan Sel	104
7.3.1	Perancangan Laluan Robot	106
7.3.1.1	Taarifan Koordinat Kawalan	106
7.3.1.2	Perincian Tugas 'Pungut dan Letak'	108
7.3.2	Rekabentuk Sistem Elektronik Industri	110
7.3.3	Pembangunan Tugas dalam Pengaturcaraan <i>Ladder Diagram</i>	112
7.3.4	Pengujian	114
7.4	Rumusan	114
BAB 8	PENGUJIAN DAN PENGESAHAN PRESTASI DOF3	116
8.1	Pendahuluan	116
8.2	Bentangan Tapak Pengujian	116

8.3	Pengujian Prestasi DOF3	116
8.3.1	Ujikaji 1	117
8.3.2	Ujikaji 2	119
8.4	Perbandingan Prestasi DOF3 dengan Sasaran Rekabentuk Semula	119
8.5	Anggaran Kos DOF3	120
8.6	Perbincangan	121
8.7	Rumusan	122
BAB 9	KESIMPULAN DAN CADANGAN	123
9.1	Pendahuluan	123
9.2	Penghasilan Projek Penyelidikan	123
9.3	Sumbangan Projek Penyelidikan	124
9.4	Kritikan Mengenai Penyelidikan	126
9.5	Cadangan	127
9.5.1	Aspek Rekabentuk	127
9.5.2	Aspek Sistem Kawalan Sel	128
RUJUKAN		130

SENARAI LAMPIRAN**muka surat**

Lampiran A	Pengiraan Kejuruteraan	135
Lampiran B	Unit Tapak Berputar (UTB)	148
Lampiran C	Unit Pemacu Pengumpar (UPP)	154
Lampiran D	<i>'End-effector'</i>	172
Lampiran E	Sistem Kawalan Sel	175
Lampiran F	Analisis Pergelangan Anjal	185
Lampiran G	Analisis Kejuruteraan Balikan	189
Lampiran H	DOF3	198
Lampiran I	Pengaturcaraan Tugas	219

SENARAI RAJAH

muka surat

Rajah 1.0	Carta aliran skop kerja projek	5
Rajah 2.0	Hubungan antara Kejuruteraan Balikan dan rekabentuk semula dalam sesebuah kerja rekabentuk	11
Rajah 2.1	Peringkat dan elemen-elemen analisis dalam Metodologi Kejuruteraan Balikan	13
Rajah 2.2	Rumah Kualiti	16
Rajah 2.3	Sampul kerja bagi lima konfigurasi asas robot industri	26
Rajah 2.4 (a)	<i>Rung</i> - struktur asas pengaturcaraan <i>Ladder Diagram</i>	33
Rajah 2.4 (b)	<i>Rung</i> yang diisi dengan Input (I) dan Output (O)	33
Rajah 3.0	(a) Robot latihan dan (b) rajah skematik menunjukkan dua darjah kebebasannya	39
Rajah 3.1	Pecahan sistem robot kepada lima subsistem	39
Rajah 3.2	Carta pendekatan projek pembangunan sistem robot latihan	44
Rajah 4.0	Lukisan CAD pelbagai sudut pandangan unit pemacu pengumpur; (a) hadapan (b) belakang (c) sisi kanan (d) sisi kiri (e) atas (f) bawah	50
Rajah 4.1	Model Kotak Hitam mewakili input dan output yang mempengaruhi keberkesanan operasi UPP	52
Rajah 4.2	Model Rajah Tukang Ikan menganalisis beberapa tanggapan prinsip fizikal sistem UPP	55
Rajah 4.3	Subsistem UPP : (i) subsistem pemacu, (ii) subsistem pergerakan, (iii) subsistem pemegang penerima	57
Rajah 4.4	Pemasangan dan label komponen-komponen UPP	64
Rajah 5.0	(i) Tapak pemesinan dan (ii) paksi-paksi mesin pemilahan latihan	83

Rajah 5.1	Kedudukan 1 dan 2 bahankerja di atas penghantar	84
Rajah 5.2(i)	Aliran tertumpu bahan bagi pergelangan anjal yang membentuk dua darjah kebebasan	87
Rajah 5.2 (ii)	Kaedah susunatur rangkai pergelangan anjal	88
Rajah 5.3	Kedudukan robot relatif kepada mesin pemilan latihan (<i>pandangan atas</i>)	93
Rajah 5.4	Ukuran panjang dan jarak jangkauan UPP	94
Rajah 6.0	Rekabentuk pemasangan DOF3	98
Rajah 6.1	Jujukan pemasangan komponen-komponen prototaip DOF3	101
Rajah 7.0	Carta aliran peringkat-peringkat pembinaan sistem kawalan sel	105
Rajah 7.1	Takrifan sistem koordinat tapak untuk robot silinder	106
Rajah 7.2	Kedudukan awal robot, mesin pemilan latihan dan bahankerja (<i>pandangan atas</i>)	107
Rajah 7.3	Lokasi hujung pengggenggam mengikut kejadian-kejadian dalam tugas 'pungut dan letak'	109
Rajah 7.4	Susunatur rekabentuk elektronik industri bagi system kawalan sel	111
Rajah 7.5	Aliran kawalan logik output dalam program utama (P0)	113
Rajah 8.0	Graf kelajuan pergerakan DOF3 lawan masa	119

SENARAI JADUAL

muka surat

Jadual 2.0	Senarai fungsi bagi seksyen-seksyen dalam Rumah Kualiti	17
Jadual 2.1	Unsur-unsur yang terkandung dalam komponen utama robot	20
Jadual 2.2	Konfigurasi robot dan jenis sendi utama rangkai	25
Jadual 2.3	Ciri-ciri penderia robot	36
Jadual 3.0	Spesifikasi prestasi dua paksi utama robot latihan	42
Jadual 4.0 (a)	Spesifikasi kepenggunaan UPP dari keperluan rekabentuk semula dan pandangan jurutera	48
Jadual 4.0 (b)	Kekangan-kekangan rekabentuk semula dan kesan kepada rekabentuk UPP	53
Jadual 4.1	Subsistem UPP, fungsi dan senarai-senarai komponennya	58
Jadual 4.2	Kesan kekangan rekabentuk semula ke atas subsistem UPP	59
Jadual 4.3	Interaksi antara subsistem UPP	60
Jadual 4.4	Subsistem , senarai komponen, bilangan dan label komponen UPP	62
Jadual 4.5(a)	Takrifan fungsi komponen subsistem pemacu	65
Jadual 4.5(b)	Takrifan fungsi komponen subsistem pemacu	66
Jadual 4.5(c)	Takrifan fungsi komponen subsistem pemacu	67
Jadual 4.6(a)	Interaksi antara komponen-komponen subsistem pemacu	68
Jadual 4.6(b)	Interaksi antara komponen-komponen subsistem pergerakan	69
Jadual 4.6(c)	Interaksi antara komponen-komponen subsistem pemegang penderia	71
Jadual 4.7(a)	Pengeluaran komponen pemacu dan faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihannya	73
Jadual 4.7(b)	Pengeluaran komponen pergerakan dan faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihannya	74

