

**REKABENTUK DAN ANALISIS SISTEM PENGAWALAN
BAGI SEBUAH KENDERAAN BAWAH-AIR**

oleh

MOHAMED YUSOF BIN RADZAK

**Tesis ini diserahkan untuk memenuhi
keperluan bagi Ijazah Sarjana Sains**

Januari 2005

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pemurah lagi Maha Penyayang, saya bersyukur kerana dengan limpah kurnia-Nya dapat saya menjalankan projek penyelidikan serta menyiapkan penulisan tesis ini dengan jayanya.

Pada kesempatan ini saya ini mengucapkan ucapan penghargaan dan jutaan terima kasih saya kepada penyelia utama iaitu Dr. Mohd Rizal Bin Arshad. Beliau telah memberikan saya pertolongan yang begitu bermakna. Dorongan dan nasihat beliau menjadi sumber motivasi kepada saya untuk menjalankan penyelidikan seperti telah dirancang.

Ucapan terima kasih ini juga ditujukan kepada juruteknik-juruteknik yang bertugas di Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik dan Elektronik serta Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik yang menyumbangkan pertolongan. Tidak lupa kepada rakan-rakan di Makmal Penyelidikan Robotik yang juga turut membantu. Tanpa jasa dan pertolongan mereka sudah tentu saya tidak akan dapat menyiapkan projek penyelidikan ini dengan jayanya.

Tidak lupa juga kepada kedua ibubapa. Doa dan perhatian mereka akan sentiasa diingati hingga akhir hayat. Semoga Allah merahmati mereka seperti mana mereka mengasihiku semasa kecil.

BAB 3 - PERMODELAN MATEMATIK KENDERAAN BAWAH-AIR	29
3.1 Pengenalan	29
3.2 Rumus dan Analisa Kinematik dan Dinamik Kenderaan Bawah-air	31
3.2.1 Kerangka Rujukan Kenderaan	31
3.2.2 Analisis Kinematik Kenderaan Bawah-Air	33
3.2.3 Analisis Sistem Dinamik Kenderaan Bawah-Air	36
3.2.4 Daya Dan Momen Tujahan Yang Dijana Oleh Motor Pendorong.	45
3.3 Model Subsystem-subsystem Kenderaan Bawah-air USM-AUV	48
3.3.1 Sistem Kawalan Kedalaman	49
3.3.2 Sistem Kawalan Kelajuan	52
3.4 Rumusan Bab.	53
 BAB 4 - REKABENTUK KENDERAAN BAWAH-AIR USM-AUV DAN SISTEM KAWALAN	 54
4.1 Pengenalan	54
4.2 Rekabentuk Kenderaan Bawah-Air USM-AUV	55
4.2.1 Kenderaan USM-AUV	55
4.2.2 Model 3-D Kenderaan USM-AUV.	57
4.2.3 Perkakasan Mekanikal Kenderaan USM-AUV	58
4.2.4 Sistem Kuasa dan Pendorongan	59
4.3 Rekabentuk Sistem Kawalan	61
4.3.1 Sistem Kawalan	61
4.3.2 Pendekatan Kaedah Kawalan Keadaan Ruang	62
4.3.2.1 Model Keadaan Ruang	62
4.3.2.2 Konsep Kebolehkawalan Dan Kebolehceraipan	64

4.3.3	Kaedah Peletakan Kutub	66
4.3.3.1	Pengenalan	66
4.3.3.2	Faktor Pemilihan Kutub-kutub	69
4.3.3.3	Langkah-Langkah Rekabentuk Kaedah Peletakan Kutub	71
4.3.4	Rekabentuk Pencerap Keadaan	76
4.3.5	Rekabentuk Pengawal Suapbalik dengan Gabungan Pencerap Keadaan	78
4.4	Rumusan Bab	81
 BAB 5 - KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN		82
5.1	Pengenalan	82
5.2	Keputusan Rekabentuk Kenderaan Bawah-Air USM-AUV	83
5.2.1	Kenderaan Bawah-Air USM-AUV	83
5.2.2	Analisa Jisim Kenderaan USM-AUV	84
5.2.3	Ujian ke atas kenderaan USM-AUV	85
5.3	Keputusan Simulasi Rekabentuk Sistem Pengawal	87
5.3.1	Keputusan Rekabentuk Sistem Pengawal	87
5.3.2	Sistem Kawalan kedalaman	88
	5.3.2.1 Rekabentuk Pengawal Suapbalik Keadaan untuk Sistem Kedalaman	88
	5.3.2.2 Rekabentuk Pencerap Keadaan Bagi Sistem Kawalan Kedalaman	104
5.3.3	Sistem Kawalan Kelajuan	107
	5.3.3.1 Rekabentuk Pengawal Suapbalik Keadaan untuk Sistem Kawalan Kelajuan	107

5.3.3.2	Rekabentuk Pencerap Keadaan untuk Sistem Kawalan Kelajuan	114
5.4	Perbincangan	116
5.4.1	Sistem Kawalan Kedalaman	116
5.4.2	Sistem Kawalan Kelajuan	118
5.5	Rumusan Bab	118
BAB 6 - KESIMPULAN DAN CADANGAN LANJUTAN		120
6.1	Kesimpulan	120
6.2	Cadangan Lanjutan	123
RUJUKAN		125
LAMPIRAN A: Lukisan 3-D Kenderaan USM-AUV Menggunakan Perisian Solidwork®		133
LAMPIRAN B: Imej-Imej Kenderaan USM-AUV Yang Telah Direkabentuk		135
LAMPIRAN C: Kos Kasar Perbelanjaan Untuk Menghasilkan Struktur Mekanikal Kenderaan USM-AUV		138
LAMPIRAN D: Atucara Simulasi Rekabentuk Sistem Pengawalan		139
SENARAI PENERBITAN & SEMINAR		144

SENARAI JADUAL

	Muka Surat
Jadual 1.1 Aplikasi-Aplikasi Yang Berpotensi Untuk Kenderaan Bawah-Air.	3
Jadual 2.1 Pembangunan Model-model Kenderaan Bawah-air Jenis AUV sejak 1990an.	10
Jadual 2.2 Contoh-Contoh Bentuk Binaan Badan Kenderaan Robotik Bawah-Air.	16
Jadual 3.1 Perwakilan Piawai Untuk Kenderaan Bawah-Air.	31
Jadual 4.1 Konfigurasi Mudah Pergerakan Motor Dan Arah Pergerakan Kenderaan.	61
Jadual 5.1 Maklumat analisa Jisim Kenderaan USM-AUV.	84
Jadual 5.2 Sistem kawalan dengan pembolehubah keadaan untuk Kenderaan USM-AUV.	87
Jadual 5.3 Ciri Sambutan Untuk Sistem Pengawal Suapbalik Keadaan Dengan Nbar Menggunakan Nilai-Nilai Kutub Tertentu.	103

SENARAI RAJAH

		Muka surat
Rajah 2.1	Kapal selam pertama Turtle yang dibina pada 1775.	9
Rajah 2.2	Contoh kedudukan <i>propeller</i> dan sirip pada sebuah kenderaan robotik bawah-air.	19
Rajah 2.3	Gambarajah blok proses simulasi yang menunjukkan dinamik sistem, Penapis Kalman (EKF) dan Pengawal <i>Sliding Mode</i> (SM)	26
Rajah 2.4	Gambarajah Blok Pengawal LQR dengan Penganggar Keadaan Kalman	27
Rajah 3.1	Kedudukan Kerangka Rujukan Kenderaan Bawah-air.	32
Rajah 3.2	Putaran Sudut Euler Mengikut Turutan-zyx.	35
Rajah 3.3	Gambarajah Pemetaan Daya Tujahan.	46
Rajah 3.4	Kedudukan Kenderaan Bawah-air dalam Operasi Menyelam.	50
Rajah 4.1	Lakaran Rekabentuk Kenderaan USM-AUV.	56
Rajah 4.2	Imej 3-D Kenderaan USM-AUV menggunakan perisian SolidWork®.	57
Rajah 4.3	Susun Atur Perkakasan Mekanikal dan Elektronik Kenderaan USM-AUV.	59
Rajah 4.4	Motor Pam Yang Telah Diubahsuai Menjadi Motor Pendorong.	60
Rajah 4.5	Gambarajah Blok Sistem Kawalan untuk Kaedah Kawalan Keadaan Ruang.	63
Rajah 4.6	Gambarajah Blok Sistem Dengan Suapbalik Nilai Matrik Gandaan, K .	68
Rajah 4.7	Sambutan Unit Langkah Untuk Sistem Tertib Ke-2	70
Rajah 4.8	Graf Aliran Isyarat Bagi Sistem Yang Mewakili Persamaan 4.8	72