Jadual 4.7(c)	Pengeluaran komponen pemegang penderia dan faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihannya	75
Jadual 4.8 (a)	Takrifan fungsi komponen pergelangan robot	76
Jadual 4.8 (b)	Kesan kekangan rekabentuk semula ke atas rekabentuk komponen pergelangan	77
Jadual 4.8 (c)	Interaksi antara komponen pergelangan robot	78
Jadual 4.8 (d)	Pengeluaran komponen pergelangan dan faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihannya	79
Jadual 5.0	Keputusan ujikaji orientasi-orientasi penggenggam untuk 'pungut dan letak' sampel-sampel bahankerja	86
Jadual 5.1	Kesan kekangan rekabentuk semula ke atas pembuatan komponen DOF3 dan langkah-langkah penyelesaian yang diambil	92
Jadual 6.0	Perubahan parameter komponen DOF3 dan tujuannya	97
Jadual 6.1	Senarai bahan (<i>bill of materials</i>) komponen-komponen DOF3	99
Jadual 6.2	Mesin-mesin pembuatan yang digunakan dalam pemesinan komponen DOF3	100
Jadual 7.0	Ciri-ciri sistem kawalan sel	104
Jadual 8.0	Keputusan pengiraan data kinematik DOF3	118
Jadual 8.1	Perbandingan nilai jangkauan, kejituan dan kebolehulangan DOF3 dengan nilai sasaran rekabentuk semula	120

KATA KUNCI

<u>Singkatan</u>	<u>Bahasa Malaysia</u>	<u>English</u>
CNC	Kawalan Angka Berkomputer	Computer Numerical Control
CAD	Rekabentuk berbantuan komputer	Computer-Aided-Design
PLC	Kawalan logik boleh di aturcara	Programmable Logic Controller
DOF	Darjah kebebasan	Degree of freedom
UPP	Unit pemacu pengumpar	Spindle drive unit
UTB	Unit tapak berputar	Rotary base unit
PPKM	Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik	School of Mechanical Engineering

PEMBANGUNAN SISTEM ROBOT MENGGUNAKAN KAEDAH KEJURUTERAAN BALIKAN

Abstrak

Kemajuan dalam industri pengeluaran banyak disokong oleh penggunaan sistem pembuatan berteknologi tinggi seperti sistem robot. Bagaimana pun, penggunaan teknologi robot oleh industri-industri tempatan khususnya industri kecil dan sederhana (IKS) adalah rendah disebabkan oleh faktor kos dan kemahiran mengadaptasi teknologi terbabit. Pembangunan komponen robot secara tempatan boleh meningkatkan keupayaan IKS mengeluar dan mengaplikasi teknologi mengikut keperluan-keperluan proses pengeluaran masing-masing. Penyelidikan ini pada asasnya bertujuan menyediakan suatu pendekatan rekabentuk semula yang sistematik menggunakan peralatan-peralatan yang terhad bagi menghasilkan rekabentuk komponen-komponen robot. Pendekatan yang dipanggil Kejuruteraan Balikan menekankan aspek maklumat/data menyeluruh mengenai produk untuk dijadikan asas rekabentuk semula yang mantap. Penyelidikan ini menggunakan sebuah robot latihan yang pada asalnya memiliki 2 darjah kebebasan, untuk ditingkatkan kepada 3 darjah kebebasan melalui penambahan satu paksi pergerakan yang dinamakan DOF3. Aktiviti rekabentuk semula tertumpu kepada unit pemacu pengumpar (UPP). Ia melibatkan aspek-aspek parametrik di mana beberapa perubahan dilakukan terhadap konfigurasi UPP untuk mencapai tiga sasaran rekabentuk iaitu jangkauan, kejituan kedudukan dan kebolehlaksanaan. Kebolehlaksanaan pergelangan anjal juga diuji untuk digandingkan dengan DOF3. Teknik-teknik rekabentuk seperti Teknik Penguraian Fungsi, Rumah Kualiti dan Permodelan CAD digunakan dalam analisis konsep-konsep rekabentuk yang dipilih. Hasil daripada projek penyelidikan ini, satu struktur fizikal DOF3 telah berjaya dibangunkan secara amali di dalam makmal. Selain itu, satu sistem kawalan sel untuk kegunaan pengujian prestasi prototaip DOF3 juga telah dihasilkan. Walau pun terdapat beberapa penurunan dari segi prestasi DOF3 yang dihasilkan, penyelidikan ini diharap mampu membuka jalan bagi pengembangan teknologi bagi sistem robotik dan automasi tempatan.

THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC SYSTEM USING REVERSE ENGINEERING APPROACH

Abstract

The advancement of production industry is supported by the utilization of high technology manufacturing systems such as the robotic system. Anyhow, the use of robot technology in local industries especially in low and medium industries (IKS), is low due to factors associated to cost and technology adaptation skills. The development of robot components locally would give IKS the ability to produce and apply the technology according to their manufacturing needs. The objective of this research is basically to provide a systematic approach in redesigning robot components using existing manufacturing equipment. The approach which is called Reverse Engineering emphasizes on a complete product information/data in order to build a firm foundation for redesign work. The research uses an existing 2 degree-of-freedom (DOF) trainer robot which is then upgraded to have 3 DOF by adding an axes named as DOF3. The major focus of redesign work is based on the spindle drive unit (UPP). The process involves a parametric redesign in which a few configurations of UPP are modified to achieve three redesign requirements; reach, positional accuracy and repeatability. The feasibility of developing a flexible wrist for the DOF3 is also tested. Design techniques such as Functional Decomposition Techniques, House of Quality and CAD Modeling have been utilized to analyze the chosen design concepts. The major outcome of this research project is a physical structure of the DOF3 which is successfully developed in the laboratory. In addition, a cell control system which is used to test the performance of the DOF3, is also produced. Although there are performance reduction of the DOF3, it is hoped that this research will open an avenue for technological expansion of robotic and automation systems locally.

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Pendahuluan

Sistem kawalan sel dan robot merupakan dua teknologi pengeluaran moden yang banyak diaplikasikan dalam industri di negara-negara maju seperti Jepun dan Amerika Syarikat. Penggunaan teknologi-teknologi ini telah diketahui dapat memberi banyak kesan positif kepada pengeluaran seperti peningkatan produktiviti, keberkesanan penggunaan sumber tenaga, serta perolehan jangka panjang sesebuah industri. Bagaimana pun, kesan positif ini didapati kurang dirasai oleh kebanyakan industri di Malaysia khususnya industri kecil dan sederhana (IKS). Laporan Rancangan Malaysia Ke-7, Unit Perancangan Ekonomi, Jabatan Perdana Menteri menunjukkan bahawa jumlah IKS yang merangkumi 84% daripada jumlah perusahaan dalam sektor pembuatan di Malaysia, hanya berupaya menyumbang 28% dan 33% dalam bentuk nilai ditambah dan gunatenaga kepada pembangunan keseluruhan sektor ini [1]. Faktor kos pelaburan awal yang tinggi mungkin menjadi halangan utama bagi IKS menggunakan teknologi-teknologi tersebut disebabkan komponen dan peralatan robot dan kawalan sel kebiasaannya mahal dan berbentuk pakej.

Keperluan kepada suatu usaha intensif bagi menghasil dan mengaplikasi teknologi-teknologi robot dan sistem kawalan sel secara tempatan untuk disesuaikan dengan keperluan dan kemampuan IKS adalah mendesak. Pengeluaran produk atau komponen-komponen berkaitan secara kos efektif dapat mengurangkan kepergantungan IKS kepada

komponen atau produk luar negara. Aktiviti berkenaan boleh memberi laluan kepada kegiatan pengeluaran secara tempatan dan mampu mengoptimumkan sumbangan IKS kepada hasil pengeluaran negara.

1.2 Permasalahan Projek

Sebuah robot latihan yang mempunyai dua darjah kebebasan (rujuk Rajah 3.0 di Bab 3) dicadangkan untuk melakukan tugas ‘pungut dan letak’ bahankerja di atas sebuah mesin pemilahan latihan secara terkawal. Dua permasalahan timbul iaitu;

1. Ketiadaan darjah kebebasan ke-3 yang membolehkan robot menjangkau ke kedudukan bahankerja di atas mesin pemilahan latihan untuk melakukan aktiviti ‘pungut dan letak’.
2. Ketiadaan sistem kawalan yang boleh mengawal pergerakan robot untuk melaksanakan proses ‘pungut dan letak’.