Rajah 4.9	Graf Aliran Isyarat Bagi Sistem Yang Mewakili Persamaan 4.11	73
Rajah 4.10	Pengawal Suapbalik Keadaan Dengan Nilai Nbar.	76
Rajah 4.11	Gambarajah Blok Pencerap Keadaan untuk Sistem Gelung Terbuka.	78
Rajah 4.12	Sistem Suapbalik dengan Gabungan Pengawal dengan Pencerap	79
Rajah 4.13	Gambarajah Terperinci Sistem Kawalan dengan Rekabentuk Pengawal Suapbalik dan Pencerap	81
Rajah 5.1	Prototaip pertama kenderaan USM-AUV.	83
Rajah 5.2	Ujian Pengapungan Yang Telah Dilakukan Terhadap Kenderaan USM-AUV.	85
Rajah 5.3	Ujian Pergerakan Yang Dibuat Di Dalam Kolam Air.	86
Rajah 5.4	Gambarajah Blok Sistem Kawalan Kedalaman Kenderaan USM-AUV.	88
Rajah 5.5	Sambutan Unit Langkah Bagi Sistem Gelung Terbuka Sistem Kawalan Kedalaman.	90
Rajah 5.6	Ciri Sambutan Unit Langkah Untuk Sistem Gelung Tertutup Dengan Pengawal Suapbalik K. Kutub-Kutub Dikehendaki Diletak Pada, $p = [-1, -3, -5, -7]$.	92
Rajah 5.7	Ciri Sambutan Unit Langkah Untuk Sistem Gelung Tertutup Dengan Pengawal Suapbalik K Dan Nbar. Kutub-Kutub Dikehendaki Diletak Pada, $p = [-1, -3, -5, -7]$.	94
Rajah 5.8	Sambutan Unit Langkah Sistem Kawalan Dengan Pengawal K. Kutub-Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada, $p = [-$ $4+5.46i, -4-5.46i, -20, -19]$.	96

Rajah 5.9	Sambutan unit langkah sistem Kawalan dengan pengawal K dan Nbar. Kutub-kutub yang dikehendaki diletakkan pada, $p = [-4+5.46i, -4-5.46i, -20, -19]$.	97
Rajah 5.10	Sambutan Unit Langkah Sistem Kawalan Dengan Pengawal K. Kutub-Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada, $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -40, -39]$.	98
Rajah 5.11	Sambutan Unit Langkah Sistem Kawalan Dengan Pengawal K Dan Nbar. Kutub-Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada, $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -40, -39]$.	99
Rajah 5.12	Sambutan Unit Langkah Sistem Kawalan Dengan Pengawal K. Kutub-Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada, $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -80, -79]$.	101
Rajah 5.13	Sambutan Unit Langkah Sistem Kawalan Dengan Pengawal K Dan Nbar Kutub-Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada, $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -80, -79]$.	102
Rajah 5.14	Graf Sambutan Keluaran Rekabentuk Sebuah Pencerap Keadaan Untuk Sistem Kawalan Kedalaman. Nilai-Nilai Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -40, -39]$.	105
Rajah 5.15	Graf Sambutan Keluaran Rekabentuk Sebuah Pencerap Keadaan Untuk Sistem Kawalan Kedalaman. Nilai-Nilai Kutub Yang Dikehendaki Diletakkan Pada $p = [- 8.0000 - 8.3920i, -8.0000 + 8.3920i, -40, -39]$.	106
Rajah 5.16	Gambarajah Blok Sistem Kawalan Kelajuan Kenderaan USM-AUV.	107

Rajah 5.17	Sambutan Unit Langkah Bagi Sistem Gelung Terbuka Sistem Kawalan Kelajuan.	109
Rajah 5.18	Sambutan sistem dengan pengawal suapbalik. Nilai kutub diletakkan pada $p = -1$.	110
Rajah 5.20	Sambutan sistem dengan pengawal suapbalik. Nilai kutub diletakkan pada $p = -5$.	112
Rajah 5.21	Sambutan sistem dengan pengawal suapbalik dan Nbar. Nilai kutub diletakkan pada $p = -5$.	113
Rajah 5.22	Sambutan Keluaran Rekabentuk Pencerap untuk Sistem Kawalan Kelajuan. Nilai L yang digunakan adalah, $L = 5$.	115
Rajah 5.23	Sambutan Keluaran Rekabentuk Pencerap untuk Sistem Kawalan Kelajuan. Nilai L yang digunakan adalah, $L = 50$.	115

SENARAI KEPENDEKKAN

USM-AUV	<i>USM Autonomous Underwater Vehicle</i>
MIMO	<i>Multi Input Multi Output</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
TLDM	Tentera Laut Di Raja Malaysia
LKIM	Lembaga Kemajuan Ikan Malaysia
JPS	Jabatan Pengairan dan Saliran
TNB	Tenaga Nasional Berhad
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
DOM	<i>Degree of Mobility</i>
SNAME	<i>The Society of Naval architects and Marine Engineers</i>
3-D	3-Dimensi
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>

SENARAI SIMBOL

q	Vektor halaju.
x	Vektor kedudukan
$J(x)$	Matrik transformasi.
$T_{\Theta}(\Theta)$	Matriks translasi.
$R_b^e(\Theta)$	Matriks putaran (putaran pada tiga paksi x-y-z).
M	Matriks inersia sistem (termasuk penambahan jisim).
$C(q)$	Matriks <i>coriolis</i> dan <i>centripetal</i> (termasuk penambahan jisim).
$D(q)$	Matriks daya redaman hidrodinamik.
$g(x)$	Vektor daya dan momen graviti/ketimbangan.
τ	Vektor kawalan daya dan momen.
S	Matriks <i>skew-symmetric</i> .
I	Matriks identiti.
I_o	Momen inersia.
r_g^b	Jarak antara titik pusat kerangka rujukan bumi, O dengan titik graviti kenderaan, CG.
M_A	Matriks penambahan jisim.
C_A(q)	Matriks <i>coriolis</i> dan <i>centripetal</i> disebabkan oleh penambahan jisim.
W	Berat kenderaan.
B	Daya ketimbangan.
m	Jisim kenderaan.
g	Pecutan graviti bumi
ρ	Ketumpatan air.
∇	Isipadu air yang diganti oleh kenderaan.
U	Daya tujahan yang dijanakan oleh motor pendorong.
L	Vektor kedudukan daya tujahan.

REKABENTUK DAN ANALISIS SISTEM PENGAWALAN BAGI SEBUAH KENDERAAN BAWAH-AIR

ABSTRAK

Teknologi kenderaan bawah-air telah menjadi sebuah alat yang penting di dalam aplikasi maritim disebabkan ianya mempunyai keupayaan digunakan bagi pelbagai jenis tugas seperti pemeriksaan saluran paip, pengawasan persekitaran bawah-air dan operasi ketenteraan. Di dalam projek penyelidikan ini, terbitan model matematik pergerakan kenderaan bawah air dilakukan dengan merujuk kepada sebuah rekabentuk kenderaan bawah-air yang baru. Kenderaan bawah-air yang baru ini ataupun *USM Autonomous Underwater Vehicle (USM-AUV)* telah menggunakan dua pasang motor pendorong bagi menjanakan daya dorongan. Dengan menggunakan konfigurasi susunan motor pendorong kenderaan *USM-AUV*, sebuah model matematik pergerakan kenderaan bawah-air yang baru telah dikemukakan. Model matematik ini adalah penting untuk rekabentuk sistem pengawalan kenderaan. Sistem pengawalan yang telah direkabentuk menggunakan pendekatan keadaan ruang disebabkan oleh kesesuaiannya untuk sistem tidak linear dan juga sistem berbilang masukan berbilang keluaran. Skim pengawal suapbalik keadaan yang menggunakan pendekatan keadaan ruang telah dipilih sebagai penyelesaian kepada masalah sistem pengawalan. Masalah kawalan yang telah direkabentuk dibahagikan kepada dua bahagian yang berasingan iaitu sistem kawalan kedalaman dan kawalan kelajuan. Analisa prestasi sistem pengawalan yang telah rekabentuk dilakukan menggunakan perisian MATLAB/Simulink. Keputusan yang memuaskan telah diperolehi daripada simulasi yang dibuat terhadap sistem pengawalan yang telah direkabentuk. Dapatan yang diperolehi menunjukkan sistem pengawal suapbalik untuk sistem kawalan kedalaman dan sistem kawalan kelajuan dapat menghasilkan prestasi sambutan yang terbaik.