1.3 Objektif Penyelidikan

Tiga jalan penyelesaian bagi permasalahan di atas menjadi objektif penyelidikan ini iaitu;

1. Membangunkan darjah kebebasan ke-3 robot latihan yang dinamakan DOF3 melalui rekabentuk semula menggunakan metodologi Kejuruteraan Balikan. Selain itu, sebagai tambahan nilai kepada DOF3, sebuah pergelangan anjal juga diuji kebolehlaksanaannya untuk digandingkan dengan DOF3.

2. Menghasilkan struktur fizikal DOF3 menggunakan peralatan yang sedia ada berpandukan pendekatan Kejuruteraan Balikan yang dikaji melalui pengubahsuaian komponen sistem robot yang berkaitan.
3. Membina sebuah sistem kawalan sel untuk mengawal dan melaksanakan sistem robotik yang telah dibangunkan.

Penyelesaian permasalahan di atas adalah rumit kerana ia menggabungkan tiga disiplin rekabentuk kejuruteraan iaitu mekanikal, elektrik/elektronik dan pengaturcaraan. Rekabentuk semula UPP sebahagian besarnya melibatkan rekabentuk dan fabrikasi komponen-komponen mekanikal. Rekabentuk elektrik/elektronik pula ditumpukan kepada penglokasian pengesan (*sensor*) dan peralatan-peralatan elektrik elektronik yang digunakan pada atau seiring dengan komponen-komponen berkenaan. Ia bertujuan melengkapkan komponen-komponen kawalan dalam pembangunan sistem kawalan robot. Rekabentuk pengaturcaraan membabitkan penggunaan perisian komputer bagi membentuk arahan-arahan kawalan yang akan mengawal pergerakan semua paksi-paksi robot.

Teras utama pelaksanaan projek ini ialah penggunaan kemudahan dan kepakaran yang sedia ada. Ciri-ciri rekabentuk dan pembuatan DOF3 dan sistem kawalan sel adalah tertakluk kepada faktor ini. Menggunakan kemudahan sedia ada bermakna pembuatan DOF3 akan hanya menggunakan peralatan-peralatan seperti perisian komputer, mesin-mesin pembuatan, peralatan elektrik/elektronik dan sumber kewangan yang terdapat di PPKM sahaja. Penggunaan kepakaran pula menjurus kepada keupayaan penulis dan pekerja-pekerja teknikal di PPKM menggunakan peralatan-peralatan yang disebutkan.

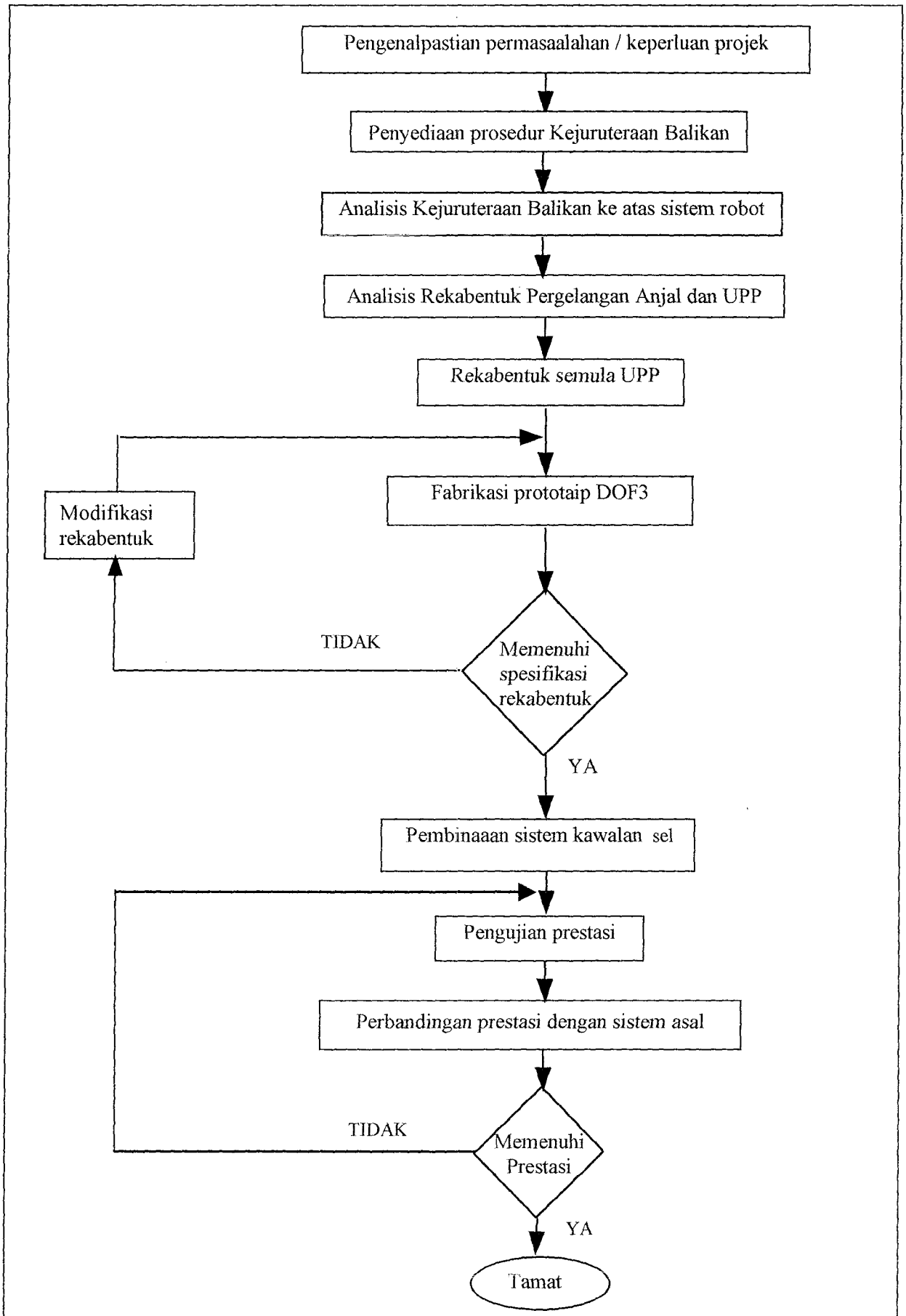
Bagaimana pun, apabila sesuatu sistem atau produk dibangunkan secara '*in-house*', pengurangan kos kebiasaanya menjadi faktor yang kritikal. Penulis bagaimanapun

berpandangan bahawa faktor pengurangan kos terlalu awal untuk dijadikan sasaran utama memandangkan penyelidikan ini merupakan perintis bagi pembangunan sistem robotik di PPKM. Keutamaan diberikan lebih kepada elemen kebolehlaksanaan proses pembuatan DOF3 daripada kos pengeluaran secara keseluruhan. Walau bagaimanapun, faktor kos secara kasar tetap diambilkira bagi tujuan perbandingan.

1.4 Skop Kerja Penyelidikan

Carta aliran dalam Rajah 1.0 mewakili skop kerja projek penyelidikan yang dijalankan. Ia dimulakan dengan pengenalpastian permasalahan atau keperluan projek rekabentuk semula UPP. Ia diikuti dengan proses-proses penyediaan prosedur Kejuruteraan Kejuruteraan Balikan yang berfokuskan kepada kajiselidik keatas sistem, subsistem dan komponen robot latihan. Analisis Kejuruteraan Balikan ke atas UPP dibuat berdasarkan metodologi Kejuruteraan Balikan Otto dan Wood. Analisis-analisis rekabentuk pergelangan anjal dan DOF3 dilakukan untuk menghasilkan spesifikasi rekabentuk.

Seterusnya aktiviti rekabentuk semula melibatkan penghasilan lukisan-lukisan kejuruteraan komponen dan pengiraan-pengiraan kejuruteraan tertentu dilakukan. Proses fabrikasi merangkumkan proses-proses pemesinan dan pemasangan komponen DOF3. Modifikasi ke atas komponen ditentukan dijalankan semasa proses fabrikasi jika terdapat sebarang perbezaan dari nilai spesifikasi. Sel kawalan dibangunkan selepas DOF3 siap untuk tujuan pengujian prestasi. Nilai-nilai prestasi dibandingkan dengan nilai-nilai asal.



Rajah 1.0: Carta aliran skop kerja penyelidikan

Pengujian semula dilakukan jika terdapat perbezaan nilai untuk melihat jika terdapat kesilapan semasa proses.

1.5 Aturan Tesis

Bab 2 mengandungi tinjauan bacaan dari buku-buku, jurnal dan internet mengenai metodologi-metodologi rekabentuk semula, sistem robot serta sistem kawalan sel. Perbincangan berkenaan metodologi rekabentuk merujuk kepada beberapa pendekatan rekabentuk/rekabentuk semula mekanikal yang lazim digunakan. Penerangan khusus diberikan kepada metodologi Kejuruteraan Balikan yang menjadi pendekatan projek penyelidikan ini.

Bab 3 pula meneliti spesifikasi robot latihan dan pendekatan kerja bagi projek penyelidikan ini. Spesifikasi robot diperolehi dari kajian terhadap struktur fizikal robot dan dua siri ujikaji prestasi. Prosedur-prosedur pendekatan projek dibincangkan diakhir bab ini.

Bab 4 memuatkan aplikasi metodologi Kejuruteraan Balikan ke atas struktur UPP dan pergelangan robot. Aplikasi melibatkan lima hingga enam langkah analisis yang dilakukan dalam tiga peringkat iaitu peringkat sistem, subsistem dan komponen.

Analisis, dan permodelan struktur pergelangan dan UPP merupakan fokus utama dalam Bab 5. Keperluan dan kekangan rekabentuk semula ditetapkan dan diterjemahkan kepada konsep-konsep rekabentuk yang berkaitan. Rekabentuk dimulakan dengan menguji kebolehlaksanaan pergelangan anjal untuk digandingkan dengan DOF3 menggunakan ujian orientasi dan Teknik Penguraian Fungsi. Seterusnya, beberapa siri analisis rekabentuk

DOF3 menggunakan Teknik Rumah Kualiti, Permodelan CAD serta pengiraan-pengiraan kejuruteraan dibuat. Model-model rekabentuk DOF3 dihasilkan di akhir proses.

Berasaskan kepada model-model rekabentuk yang dihasilkan, kerja-kerja rekabentuk semula dalam Bab 6 menjurus kepada penilaian semula (*refinement*) rekabentuk bahagian robot melalui beberapa modifikasi terhadap konfigurasi komponen UPP yang berkenaan. Di akhir rekabentuk, lukisan-lukisan geometri bagi komponen-komponen DOF3 dihasilkan. Dua aspek fabrikasi iaitu pemesinan dan pemasangan bagi menjana prototaip bahagian dibincangkan.

Bab 7 mengandungi empat peringkat pembinaan sistem kawalan sel untuk menghasilkan suatu rekabentuk sistem elektronik industri dan sebuah pengaturcaraan tugas untuk menguji prestasi DOF3 dan melaksana proses 'pungut dan letak'. Prosedur-prosedur bagi setiap peringkat diperjelaskan secara terperinci.

Pengujian dan pengesahan prestasi serta penilaian kos bahan prototaip DOF3 dimuatkan dalam Bab 8. Perbandingan dengan prestasi sasaran serta perbincangan mengenai hasil-hasil ujian disertakan.

Akhir sekali, Bab 9 merumuskan kerja-kerja penyelidikan dengan perbincangan mengenai penghasilan dan sumbangan projek penyelidikan secara keseluruhan. Beberapa kritikan terhadap penyelidikan dibuat dan alternatif penyelesaian diberikan bagi meningkatkan prestasi DOF3 dan keberkesanan pelaksanaan projek di masa akan datang.

BAB 2

TINJAUAN BACAAN

2.1 Pendahuluan

Bab ini merangkumi tinjauan bacaan sebagai persediaan awal kerja-kerja rekabentuk semula. Tinjauan dikhususkan kepada tiga skop ilmu iaitu metodologi rekabentuk semula, sistem robot dan sistem kawalan sel.

Metodologi rekabentuk semula meneliti dan membandingkan beberapa metodologi rekabentuk/rekabentuk semula yang telah diamalkan dalam pembuatan produk mekanikal. Metodologi Kejuruteraan Balikan yang digunakan sebagai pendekatan projek penyelidikan ini dijadikan fokus perbincangan.

Tinjauan bacaan manipulator robot merangkumi aspek-aspek seperti takrifan, komponen-komponen asas, geometri, kinematik, prestasi dan aplikasi sesebuah robot. Sistem kawalan sel pula menerangkan ciri-ciri dan elemen-elemen kawalan yang lazim digunakan.

2.2 Metodologi Rekabentuk Semula

Rekabentuk semula sesuatu rekabentuk asal produk merupakan aktiviti-aktiviti asas dalam industri. Ia lazimnya melibatkan pembaikan, peningkatan (*upgrade*) atau proses-

proses modifikasi lain terhadap rekabentuk fizikal sesuatu produk yang asal untuk menghasilkan suatu produk yang memenuhi suatu kriteria atau keperluan yang berbeza. Antara faktor-faktor yang menyumbang kepada keperluan rekabentuk semula ialah [12];

1. Kegagalan rekabentuk asal dalam memenuhi sesuatu kriteria atau keperluan rekabentuk.
2. Kepentingan untuk mengoptimum prestasi prototaip atau produk.
3. Meminimumkan bilangan bahagian atau komponen.
4. Mengurangkan kos pemasangan dan kesulitan-kesulitan berkaitan pengelolaan dan pemasangan.
5. Ketidakpuasan pelanggan terhadap rekabentuk asal.