DESIGN AND ANALYSIS OF A CONTROLLER SYSTEM FOR AN UNDERWATER VEHICLE

ABSTRACT

Underwater vehicles technology has become an important tool for maritime application due to its capability in performing a variety of tasks such as pipeline cable inspection, undersea environmental monitoring and military operations. In this research project, a derivation of mathematical model was done by using a new underwater vehicle design as a reference. This new underwater vehicle or USM *Autonomous Underwater Vehicle* (USM-AUV) used two pairs of thruster motors in order to generate the propulsion forces. From the underwater vehicle thrusters' configuration, a new mathematical model of an AUV has been proposed. This mathematical model is crucial in the vehicle controller system design. This test bed vehicle was then utilized in the advanced controller system design. A state space design approach has been used due to the fact that this design approach is suitable for nonlinear system and multi input multi output (MIMO) set-up. The full state feedback control scheme under the state space design topic was then selected for the controller design. The design problems have been divided to two separate components i.e. depth control and speed control systems. Analysis of the control system performances was conducted in MATLAB/Simulink control simulation software. A satisfactory performance has been achieved from the designed controller system. The result shows that the controller performance for depth control system and speed control system has been achieved.

BAB 1 PENGENALAN

1.1 Pengenalan Umum.

Dua pertiga daripada bentuk muka bumi dunia dipenuhi oleh air. Malaysia merupakan salah sebuah negara yang bertuah kerana rekabentuk sebahagian muka buminya yang dikelilingi oleh samudera yang luas. Hasil laut yang menyumbang kepada sumber ekonomi melimpah ruah ditambah pula dengan anugerah lombong-lombong emas hitam yang terdapat di sekitar perairan lautnya. Rekabentuk geografi muka bumi Malaysia yang dikelilingi oleh lautan yang luas inilah merupakan faktor yang penting yang menjadi titik tolak kepada penjana idea untuk menjalankan satu penyelidikan berkaitan dengan sistem kenderaan robotik bawah-air. Selain itu, penguasaan teknologi yang telah diterokai secara meluas oleh pengkaji-pengkaji asing sekarang ini menguji kepada penyelidik tempatan supaya menjalankan penyelidikan tentang sistem robotik kenderaan bawah-air.

Penyelidikan ini juga dilakukan untuk memenuhi hasrat wawasan 2020 melalui sembilan cabaran yang salah satunya iaitu ingin mewujudkan masyarakat saintifik dan progresif, mempunyai daya cipta tinggi dan memandang ke depan, yang bukan sahaja menjadi pengguna teknologi tetapi juga menyumbang kepada tamadun sains dan teknologi masa depan. Terdapat potensi yang besar yang boleh diperolehi selepas kenderaan-kenderaan robotik bawah air yang dibina dan dikaji itu dikomersialkan. Whitcomb (2000) telah menerangkan tentang sumbangan yang boleh didapati daripada penyelidikan yang dibuat terhadap sistem kenderaan robotik bawah-air. Antara bidang atau aplikasi yang berpotensi untuk diceburi adalah seperti aplikasi pemeriksaan dan tinjauan, bidang pembinaan dan pembaikan struktur dalam laut yang melibatkan kedalaman di bawah 1000 meter dan perlombongan minyak dan gas di luar pantai. Kegunaan kenderaan bawah-air ini akan membantu manusia dalam meneroka

dunia gelap laut yang penuh misteri. Kerja-kerja bahaya yang perlu dilakukan oleh manusia akan menjadi lebih mudah dengan bantuan kenderaan bawah-air ini.

Kajian yang telah dilakukan oleh Yuh (2000) mengemukakan satu senarai aplikasi-aplikasi berpotensi yang melibatkan kenderaan robotik bawah-air. Aplikasi-aplikasi yang berpotensi menggunakan kenderaan robotik bawah-air yang dinyatakan oleh Yuh disenaraikan seperti dalam Jadual 1.1. Daripada penerangan dan penjelasan berkenaan aplikasi-aplikasi yang melibatkan kenderaan bawah-air ini, secara ringkasnya terdapat tiga tugas utama yang perlu dilakukan oleh sesebuah kenderaan bawah-air ini. Tugas-tugas tersebut adalah seperti:

- i) Membawa kelengkapan alat penderia saintifik.
- ii) Menyelam sepanjang perjalanan melibatkan ruang tiga dimensi samada perjalanan itu telah ditetapkan ataupun jentera robot perlu menentukan semula perjalanan sebagai misi tambahan (berdasarkan reaksi terhadap persekitaran tempat operasi).
- iii) Mengumpulkan data untuk tujuan proses lanjutan.

Jadual 1.1: Aplikasi-Aplikasi Yang Berpotensi Untuk Kenderaan Bawah-Air.

Bil.	Bidang.	Contoh Aplikasi.
1.	Sains.	<ul style="list-style-type: none"> i. Proses pemetaan bentuk permukaan lantai laut. ii. Pensampelan geologikal. iii. Pengesanan yang cepat ke atas aktiviti oseanografi dan geoterma.
2.	Persekitaran.	<ul style="list-style-type: none"> i. Pengawasan jangka panjang (seperti kebocoran radiasi, pencemaran laut). ii. Pemulihan alam sekitar. iii. Pemeriksaan untuk struktur-struktur bawah laut termasuklah saluran paip, kabel-kabel elektrik, empangan dan sebagainya.
3.	Ketenteraan.	<ul style="list-style-type: none"> i. Pencarian dan pemusnahan periuk api. ii. Alat bantu kepada operasi kapal selam. iii. Alat tinjauan keselamatan perairan laut.
4.	Perlombongan di lautan dan Industri Minyak.	<ul style="list-style-type: none"> i. Proses tinjauan dan penilaian sumber di dasar lautan. ii. Pembinaan dan pemeliharaan struktur bawah-air.
5.	Aplikasi-aplikasi yang lain.	<ul style="list-style-type: none"> i. Pemeriksaan dan pembaikan badan kapal. ii. Pemeriksaan logi kuasa nuklear. iii. Perhubungan bawah-air. iv. Industri pelancongan sebagai pemandu pelancong bawah-air. v. Industri perikanan.

1.2 Objektif Penyelidikan.

Projek penyelidikan ini dibuat adalah berdasarkan objektif-objektif tertentu. Secara umumnya, penyelidikan ini dilakukan adalah untuk menghasilkan sebuah prototaip sistem kenderaan bawah-air yang cekap dan ekonomikal.

Secara khususnya, objektif penyelidikan ini adalah seperti berikut:

- a) Merekabentuk dan menganalisis sebuah sistem kawalan yang cekap untuk sebuah kenderaan bawah-air.
- b) Merekabentuk dan membangunkan sebuah sistem kenderaan bawah-air yang ekonomikal.

Kedua-dua objektif di atas adalah saling berkaitan antara satu sama lain. Proses rekabentuk sistem kawalan memerlukan sebuah model matematik pergerakan kenderaan bawah-air. Oleh itu sebuah kenderaan bawah-air turut direkabentuk untuk tujuan itu.

1.3 Skop Penyelidikan.

Seperti yang diterangkan dalam bab 1.2, objektif utama penyelidikan ini adalah untuk merekabentuk dan menganalisis sebuah sistem kawalan yang cekap. Oleh kerana penyelidikan ini masih diperingkat awal, faktor-faktor gangguan seperti gelombang dan arus lautan tidak dipertimbangkan dalam proses rekabentuk sistem kawalan ini. Ujian simulasi sistem kawalan yang direkabentuk dibuat menggunakan perisian MATLAB. Bagi memudahkan proses simulasi, sebuah model matematik pergerakan kenderaan bawah air perlu diterbitkan. Model matematik ini adalah penting bagi membangunkan sebuah sistem kawalan yang cekap. Kesukaran untuk mendapatkan maklumat dan rujukan yang lengkap mengenai kenderaan bawah air yang sedia ada, menyebabkan

penyelidik perlu merekabentuk kenderaan bawah-airnya sendiri. Oleh itu, sebuah kenderaan bawah-air yang diberi nama USM-AUV telah direkabentuk.

Rekabentuk kenderaan ini dibuat secara kasar memandangkan ia hanya digunakan untuk menerbitkan model matematik pergerakan kenderaan bawah-air. Oleh sebab kemudahan alatan yang terhad dan tempoh masa yang singkat, kenderaan yang dihasilkan terdiri daripada struktur asas mekanikal dan dilengkapi dengan litar asas elektrik bagi membolehkan ia beroperasi sahaja. Aksesori lain seperti sistem lengan robotik, sistem penderiaan dan peranti pemanduan arah tidak diletakkan kerana melibatkan kos yang mahal. Selain daripada projek penyelidikan ini, kenderaan ini juga digunakan untuk projek penyelidikan lain yang berkaitan dengan sistem bawah-air.

1.4 Sumbangan Penyelidikan.

Penyelidikan dan teknologi kenderaan bawah air merupakan sebuah bidang yang masih baru untuk diterokai di Malaysia. Dengan potensi yang luas yang boleh disumbangkan oleh penyelidikan yang dibuat, projek penyelidikan ini bakal memberikan satu sumbangan yang besar kepada negara. Antara organisasi atau sektor yang boleh mendapat manfaat daripada projek ini adalah:

- i) Secara langsung
 - Industri yang melibatkan aplikasi marin seperti membaik-pulih kapal dan pemeriksaan serta baik-pulih struktur bawah-air. Contoh: Malaysian Shipping Corporation.
 - Industri perlombongan minyak di luar pantai. Menglibatkan syarikat-syarikat minyak seperti PETRONAS dan SHELL.

- Tentera Laut Di raja Malaysia (TLDM). Kegunaan di dalam operasi ketenteraan dan untuk mempertingkatkan kemampuan pertahanan marin negara.
- ii) Secara tidak langsung.
- Institusi pengajian tinggi untuk tujuan kajian dan pendidikan
 - Institusi penyelidikan marin ataupun sungai seperti Lembaga Kemajuan Ikan Malaysia (LKIM) dan Jabatan Pengairan dan Saliran (JPS)
 - Tenaga Nasional Berhad (TNB) untuk tujuan pemeriksaan empangan hidroelektrik.
 - Negara bagi membantu menggalakkan perkembangan dan pemindahan teknologi sistem kenderaan bawah-air.
 - Industri perlancongan.
 - Industri telekomunikasi.

1.4 Susunan Kandungan Tesis.

Penulisan tesis ini dibuat dengan membahagikan isi kandungannya kepada bab-bab tertentu. Kandungan penulisan tesis ini seterusnya selain Bab 1 akan diterangkan mengikut susunan berikut:

Bab 2: Kajian Latar Belakang. Tinjauan terhadap kajian-kajian lepas yang telah dilakukan terhadap sistem kenderaan bawah-air diterangkan di dalam bab ini. Antara perkara yang diterangkan adalah berkenaan perkembangan teknologi kenderaan bawah-air, komponen yang terlibat untuk menghasilkan sebuah kenderaan bawah-air dan kenderaan-kenderaan bawah-air yang sedia ada. Seterusnya di dalam bab ini juga

akan dijelaskan tentang teknik dan sistem kawalan yang telah digunakan untuk mengawal kenderaan bawah-air.

Bab 3: Permodelan Matematik Kenderaan Bawah-air. Di dalam bab ini, perwakilan matematik untuk pergerakan kenderaan bawah-air telah diterbitkan. Model matematik ini digunakan untuk proses merekabentuk sistem kawalan kenderaan. Bab ini diakhiri dengan penerbitan model keadaan ruang untuk sistem kawalan kedalaman dan sistem kawalan kelajuan bagi kenderaan USM-AUV.

Bab 4: Reka bentuk Kenderaan USM-AUV dan Sistem Kawalan. Bab ini mengandungi maklumat berkenaan reka bentuk kenderaan bawah-air yang telah dibina. Penerangan tentang komponen-komponen yang terlibat diterangkan dengan jelas. Di dalam bab ini juga, sistem kawalan yang telah direkabentuk untuk kenderaan USM-AUV telah diterangkan secara terperinci. Sistem kawalan yang digunakan menggunakan pendekatan teori kawalan moden. Bagi mengawal kenderaan USM-AUV ini, skim pengawal suap balik keadaan telah digunakan

Bab 5. Keputusan dan Perbincangan. Di dalam bab ini, keputusan yang diperolehi hasil penyelidikan yang dibuat telah ditunjukkan. Keputusan rekabentuk kenderaan bawah-air yang telah dibina dan juga keputusan simulasi sistem kawalan yang telah direkabentuk ditunjukkan secara terperinci. Kemudian perbincangan terhadap keputusan yang diperolehi dijelaskan pada penghujung bab.

Bab 6. Kesimpulan dan Cadangan Lanjutan. Bab ini mengandungi kesimpulan dan cadangan kajian lanjutan bagi projek penyelidikan yang telah dijalankan.

BAB 2

KAJIAN LATAR BELAKANG.

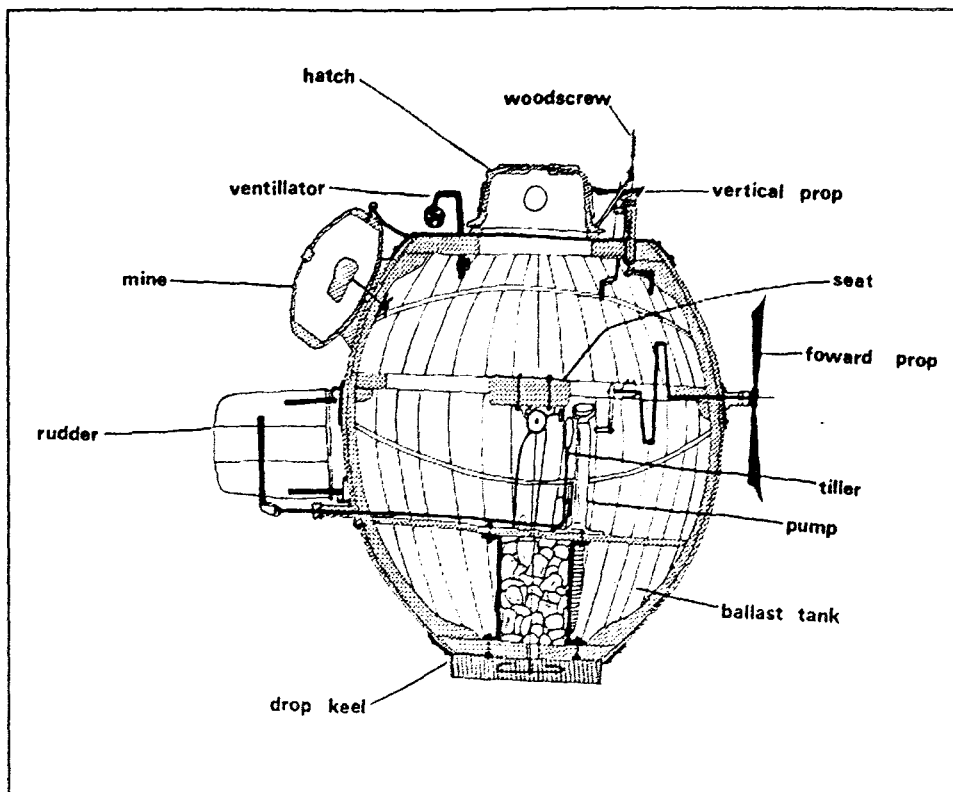
2.1 Pengenalan Umum.