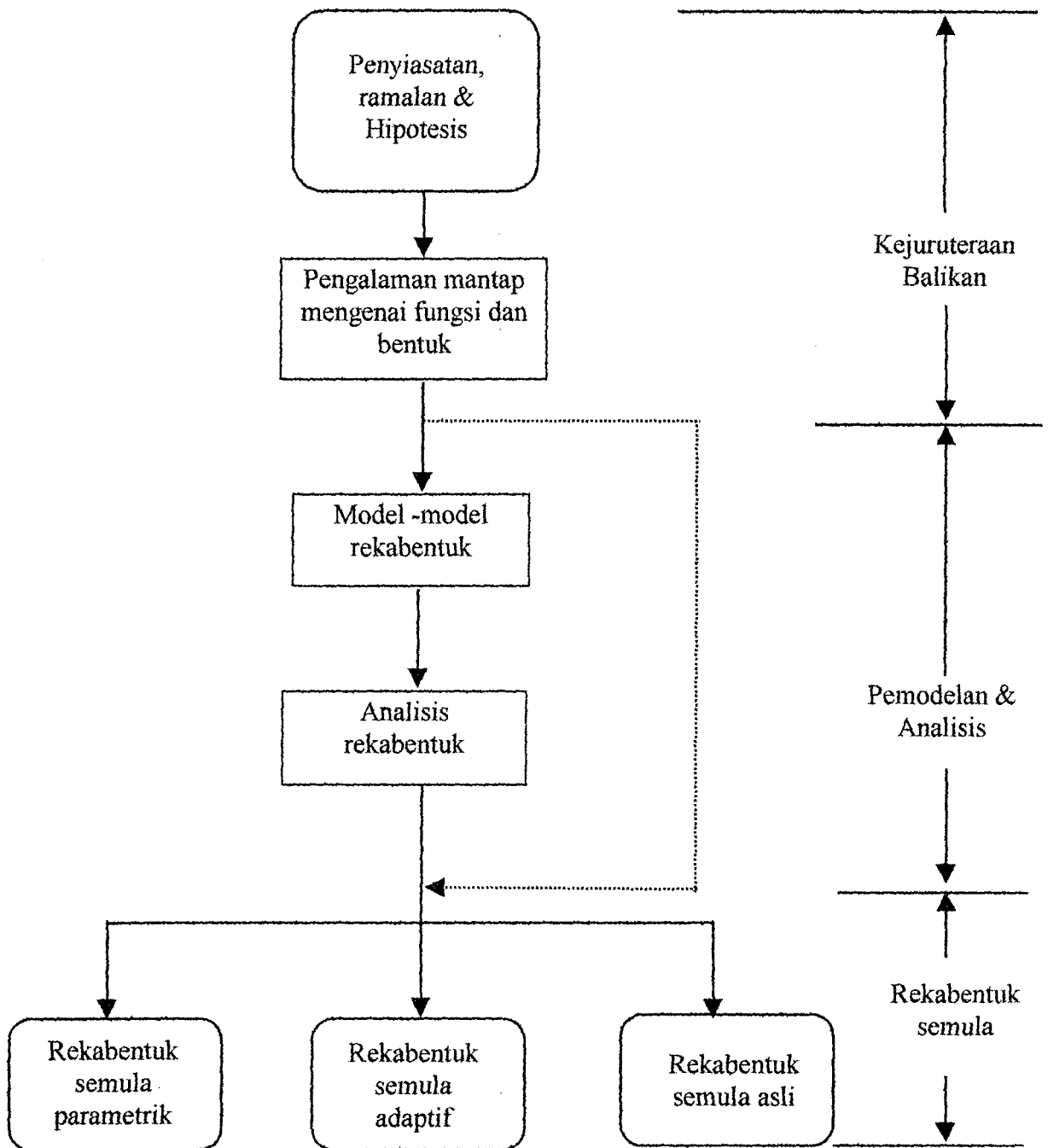
Tugasan-tugasan atau proses-proses rekabentuk semula sebahagian besarnya merupakan tugasan-tugasan dan proses-proses rekabentuk asal. Di dalam konteks rekabentuk kejuruteraan mekanik, model proses-proses rekabentuk asal telah dikategorikan kepada tiga iaitu diskriptif, preskriptif dan pandangan-pandangan komputer [17]. Model diskriptif difokuskan kepada mempelajari praktis-praktis rekabentuk yang lazim digunakan melalui pemerhatian bagaimana seseorang pereka melakukannya. Model preskriptif pula menekankan kepada penetapan turutan-turutan aktiviti yang sesuai untuk mencapai kepada suatu rekabentuk terbaik. Pandangan-pandangan komputer merupakan usaha-usaha untuk menyokong kerja-kerja rekabentuk menggunakan komputer dan mengautomasikan proses-proses rekabentuk.

Kaedah-kaedah atau model-model yang mewakili proses-proses rekabentuk yang disebutkan di atas didapati lebih banyak menekankan kepada permasalahan rekabentuk

untuk “permasalahan asli” [15-17]. Kajian-kajian khusus berkaitan rekabentuk semula pula lebih banyak menumpukan kepada penggunaan komputer sebagai alat utama dalam menyelesaikan permasalahan rekabentuk semula. Ia tidak banyak membantu seseorang pereka terutama pereka baru dalam mengatur strategi rekabentuk semula terutama apabila ia melibatkan rekabentuk semula satu sistem atau subsistem yang mengandungi komponen yang banyak [12, 25-26].

Gabungan kerja penyelidikan dua orang pensyarah iaitu Kevin N. Otto dari Institut Teknologi Massachusetts (MIT) dan Professor Kristin L. Wood dari Universiti Of Texas, bagaimana pun telah menghasilkan satu metodologi terbaru yang membantu dalam menangani permasalahan rekabentuk semula. Ia dinamakan Metodologi Kejuruteraan Balikan. Metodologi ini menggabungkan kaedah-kaedah rekabentuk lazim seperti Kejuruteraan Nilai untuk berfungsi secara lebih khusus, sistematik dan menyeluruh bagi kerja-kerja rekabentuk semula.

Kefahaman mengenai produk adalah langkah permulaan bagi sesebuah gerakerja rekabentuk semula. Metodologi Kejuruteraan Balikan menyediakan strategi-strategi awal rekabentuk semula sesebuah sistem/subsistem/komponen melalui penyiasaan, ramalan dan hipotesis serta penekanan terhadap kefahaman mengenai produk dari aspek bentuk dan fungsi. Carta aliran dalam Rajah 2.0 memperlihatkan perkaitan Kejuruteraan Balikan yang menjurus kepada proses-proses rekabentuk semula [14]. Penjelasan lanjut mengenai elemen-elemen yang terkandung dalam setiap peringkat carta diperjelaskan dalam seksyen-seksyen seterusnya.



Rajah 2.0: Hubungan antara Kejuruteraan Balikan dan rekabentuk semula dalam sesebuah kerja rekabentuk.

2.2.1 Kejuruteraan Balikan

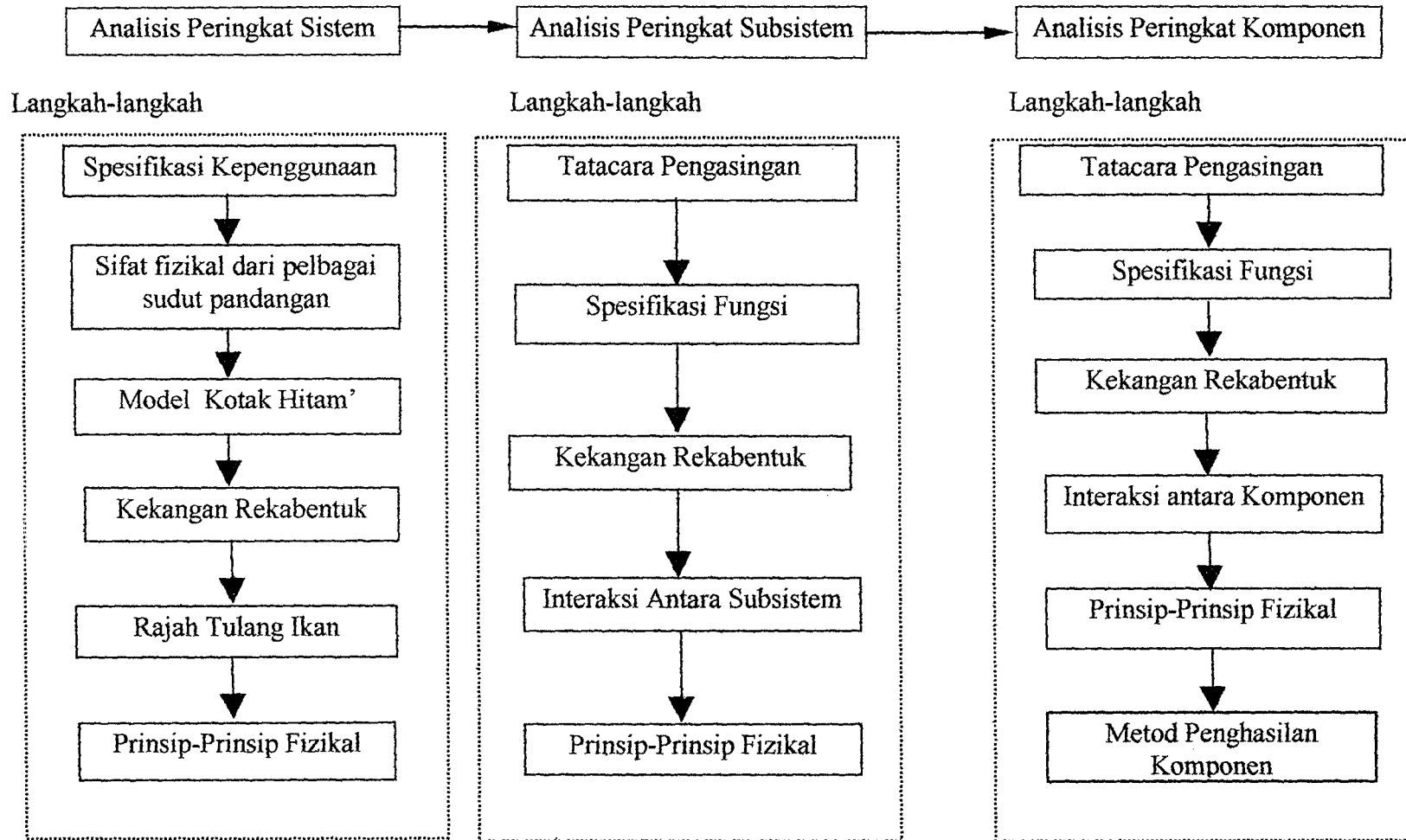
McGraw-Hill Dictionary of Engineering mentakrifkan Kejuruteraan Balikan atau *Reverse Engineering* sebagai kajian ke atas sebuah sistem lengkap atau produk bertujuan mengasing dan mengenalpasti komponen-komponen individu dan juga blok-blok pembangunan sistem [13]. Metodologi Kejuruteraan Balikan membolehkan fungsi-fungsi, bentuk, prinsip fizikal, cara pembuatan dan cara pemasangan produk diteliti, diasing, dianalisis, diuji, diguna dan direkodkan. Setiap proses metodologi bertujuan memberi kefahaman kukuh mengenai produk kepada jurutera rekabentuk serta menyediakan maklumat terkini produk.

Kejuruteraan Balikan yang diperkenalkan oleh Otto dan Wood meliputi proses kajian ciri-ciri luaran dan dalaman produk yang meliputi [14];

- *Penyiasatan, Ramalan dan Hypotesis* - kajian, dan andaian-andaian ke atas faktor fizikal dan tindakbalas persekitaran terhadap produk seperti kepenggunaan produk, permasalahan, keperluan pelanggan, kebolehlaksanaan ekonomi untuk tujuan rekabentuk semula dan sebagainya.
- *Pengalaman Jitu: Fungsi dan Sifat* - penelitian terhadap fungsi dan sifat-sifat komponen individu dari pelbagai sudut seperti pengasingan, senarai parameter, aliran daya, perkongsian dan keserasian fungsi dan lain-lain.

Kefahaman mantap dan panduan melalui perwakilan seperti lukisan atau model kejuruteraan membolehkan sesuatu sistem mekanikal disembarkan (*evolve*) kepada tiga peringkat iaitu peringkat subsistem, konfigurasi dan komponen seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.1 [14].

APLIKASI KEJURUTERAAN BALIKAN



Rajah 2.1: Peringkat dan elemen-elemen analisis dalam Metodologi Kejuruteraan Balikan

2.2.2 Permodelan dan Analisis

Peringkat permodelan dan analisis rekabentuk mengandungi proses-proses pengeluaran konsep-konsep rekabentuk untuk dianalisis. Ia bertujuan menghasilkan model-model yang sesuai bagi menyelesaikan sesuatu permasalahan rekabentuk. Suatu konsep terbaik dipilih untuk dijadikan asas rekabentuk. Model dan analisis rekabentuk mempunyai fungsi-fungsi berikut;

Model-model Rekabentuk - mengenalpasti prinsip fizikal sebenar bagi sesuatu komponen untuk melahirkan hubungan keseimbangan, model kejuruteraan dan julat-julat metrik .

Analisis Rekabentuk - menganalisis model-model rekabentuk yang dihasilkan melalui proses analisis kejuruteraan, simulasi, pengoptimuman dan aplikasi *spreadsheet*.

Terdapat berbagai teknik bagaimana sesuatu konsep rekabentuk boleh dianalisis. Antara teknik-teknik tersebut ialah Teknik Penguraian Fungsi, Rumah Kualiti dan juga Permodelan menggunakan sistem CAD.

2.2.2.1 Teknik Penguraian Fungsi

Fungsi ditakrifkan sebagai kelakuan yang mesti ada pada sesuatu komponen untuk melengkapkan keperluan rekabentuk. Ia memberitahu 'apa' yang mesti dilakukan oleh sesuatu produk. Fungsi telah diperihalkan dalam tiga bentuk aliran logik iaitu aliran tenaga, aliran bahan dan aliran informasi [15].

a) Fungsi aliran tenaga

Fungsi aliran tenaga diklasifikasikan dari segi jenis tenaga dan bentuk pergerakannya dalam sistem. Aliran tenaga mekanik, elektrik, bendalir dan haba apabila dialirkan melalui sesuatu sistem akan ditukar, disimpan, dipindah, dibekal dan diresap kepada persekitaran. Sebutan-sebutan berkenaan digunakan sebagai lambang pergerakan komponen dan pemasangan dalam sesuatu sistem.

b) Fungsi aliran bahan

Fungsi aliran bahan dibahagikan kepada tiga jenis iaitu:

- I. Aliran terus (*through-flow*) atau proses pengabdian bahan - bahan diolah untuk menukar kedudukan bentuknya.
- II. Aliran Kecapahan (*diverging flow*) atau pembahagian bahan - pengasingan bahan kepada komponen-komponennya.
- III. Aliran Tertumpu - pemasangan atau penyambungan bahan

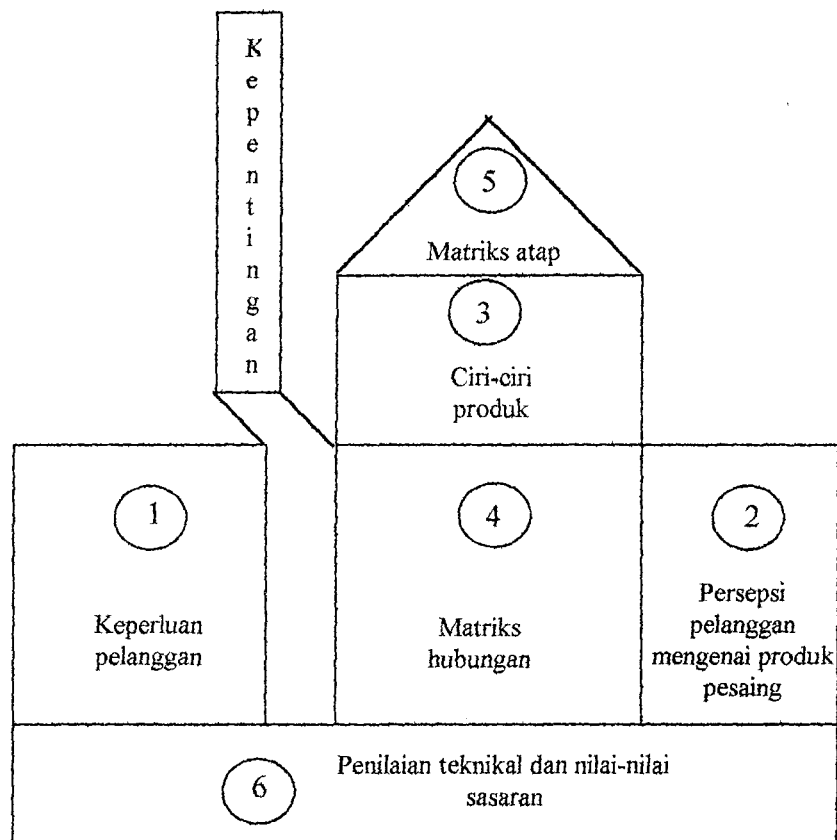
c) Fungsi aliran informasi

Fungsi aliran informasi digunakan sebagai sebahagian dari sistem kawalan automatik atau interaksi antaramuka dengan manusia (*operator*). Ia biasanya dinyatakan dalam bentuk isyarat mekanikal, elektrik dan perisian.