Lautan adalah sebahagian daripada bumi yang luas untuk dijelajahi dan dikaji. Oleh yang demikian sebuah jentera robotik bawah-air perlu dihasilkan untuk membantu manusia menjelajah lautan yang luas ini. Kajian lanjut berkenaan sistem kenderaan bawah-air ini akan membantu manusia dalam proses penyelidikan dengan cara yang lebih efektif dan melibatkan penggunaan kos yang ekonomikal. Bab ini menerangkan secara terperinci berkenaan teknologi kenderaan bawah-air ini dan komponen-komponen yang penting untuk menghasilkan sebuah kenderaan bawah-air yang cekap. Seterusnya bab ini juga menjelaskan tentang teknik dan sistem kawalan yang telah digunakan untuk mengawal kenderaan bawah-air ini.

2.2 Kenderaan Bawah-Air.

2.2.1 Sejarah Perkembangan Rekabentuk Kenderaan.

Era pembangunan kenderaan bawah-air bermula apabila sebuah kapal selam pertama yang bernama *Turtle* dibina pada 1775 di Saybrook, Connecticut (Blidberg, 2001). Kapal selam ini dihasilkan oleh David Bushell dengan bantuan saudaranya Ezra. Binaan badan *Turtle* yang berbentuk seperti telur ini diperbuat daripada kayu (lihat Rajah 2.1) dan mampu menampung seorang pengemudi di dalamnya. Tugas pengemudi ini adalah untuk mengendalikan kadar kemasukan air ke dalam tangki *ballast* semasa proses menyelam dan mengeluarkan air menggunakan pam semasa proses mengapung ke permukaan air. Kapal selam *Turtle* ini telah mencipta sejarah sebagai sebuah kapal selam pertama yang terlibat dalam peperangan melibatkan angkatan laut.



Rajah 2.1: Kapal selam pertama Turtle yang dibina pada 1775 (David Bushnell's American Turtle, 2003)

Bertitik tolak daripada bermulanya penghasilan kenderaan bawah-air, perkembangan teknologi pembuatan kapal selam pun bermula untuk pelbagai kegunaan, khususnya untuk kegunaan ketenteraan. Tidak lama selepas itu selari dengan perkembangan teknologi pembuatan kapal selam, teknologi pembinaan peluru berpandu pun mula berkembang luas. Daripada teknologi penciptaan peluru berpandu inilah menjadi pencetus awal idea kepada pembinaan kenderaan bawah-air automatik (*Autonomous Underwater Vehicle-AUV*). Di dalam Yuh (2000) didapati lebih daripada 46 buah model kenderaan bawah-air daripada jenis AUV telah dibina. Sebahagian model kenderaan telah dihasilkan sejak tahun 1990 dan ditunjukkan dalam Jadual 2.1. Kebanyakan daripada model-model ini digunakan untuk kajian pemeriksaan.

Jadual 2.1: Pembangunan Model-model Kenderaan Bawah-air jenis AUV sejak 1990an.

Tahun.	Model.	Kegunaan.	Kedalaman, (m)	Pengeluar.
1990	UROV-2000	Tinjauan Dasar Laut.	2000	JAMSTEC, Yokosuka, Japan
1990	No Name	Platform Ujian.	10	JAMSTEC, Yokosuka, Japan
1990	Musaku	Platform Ujian.	10	JAMSTEC, Yokosuka, Japan
1990	UUV (II)	Platform Ujian.	NA	Draper Laboratory, Cambridge, MA
1991	AROV	Pemetaan dan Pencarian.	NA	NA SUTEC, Linkoping, Sweden
1992	AE1000	Pemeriksaan Kabel.	1000	KDD, Japan
1992	Twin Burger	Platform Ujian.	50	IIS, University of Tokyo, Tokyo, Japan
1992	ALBAC	Ruang Air.	300	IIS, University of Tokyo, Tokyo, Japan
1992	MAV	Penghapus Periuk Api.	NA	DARPA, Washington, DC
1992	Doggie	Tinjauan Dasar Laut.	6000	Yard Ltd., Glasgow, Scotland
1992	Dolphin	Pengawasan.	6000	Yard Ltd., Glasgow, Scotland
1992	ABE	Tinjauan Dasar Laut.	6000	WHOI, Woods Hole, MA
1992	Phoenix	Platform Ujian.	10	Naval Postgraduate School, Monterey, CA
1992	ODIN	Platform Ujian.	30	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI
1993	Ocean Voyager II	Misi Kajian Sains.	6000	Florida Atlantic University, Boca Raton, FL
1993	Odyssey II	Misi Kajian Sains.	6000	MIT Sea Grant, Cambridge, MA
1993	ARUS	Tinjauan Dasar Laut.	NA	EUREKA (European Consortium)
1993	ODAS	Tinjauan.	900	Marconi Underwater Systems, UK
1993	Hugin	Tinjauan.	600	Norwegian Defense Establishment, Norway
1993	Marius	Tinjauan.	600	IST, Lisbon, Portugal (w/France and Denmark)
1994	Large-D UUV	Platform Ujian/Ketenteraan.	300	Naval Undersea Warfare Center, Newport, RI
1994	OTTER	Platform Ujian.	1000	MBARI, CA
1994	Explorer	Pemeriksaan Saluran Paip.	1000	Shenyang Institute of Automation, China

Jadual 2.1: sambungan...

1995	ODIN II	Kawasan Cetek	30	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI
1997	REMUS	Tinjauan.	150	Woods Hole Oceanographic Institution, MA
1997	VORAM	Platform Ujian.	200	Korea Research Inst. of Ships & Ocean Engr., Korea
1997	Solar AUV	Platform Ujian.	NA	Autonomous Undersea Systems Institute, NH
1998	AUV-HM1	Platform Ujian.	NA	National Taiwan University, Taiwan
1998	AMPS	Ketenteraan.	200	Pacific Missile Range Facility, Kekaha, HI
1998	SIRENE	Pengangkut Bawah-air.	4000	DESIBEL, European project led by IFREMER, France
1999	SAUVIM	Ketenteraan.	6000	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI
2000	MARIDAN AUV	Ketenteran dan Industri Luar Pantai.	1500	Atlas Maridan ApS, Denmark
2001	INFANTE AUV	Tinjauan	500	Dynamical Systems and Ocean Research (DSOR) Lab, Institute for Systems and Robotics (ISR) of Lisbon
2001	CETUS	Pengesan Periuk Api	4000	MIT Sea Grant's Autonomous Underwater Vehicles Lab
2003	r2D4	Tinjauan Dasar Laut.	4000	Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
2004	NTU-AUV	Tinjauan Dasar Laut.	100	Nanyang Technological University, Singapore

Secara amnya, kenderaan bawah air ini dikelaskan kepada dua kelas yang besar (Conway, 1986, Jarry, 1986) iaitu dengan kawalan manusia (*manned*) dan tanpa kawalan manusia (*unmanned*). Kenderaan bawah-air yang menggunakan kawalan manusia pula boleh dibahagikan kepada dua kelas yang lebih kecil. Dua kelas yang kecil itu adalah kapal selam ketenteraan dan kapal selam bukan ketenteraan. Seperti yang telah diketahui umum kapal selam ketenteraan ini digunakan untuk aktiviti-aktiviti ketenteraan manakala kapal selam bukan ketenteraan digunakan untuk aktiviti penerokaan dan penyiasatan di dalam laut.

Bagi kenderaan bawah-air yang beroperasi tanpa manusia pula, ia dikelaskan kepada tiga kelas yang utama (Blidberg, 2001, Penne, 2002, Bohm & Jensen, 1997); iaitu:

- a) Kenderaan penunda (*towed vehicles*).
- b) Kenderaan bawah-air kawalan jauh (ROV)
- c) Kenderaan bawah-air autonomus (AUV).

Kenderaan penunda biasanya beroperasi dengan bantuan kapal berhampiran dengannya. Ia beroperasi seperti sebuah pelantar yang dipenuhi dengan bermacam-macam penderia yang diletakkan pada kerangka utamanya. Kenderaan jenis kedua iaitu kenderaan bawah-air kawalan jauh (ROV) pula adalah sebuah kenderaan bawah-air yang beroperasi dengan bantuan sejenis kabel pengikat (Bohm & Jensen, 1997). Kabel sambungan ini disambungkan kepada sebuah kapal induk ataupun kepada sebuah stesen operasi yang terdapat di daratan. Tugas kabel sambungan ini adalah untuk membekalkan sumber kuasa dan sebagai alat komunikasi kepada kenderaan. Pergerakan kenderaan jenis ROV ini dikawal oleh seorang pengendali di daratan. Tidak seperti kenderaan jenis ROV, kenderaan jenis AUV pula beroperasi tanpa bantuan kabel penyambung. Kenderaan jenis AUV ini beroperasi tanpa bantuan

manusia dengan bekalan kuasa yang dibawa sendiri. Operasi AUV diprogramkan terlebih dahulu untuk menyelesaikan sesuatu tugas sebelum ia dilepaskan ke dalam air.