2.2.2.2 Rumah Kualiti

Quality Functional Deployment atau QFD ialah satu kaedah terkini yang digunakan untuk memahami permasalahan rekabentuk dan seterusnya menjana spesifikasi kejuruteraan yang berkesan [15]. Kaedah ini diaplikasi menerusi penggunaan Rumah

Kualiti. Rumah Kualiti ialah satu struktur rajah yang mempunyai enam bahagian asas. Bahagian-bahagian tersebut terdiri daripada bahagian keperluan pelanggan, bahagian penilaian kompetitif, bahagian ciri-ciri produk, bahagian matriks hubungan, bahagian matriks atap dan bahagian penilaian. Gariskasar bentuk Rumah Kualiti dan lokasi-lokasi bahagian yang disebutkan di atas dipaparkan dalam Rajah 2.2 [27]. Fungsi-fungsi setiap bahagian dalam Rumah Kualiti disenaraikan dalam Jadual 2.0.



Rajah 2.2: Rumah Kualiti

Rumah Kualiti boleh dikembangkan kepada beberapa siri rumah lain mengikut aliran informasi yang diperlukan dalam rekabentuk. Sebagai contoh, Rumah Kualiti asas

boleh dikembangkan kepada Rumah Penyebaran Bahagian, dan kepada Rumah Perancangan Proses, seterusnya kepada Rumah Keperluan Operasi.

Jadual 2.0 : Senarai fungsi bahagian-bahagian dalam Rumah Kualiti

BAHAGIAN	FUNGSI
Bahagian ①:	Menyenaraikan sifat-sifat produk yang penting bagi pelanggan menggunakan istilah/sebutan pelanggan itu sendiri
Bahagian ②:	Membandingkan persepsi pelanggan mengenai produk pesaing dengan setiap keperluan pelanggan untuk menentukan keperluan mana yang boleh membuahkan hasil yang kompetitif dan perlu diambilkira.
Bahagian ③:	Mentafsir keperluan pelanggan dalam istilah/sebutan kejuruteraan.
Bahagian ④:	Mengaitkan sifat-sifat produk yang diterima daripada pelanggan dengan sifat-sifat sebenar produk.
Bahagian ⑤:	Melihat interaksi atau perkaitan di antara sifat-sifat produk
Bahagian ⑥:	Menyenaraikan pelbagai faktor penting berkenaan pengurusan dalam menentukan nilai-nilai sasaran bagi rekabentuk.

2.2.2.3 Permodelan Geometri Menggunakan Perisian CAD

Permodelan geometri adalah salah satu kategori dalam penggunaan CAD [32]. Aktiviti permodelan geometri melibatkan seseorang perekabentuk membina bentuk objek di atas skrin komputer. Bentuk objek boleh ditukar kepada model matematik oleh komputer melalui penyimpanan maklumat di dalam pengkalan data. Model boleh dikeluarkan oleh pereka bila-bila masa di sepanjang proses rekabentuk untuk dianalisis.

2.2.3 Rekabentuk Semula

Rekabentuk semula atau *redesign* produk yang sedia ada adalah aktiviti asas dalam industri pembuatan. Kebanyakan rekabentuk asal memerlukan rekabentuk semula untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang timbul dari segi proses, pembuatan ataupun prestasi produk. Umumnya, kerja-kerja rekabentuk semula diperlukan apabila ciri-ciri tertentu sesuatu komponen/produk perlu diubah untuk memenuhi keperluan perubahan aplikasi ataupun pertukaran keperluan dipasaran. Perubahan aplikasi dan keperluan pasaran mungkin memerlukan perubahan, pengurangan atau penambahan fungsi, bilangan atau bentuk komponen. Keadaan ini akan memberi kesan kepada ciri-ciri asal komponen/produk dan ini memerlukan kepada beberapa modifikasi dilakukan, misalnya terhadap parameter atau konfigurasi komponen.

Sebagai contoh, perubahan aplikasi dalam industri pembuatan pakaian terutama untuk tujuan mengoptimum pengeluaran melalui pengurangan kesilapan jahitan dan pembaziran kain menyaksikan revolusi digital dimasukkan dalam rekaan terkini mesin jahit. Mesin berkomputer ini boleh mengawal jarak dan bentuk jahitan dengan tepat. Kain pula akan dipotong selepas jahitan selesai mengikut saiz yang dikehendaki. Perubahan aplikasi sedemikian pada asasnya memerlukan penambahan komponen-komponen baru seperti micropemprosesan, elemen pengesan dan pemotong kepada rekabentuk asal mesin jahit.

Pada kebiasaannya, rekabentuk semula menggabungkan lebih dari satu jenis permasalahan rekabentuk. Sesuatu kerja rekabentuk semula mungkin memerlukan kepada perubahan konfigurasi bahagian-bahagian komponen dan analisis parameter-parameter tertentu pada komponen. Ullman telah membahagikan beberapa permasalahan rekabentuk kepada lima jenis iaitu pemilihan, konfigurasi, parametrik, novel dan rekabentuk semula

[15]. Jenis-jenis permasalahan rekabentuk semula pula telah dibahagikan kepada tiga kategori iaitu parametrik, adaptif dan asli [14]. Rekabentuk semula parametrik dikategorikan sebagai analisis ke atas parameter-parameter rekabentuk untuk tujuan pengoptimuman sesuatu unsur komponen/produk seperti fungsi atau prestasi. Rekabentuk semula adaptif pula dikhususkan apabila subsistem baru ingin diperkenalkan. Dalam konteks ini, analisis kesan perlu dilakukan terhadap sistem asal. Rekabentuk semula asli dirujuk kepada proses mencipta rekabentuk baru berasaskan prinsip yang asli atau novel.

Aktiviti utama pada peringkat rekabentuk semula ialah penghasilan lukisan-lukisan kejuruteraan dalam bentuk bentangan (*layout*), perincian dan pemasangan. Lukisan bentangan ialah dokumen-dokumen kerja pembangunan komponen-komponen utama yang dihasilkan sepanjang proses rekabentuk. Perkembangan lukisan bentangan menerusi analisis-analisis rekabentuk menghasilkan lukisan perincian dan pemasangan. Lukisan perincian mengandungi data-data seperti dimensi komponen dan toleran, bahan dan perincian pembuatan dan piawai-piawai lukisan. Lukisan pemasangan memberi maklumat bagaimana komponen-komponen disatukan melalui penggunaan nombor pengenalan atau abjad.

2.3 Sistem Robot

Menurut takrifan Institut Robotik Amerika, robot adalah “ sejenis mesin pelbagai fungsi yang boleh diprogram untuk mengelola bahan, bahagian (*parts*), matalat atau peralatan tertentu melalui pelbagai pengaturcaraan pergerakan untuk pelaksanaan tugas yang berbagai” [6]. Pembentukan sistem robot merangkumkan berbagai sumber teknologi dan teori seperti mekanik, rekabentuk terbantu komputer, pembuatan terbantu komputer, kecerdikan rekaan, pengaturcaraan dan elektronik berteknologi tinggi. Rangkaian teknologi

dan teori tersebut digunakan dalam struktur dan gerakerja mesin-mesin mudah seperti peralatan ‘pungut dan letak’ dan manipulator berturutan terhad (*limited sequence manipulator*). Kegunaan rangkaian yang sama pada peralatan-peralatan kawalan komputer yang amat kompleks pula berupaya menjana sesuatu keputusan berhubung operasi secara automatik. Ia juga membolehkan peralatan melakukan pergerakan-pergerakan tertentu pada julat yang amat kecil.