Terdapat juga kenderaan bawah-air yang direkabentuk secara hibrid (Yeoger *et.al*, 1992, Bird, 2004, Weiss, 2004). Di dalam Bohm and Jensen (1997), menyatakan bahawa kenderaan bawah-air hibrid adalah merupakan sebuah kenderaan yang dibina hasil kombinasi antara kenderaan jenis ROV dan juga kenderaan jenis AUV . Sebuah contoh kenderaan hibrid adalah PURLII (Bird, 2004). Kenderaan ini boleh beroperasi dalam mod dwi-kawalan. Kawalan oleh manusia boleh dilaksanakan melalui kabel fiber optik dan kenderaan ini juga boleh beroperasi tanpa kawalan manusia. Kuasa bateri masih terdapat di dalam kenderaan bagi membolehkan PURL beroperasi tanpa kawalan manusia. Secara umumnya, walaupun kenderaan bawah-air mempunyai perbezaan rekabentuk daripada pelbagai segi tetapi ianya tetap berpotensi untuk kegunaan aplikasi-aplikasi yang sama seperti dalam Jadual 1.1 pada Bab 1.

2.2.2 Sistem Kenderaan Bawah-Air.

Sistem kenderaan robotik bawah-air ini terbahagi kepada beberapa subsistem yang penting (Fossen & Balchen, 1991, Brutzman *et.al*, 1998, Patterson & Sias, 1998, Amat *et.al*, 1999, Robert *et.al*, 2000). Antaranya:

- i. Struktur kerangka dan binaan badan kenderaan.
- ii. Sistem kawalan kenderaan.
- iii. Sistem pendorongan.

Selain daripada subsistem-subsistem yang disebutkan di atas terdapat juga sistem sokongan yang perlu dititikberatkan dalam proses untuk merekabentuk sebuah kenderaan bawah-air. Sistem-sistem sokongan yang terlibat adalah seperti sistem

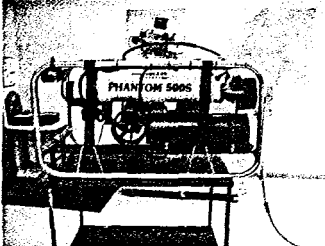
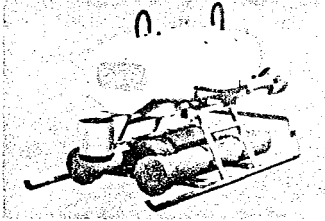
kuasa, sistem penderia dan sistem komunikasi. Terdapat juga aksesori tambahan yang boleh dipadankan kepada sistem kenderaan bawah-air iaitu lengan robot dan alat pemotong. Penggunaan aksesori tambahan ini bergantung kepada operasi yang hendak dilakukan oleh sesebuah kenderaan bawah-air.

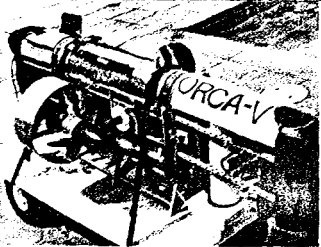
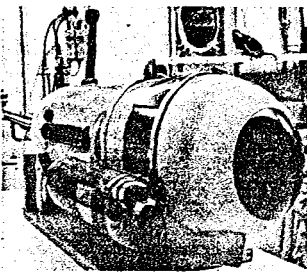

Daripada pemerhatian semasa proses kajian latarbelakang dilakukan menunjukkan bahawa terdapat tiga bentuk binaan yang telah digunakan untuk merekabentuk kenderaan bawah-air ini. Setiap konsep binaan badan itu mempunyai kelebihan masing-masing dan bergantung kepada aplikasi yang hendak dilakukan oleh kenderaan bawah-air yang dibina. Antara konsep rekaan bentuk binaan badan yang biasa digunakan adalah seperti bentuk segiempat (Liddle, 1986, Amat *et.al* 1996, Folcher & Rendas, 2001), bentuk seperti 'peluru berpandu' ataupun silinder (Thorleifson *et.al* 1997, Robert *et.al*, 2000, Elgart *et.al*, 2001, Makeev *et.al*, 2003, Balasuriya *et.al*, 2003) dan berbentuk bulat (Choi *et.al*, 1995). Kenderaan bawah-air yang sedia ada menggunakan konsep rekabentuk binaan badan yang pelbagai ditunjukkan di dalam Jadual 2.2. Jadual 2.2 menunjukkan konsep bentuk binaan badan kenderaan bawah-air dengan contoh kenderaan bawah air yang berkaitan. Antara bentuk-bentuk binaan badan yang dinyatakan terdapat dua bentuk binaan yang biasa digunakan untuk rekabentuk kenderaan bawah-air. Rekaan berbentuk segiempat biasanya digunakan untuk kenderaan jenis ROV manakala rekaan berbentuk seperti 'peluru berpandu' untuk kenderaan jenis AUV.

Faktor yang menjadi sebab pemilihan rekaan berbentuk segiempat untuk kenderaan jenis ROV disebabkan oleh bentuk ini mudah diubahsuai untuk penambahan aksesori seperti lengan robotik dan alat pemotong. Selain itu, bentuk segiempat ini akan memudahkan kabel pengikat yang disambungkan pada kenderaan untuk dikendalikan. Kenderaan bawah-air jenis AUV pula biasanya menggunakan rekaan binaan badan berbentuk peluru berpandu kerana faktor berikut (Penne, 2002):

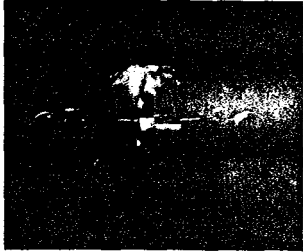
- i. Senang diubahsuai.
- ii. Mudah dikendalikan semasa proses pelancaran dan mendapatkan semula.
- iii. Fleksibel untuk meletakkan modul sistem penerima.
- iv. Stabil pada keadaan kelajuan rendah.

Jadual 2.2: Contoh-Contoh Bentuk Binaan Badan Kenderaan Robotik Bawah-Air.

Bentuk binaan badan.	Contoh-contoh kenderaan.
<p>1. Segiempat.</p>	<p>a) Phantom 500 (Folcher & Rendas, 2001).</p>  <p>Sebuah kenderaan robot bawah-air jenis ROV. Kenderaan ini dihasilkan oleh Deep Ocean Engineering, Palo Alto, USA. Dengan dimensi 1 meter (m) panjang, 0.65 m lebar dan 0.65 m tinggi. Kenderaan seberat 86 kg ini dibina khusus untuk kegunaan penyelidikan dan pendidikan.</p> <p>b) GARBI ROV (Amat <i>et.al</i>, 1996).</p>  <p>Sebuah kenderaan robotik bawah-air daripada jenis ROV. GARBI yang diperbuat daripada bahan berkos rendah seperti gentian fiber ini boleh beroperasi sehingga kedalaman 200 meter. Ia dilengkapi oleh 4 buah <i>thruster</i>. dua buah untuk pergerakan mendatar manakala dua buah lagi untuk pergerakan menegak. Kenderaan ini juga dilengkapi oleh dua buah lengan robot untuk kegunaan manipulasi objek dan tele-operasi. Dimensi kenderaan GARBI ini adalah 1.3 meter panjang, 0.7 meter lebar dan 0.7 meter tinggi. Kelajuan maksimum yang boleh dicapai adalah 3 knot dan jisim kenderaan adalah 150 kg.</p>

<p>2. Peluru Berpandu.</p>	<p>a) ORCA-V (Robert <i>et.al</i>, 2000).</p> <p>Kenderaan ini dihasilkan di <i>Massachusetts Institute of Technology</i>. Idea asal kenderaan ini dibina adalah untuk memasuki perlyertaaan pertandingan kenderaan bawah-air jenis AUV. Dimensi saiz kenderaan ini adalah 1.8 m panjang dan 0.8 m lebar. Berat kenderaan ini pula ialah 50 kg.</p>  <p>b) REMUS (Allen <i>et.al</i>, 1997).</p> <p>Sebuah kenderaan robotik bawah-air daripada jenis AUV yang dibangunkan oleh <i>Wood's Hole Oceanographic Institute (WHOI)</i>. Ia direkabentuk untuk tujuan penyelidikan pada kawasan kedalaman 40 kaki hingga 100 kaki. Dimensi kenderaan ini adalah 62 inci panjang dan berdiameter 7.5 inci. Berat yang diukur sebelum kenderaan dimasukkan di dalam air adalah 80 paun dan boleh beroperasi sehingga kedalaman maksimum 328 kaki. Kelajuan maksimum kenderaan yang boleh dicapai adalah 5.6 knot.</p>  <p>c) Autosub-1 (Millard <i>et.al</i>, 1997).</p> <p>Sebuah kenderaan bawah-air jenis AUV. Dengan dimensi 6.8 m panjang dan berdiameter 0.9 m, jentera AUV ini mampu untuk melakukan operasi menyelam sehingga kedalaman 200 km. Kenderaan ini dihasilkan di Pusat Kajian Lautan Southampton untuk kegunaan kajian sains samudera.</p> 
----------------------------	--

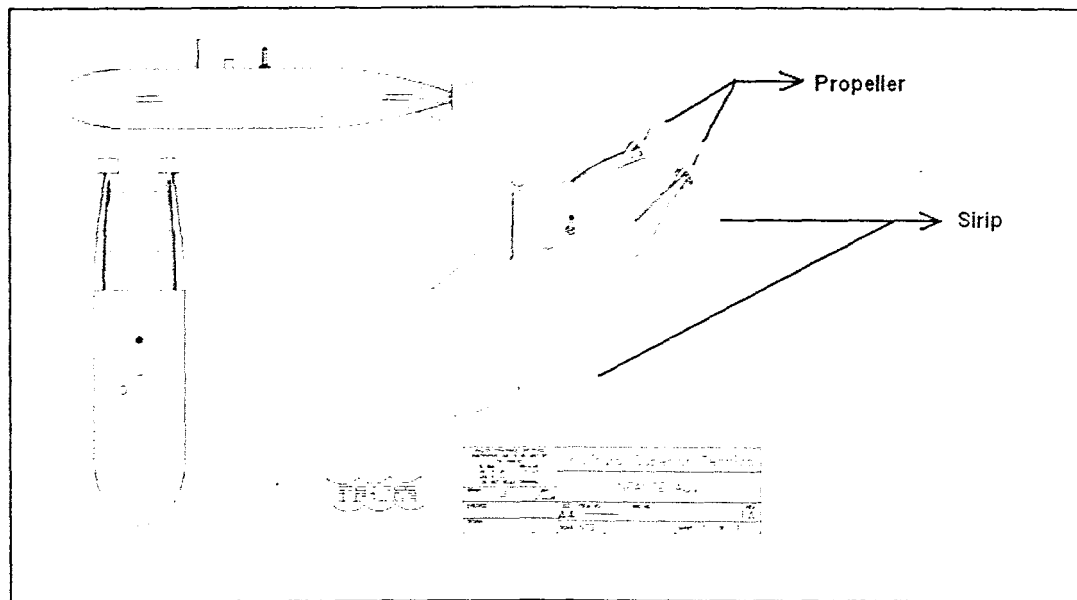
Jadual 2.2: sambungan...

3. Bulat.	<p>a) <i>Omni-Directional Intelligent Navigator (ODIN)</i> (Choi et.al, 1995).</p> <p>ODIN adalah sebuah kenderaan bawah-air daripada jenis AUV yang dihasilkan di Autonomous Systems Laboratory, Universiti Hawaii. Rekabentuk kenderaan berbentuk hampir bulat ini mempunyai diameter 0.63 meter pada paksi menegak dan 0.61 meter pada paksi mendatar. Jisim kenderaan dalam keadaan kering adalah 125 kg. Sistem pendorongan kenderaan ini menggunakan 8 buah <i>thruster</i>. Setiap motor yang digunakan itu boleh menghasilkan daya tujahan sehingga 27 N.</p> 
-----------	--

2.2.3 Sistem Pendorongan.

Di dalam Whitcomb dan Yoerger (1999) menyatakan bahawa penggerak daripada jenis kuasa elektrik menjadi pilihan berbanding kuasa hidraulik untuk rekabentuk sistem pendorongan kenderaan bawah-air secara umumnya. Pemilihan penggerak berkuasa elektrik ini juga sesuai untuk kegunaan kenderaan bawah-air yang berkuasa rendah. Sistem penggerak elektrik yang dimaksudkan ini merujuk kepada motor elektrik. Terdapat dua jenis alatan yang direkabentuk daripada motor untuk digunakan pada sistem pendorongan kenderaan bawah-air. Dua jenis alatan tersebut adalah *propeller* dan sebuah lagi disebut sebagai *thruster*. Alat *propeller* ini biasanya diletakkan di bahagian belakang kenderaan, betul-betul di bahagian tengah ekor kenderaan. Hasil daripada pergerakan *propeller* ini, satu daya tujahan dihasilkan untuk mengerakkan kenderaan ini berdasarkan pada hukum Newton yang menyatakan bahawa satu daya

perlu dihasilkan untuk menggerakkan sesuatu objek. Kebanyakan kenderaan bawah air jenis AUV menggunakan pendekatan ini. Bagi membolehkan kenderaan ini bergerak ke kiri dan ke kanan, satu sistem yang menyerupai sirip ikan diletakkan pada bahagian belakang dan depan kenderaan (rujuk Rajah 2.2).



Rajah 2.2: Contoh kedudukan *propeller* dan sirip pada sebuah kenderaan robotik bawah-air (Infante project reports, 2001).

Alatan jenis kedua yang biasa digunakan iaitu disebut *thruster*. Fungsi sebuah *thruster* ini adalah sama seperti prinsip kerja sebuah *propeller*. Pergerakan sesebuah kenderaan bawah-air ini boleh dikawal sepenuhnya oleh *thruster*. Dengan menggunakan lebih daripada sebuah *thruster* pergerakan pada semua arah boleh dilakukan. Perkara yang perlu dilakukan hanya menyusun *thruster* ini mengikut arah pergerakan yang dikehendaki. Rekabentuk peletakan *thruster* yang mudahalih memberikan satu kelebihan kepada penggunaan *thruster* apabila sistem pendorongan

kenderaan hendak diubahsuai. Kebanyakan kenderaan bawah-air jenis ROV menggunakan *thruster* sebagai sistem pendorongan untuk menggerakkan kenderaan.

2.2.4 Sistem Sokongan.

Sistem sokongan ditakrifkan sebagai sistem yang membantu kenderaan bawah-air ini untuk beroperasi pada sesuatu misi. Antara sistem sokongan itu adalah sistem penderia, bekalan kuasa, sistem penglihatan dan alatan aksesori tambahan. Kegunaan sistem sokongan ini bergantung kepada sesuatu misi yang hendak dilakukan oleh kenderaan bawah air tersebut.

Bagi sistem penderia, pemilihan penderia yang biasa digunakan adalah seperti penderia kedalaman, sonar pengimbas tepi, kompas digital, *gyroscope*. Contoh penggunaan sistem penderia ini boleh dilihat di dalam Robert *et. al* (2000). Kenderaan ORCA yang dihasilkan menggunakan lima jenis penderia yang berlainan fungsinya. Antara penderia itu adalah seperti kompas digital untuk tujuan kawalan pemanduan arah, sonar altimeter untuk mengukur jarak kenderaan daripada permukaan bumi, penderia kedalaman untuk menentukan dan mengawal kedudukan kedalaman kenderaan, pencatat halaju *Doppler* (DVL) untuk mengukur kelajuan kenderaan dan juga alat pengukur inertial yang mengukur taraf keseimbangan kenderaan.

Di dalam Ezril *et.al* (2000) pula menyatakan bahawa penderia *inclinometer* digunakan untuk mengukur sudut putaran pada paksi-y, *gyroscope* untuk mengukur kadar putarannya, kedalaman pada paksi-z diukur oleh meter tekanan atau penderia kedalaman. Penggunaan penderia-penderia ini bertujuan untuk mengawal kenderaan pada satah menyelam. Jelas sekali faktor pemilihan penderia ini bergantung kepada penggunaannya yang ditentukan melalui aplikasi yang dilakukan oleh kenderaan bawah-air yang terlibat.