2.3.1 Komponen Robot

Secara ringkas, sistem robot dibina daripada gabungan unsur-unsur mekanikal, penyalur kuasa dan kawalan. Ia terbahagi kepada lima komponen utama iaitu lengan mekanikal, ‘*end-effector*’, sistem pemacu dan penghantar, pengawal (*controller*) dan penerima. Hubungan antara tiga unsur di atas dengan komponen-komponen asas robot ditunjukkan dalam Jadual 2.1 [7].

Jadual 2.1: Unsur-unsur yang terkandung dalam komponen utama robot

Komponen Utama	Gabungan Unsur
1. Lengan mekanikal	Mekanikal
2. ‘ <i>End -effector</i> ’ dan pergelangan	Mekanikal, penyalur kuasa dan kawalan
3. Sistem pemacu dan penghantar	Mekanikal, penyalur kuasa
4. Pengawal (komputer)	Kawalan
5. Penderia	Mekanikal dan kawalan

2.3.1.1 Lengan Mekanikal

Lengan mekanikal ialah bahagian-bahagian pada sistem robot yang bergerak untuk mencapai posisi yang membolehkan objek dipindah atau dikelola. Ia berfungsi memindah, mengarah, memutar dan sebagainya, untuk tujuan menempatkan objek pada lokasi yang sesuai untuk proses pemesinan, pemasangan atau lain-lain proses yang terdapat dalam industri. Selain itu, ia juga menyokong komponen-komponen lain pada robot seperti '*end-effector*' dan bahankerja.

Lengan mekanikal terbina daripada gabungan rangkai-rangkai (*links*) dan sendi-sendi (*joints*) mekanikal. Gabungan rangkai dan sendi merupakan paksi-paksi utama robot. Gabungan rangkai terdiri daripada anggota-anggota tegar yang panjang dan lurus. Ia berfungsi menyokong, menempat dan mengorientasi '*end-effector*'. Setiap satu rangkai disambung kepada rangkai yang lain melalui suatu sendi yang berfungsi membenarkan pergerakan relatif di antara dua rangkai tersebut.

Dua jenis sendi yang lazim digunakan pada robot-robot industri ialah sendi prismatic dan sendi revolusi. Sendi prismatic atau sendi gelangar adalah pemasangan di antara dua anggota tegar yang membolehkan satu daripada anggota menghasilkan pergerakan linear. Sendi revolusi pula ialah pemasangan di antara dua anggota tegar yang memberikan pergerakan putaran kepada salah satu daripada dua anggota. Terdapat juga sejenis sendi lain yang dinamakan sendi agihan (*distributed joint*) yang boleh menghasilkan kedua-dua jenis pergerakan.

2.3.1.2 'End-effector' dan Pergelangan

'End-effector' adalah satu sistem antaramuka mekanikal (*mechanical interface*) yang bersentuhan secara langsung dengan bahankerja. Ia berfungsi mencengkam dan melepaskan objek melalui penggunaan pelbagai mekanisma genggam seperti cawan hampagas, cangkuk, elektromagnet, pengikat (*clamp*), skup ataupun mekanisma yang menyerupai tangan manusia.

Selain dari pergerakan rangkai, pemposisian dan pengorientasian 'end-effector' kepada orientasi sasaran disempurnakan oleh pergerakan antaramuka mekanikal iaitu pergelangan (*wrist*). Pergelangan robot ialah satu set sambungan rangkai dan sendi kuasa di antara rangkai dan penggenggam. Rangkai dan sendi membentuk rangkaian paksi-paksi kedua robot. Struktur pergelangan membenarkan penggenggam disokong, ditempat dan diorientasi kepada kedudukan bahankerja.

2.3.1.3 Sistem Pemacu

Fungsi sistem pemacu ialah menyalurkan kuasa kepada penggerak-penggerak mekanikal (*mechanical actuators*) robot untuk menghasilkan pergerakan-pergerakan tertentu. Sistem pemacu yang terdapat pada robot industri dikategorikan kepada tiga jenis iaitu hidraulik, pneumatik dan motor elektrik.

Pemacu hidraulik menggunakan bendalir bertekanan tinggi seperti minyak untuk memindahkan daya-daya ke titik sasaran. Empat komponen asas bagi sistem hidraulik terdiri daripada takungan, pam, injap dan penggerak (*actuator*). Sistem pemacu hidraulik banyak digunakan pada robot-robot yang besar kerana penggunaannya memerlukan ruang yang luas. Antara faktor-faktor pemilihan sistem hidraulik ialah [3];

- Kekuatan pengelolaan beban
- Kelajuan yang tinggi
- Kadar '*backlash*' yang rendah
- Keupayaan menerima beban 'kejutan'

Pemacu pneumatik menggunakan udara termampat sebagai medium pengeluar kuasa. Udara termampat disimpan di dalam bekas khas dan disalurkan melalui injap kepada penggerak-penggerak pneumatik seperti silinder dan penggenggam. Kelebihan asas sistem pemacu pneumatik ialah ianya lebih murah. Bagaimana pun, kapasiti beban yang boleh dipikul oleh sistem pneumatik adalah lebih rendah daripada sistem hidraulik [3].

Sistem pemacu elektrik pula terbentuk daripada prinsip pengaliran arus elektrik melalui bahan pengalir yang terletak di dalam kawasan magnet. Daya pemacuan dihasilkan menerusi penggunaan elemen-elemen asas sistem seperti stator, rotor dan penggosok. Pemacu elektrik tergolong daripada jenis motor dc, motor pelangkah dan motor tanpa gosok (*brushless motor*) yang mempunyai berbagai bentuk dan keupayaan. Pemacu elektrik digunakan secara meluas dalam sistem robot industri oleh kerana ia mempunyai beberapa kelebihan iaitu [3]:

- Ringan dan tidak memerlukan ruang yang besar
- Ketepatan dan kebolehulangan yang tinggi
- Operasinya secara relatif senyap dan bersih
- Senang diselenggara dan dibaiki
- Amat sesuai digandingkan dengan alat kawalan elektronik

2.3.1.4 Sistem Penghantar

Sistem penghantar berfungsi memindahkan pergerakan pemacu dalam bentuk linear atau putaran, ke komponen-komponen robot seperti sendi-sendi rangkai, pergelangan ataupun '*end-effector*'. Ia juga membenarkan jenis pergerakan ditukar dari bentuk linear ke bentuk putaran ataupun sebaliknya. Pergerakan linear dihasilkan oleh komponen-komponen seperti rak dan pinan, skru dan nut, skru gelas bebola, hidraulik silinder atau pneumatik silinder. Penggunaan pemacu gear, pemacu harmonik, gelas dan tali pinggang pemasaan (*timing belt*) pula menghasilkan pergerakan bersudut atau putaran.

2.3.2 Konfigurasi Robot

Konfigurasi robot industri pada amnya menjelaskan perihalan dan spesifikasi mengenai konfigurasi sendi. Ia juga mempunyai perkaitan rapat dengan sifat (*features*) kinematik dan/atau struktur, darjah kebebasan, julat perjalanan sendi dan jenis pemacu robot.

Berdasarkan konfigurasi sendi, robot telah dibahagikan kepada lima kategori utama iaitu kartesian, silinder, polar, bersendi mendatar dan bersendi menegak [11]. Jadual 2.2 menyenaraikan jenis-jenis sendi bagi setiap kategori robot. P dirujuk kepada sendi prismatik manakala R mewakili sendi revolut.

Selain dari kategori robot yang disebutkan di atas, terdapat juga kategori robot lain yang berbeza konfigurasi umumnya dari segi struktur mekanikal, jenis sendi yang digunakan serta cara pergerakannya. Robot-robot tersebut ialah robot pendular, gantri, *spine* dan mobil.