Pemilihan sumber kuasa pula bergantung kepada rekabentuk binaan badan kenderaan bawah-air. Bagi kenderaan jenis ROV, sumber kuasa elektrik disalurkan daripada stesen operasi di daratan ataupun kapal induk melalui kabel sambungan. Berlainan dengan kenderaan jenis AUV, bekalan kuasa dibawa sendiri dan biasanya menggunakan bateri. Bateri yang digunakan boleh dicas semula dan jangka hayat penggunaannya bergantung kepada jenis bateri yang digunakan. Antara jenis bateri yang digunakan untuk kenderaan jenis AUV adalah seperti *lead-acid* (Bradley, 1992, Allen *et.al*, 1997) dan *nickel-cadmium* (Smith & Park, 1998, Vestgrad *et.al*, 1999). Faktor yang menyebabkan bateri daripada jenis ini dipilih adalah kerana kos yang murah, mudah didapati dalam banyak bentuk dan saiz dan senang dicas semula tanpa risiko terbakar atau letupan yang besar.

2.3 Sistem Kawalan Kenderaan Bawah-Air.

Dalam merekabentuk sesebuah sistem kawalan kenderaan bawah-air terdapat beberapa faktor yang perlu diambilkira sebelum proses merekabentuk itu diteruskan. Dalam kajian yang telah dilakukan, terdapat beberapa masalah dan isu yang dihadapi untuk merekabentuk sistem kawalan ini. Berpandukan masalah dan isu tersebut, maka para penyelidik telah mencadangkan pelbagai pendekatan, teknik dan kaedah yang boleh digunakan untuk merekabentuk sebuah sistem kawalan yang cekap.

2.3.1 Masalah Dan Isu Rekabentuk Sistem Kawalan

Rekabentuk sebuah sistem kawalan dengan pengawal yang sesuai menjadi faktor untuk menentukan prestasi kerja sesebuah jentera robotik bawah-air ini. Penghasilan satu sistem pengawal yang cekap amat penting kerana operasi jentera robotik bawah-air melibatkan kawasan persekitaran lautan yang mencabar.

Di dalam Yuh (2000) menyatakan terdapat beberapa faktor yang menyebabkan kenderaan bawah-air ini sukar untuk dikawal. Faktor-faktor tersebut adalah seperti:

- a) Faktor ketidak-linearitas yang tinggi.
- b) Kelakuan dinamik kenderaan yang berubah dengan masa.
- c) Pekali hidrodinamik yang tidak menentu.
- d) Persamaan sistem tertib tinggi apabila lengan robot digabungkan.
- e) Perubahan titik graviti dan keapungan disebabkan pergerakan lengan robot.

Oleh sebab itu, terdapat pelbagai jenis atau teknik sistem kawalan yang telah dicadangkan untuk merekabentuk sebuah sistem kawalan untuk kenderaan robotik bawah-air.

2.3.2 Teknik Kawalan Yang Digunakan.

Daripada isu dan masalah yang dihadapi untuk mengawal kenderaan bawah-air ini, terdapat beberapa teknik atau pendekatan yang telah digunakan untuk merekabentuk sesebuah sistem kawalan bagi mengatasi masalah yang dihadapi. Teknik-teknik yang telah digunakan ini bergantung kepada rekabentuk kenderaan robotik bawah-air yang dibina serta aplikasi yang terlibat. Antara teknik-teknik itu adalah seperti pengawal *Proportional-Integral-Derivative* (PID) (Prestero, 1994, Silpa-Anan, 2001, Folcher & Rendas, 2001, Zanolli & Conte, 2003), kawalan *sliding mode* (Yoerger & Slotine, 1985,

Healey & Lienard, 1993, Kyu-Hyun *et.al*, 2002, Walchko *et al.*, 2003), *adaptive control* (Choi & Yuh, 1996, Nie *et.al*, 1998), rangkaian neural (Lorenz & Yuh, 1996, Ishii *et.al*, 1998) dan pengawal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) (Naeem *et.al*, 2003). Pendekatan yang digunakan ini bermula daripada teknik yang mudah seperti pengawal PID hinggalah kepada teknik-teknik yang kompleks seperti *sliding mode* dan rangkaian neural.

Daripada teknik-teknik kawalan yang dinyatakan, rekabentuk pengawal PID dan kawalan *sliding mode* adalah merupakan teknik yang banyak digunakan (Jimenez & Jouvencel, 2003). Di dalam Prestero (1994) penggunaan rekabentuk pengawal PID digunakan untuk mengawal sistem kedalaman kenderaan bawah-air REMUS. Sistem kawalan kedalaman yang direkabentuk menggunakan hukum kawalan yang mempunyai dua gelung tertutup iaitu gelung dalaman dan gelung keluaran. Pengawal *Proportional-Derivative* (PD) telah digunakan untuk gelung dalaman manakala pengawal *Proportional* (P) untuk gelung luaran. Bagi menyelesaikan masalah rekabentuk sistem, Prestero (1994) menggunakan pendekatan sistem tertib ke-2 agar sistem mempunyai sambutan keluaran yang baik. Sambutan sistem keluaran yang baik ini boleh ditentukan melalui nilai peratus terlajak, M_o , nilai masa penetapan, t_s dan nilai ralat keadaan mantap, e_{ss} .

Penggunaan skim pengawal PID boleh juga didapati di dalam Folcher dan Rendas (2001). Sistem kawalan yang direkabentuk adalah untuk sistem kawalan kedalaman kenderaan bawah air Phantom 500. Rekabentuk pengawal yang telah dibina itu dibuat berdasarkan ciri sambutan sistem gelung tertutup berdasarkan objektif-objektif tertentu. Objektif-objektif yang dikehendaki adalah seperti nilai peratus terlajak, M_o kurang daripada 10%, nilai masa penetapan, t_s kurang daripada 0.8 s dan juga nilai ralat keadaan mantap, e_{ss} adalah sifar.

Berlainan dengan kajian yang telah dilakukan dalam Silpa-Anan (2001), rekabentuk sistem kawalan dilakukan untuk keenam-enam darjah kebebasan pergerakan kenderaan. Ini bermaksud bahawa sistem yang hendak dikawal itu adalah sistem berbilang masukan dan berbilang keluaran (MIMO). Dalam kajian itu, beliau membincangkan tentang penggunaan teknik kawalan PID dan teknik kawalan *sliding mode*. Telah dibuktikan bahawa teknik kawalan *sliding mode* telah berjaya diimplementasikan tapi hanya untuk satu darjah kebebasan pergerakan sahaja. Tambahan beliau lagi, memang secara teorinya skim kawalan *sliding mode* lebih baik daripada skim pengawal PID tetapi kelebihan pengawal PID ia mudah untuk diimplementasikan secara praktikal dalam keadaan yang sebenar berbanding skim kawalan *sliding mode*. Oleh sebab itu peyelidik telah menggunakan teknik kawalan PID bagi mengawal jentera KAMBARA yang dihasilkan Universiti Kebangsaan Australia.

Penggunaan teknik kawalan *sliding mode* boleh didapati di dalam Walchko *et.al* (2003). Teknik kawalan *sliding mode* ini digunakan untuk mengawal sebuah kenderaan bawah-air jenis AUV bernama Subjugator. Jentera Subjugator ini direkabentuk oleh Universiti Florida. Pada asalnya skim sistem kawalan yang digunakan adalah pengawal PID. Gandaan kawalan untuk skim ini disesuaikan melalui kaedah cuba jaya dan kaedah ralat. Keadaan yang hendak dikawal adalah untuk kelajuan motor, kedalaman kenderaan dan halatuju kenderaan.

Oleh sebab tiada penderia yang digunakan untuk menentukan kedudukan ataupun kelajuan kenderaan maka secara praktikalnya hanya dua jenis keadaan yang dapat dikawal oleh pengawal yang direkabentuk itu. Dua jenis sistem yang dikawal itu adalah sistem kawalan kedalaman dan sistem halatuju kenderaan. Keputusan daripada ujikaji tersebut didapati bahawa prestasi sistem kawalan memenuhi objektif jika tiada bising atau gangguan yang dikenakan terhadap sistem.