

RANCANG BANGUN KAPAL SELAM MINI 22 M

THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF LIGHT SUBMARINE 22M

Nazarudin

Puslitbang Iptekhan Balitbang Kemhan
 Jl. Jati No. 1, Pondok Labu, Jakarta Selatan
 Nazar_els@yahoo.com

ABSTRAK

Pengembangan rancang bangun kapal selam mini 22 meter ini didasari dengan kebutuhan operasional yang telah ditentukan sebelumnya. Kebutuhan operasional tersebut berisi beberapa kriteria antara lain kemampuan Indalsen, persenjataan dan platform. Indalsen berupa sonar, periskop, radar, dan optronic. Persenjataan berupa, torpedo, ranjau dasar, sistem kendali senjata, peralatan navigasi, dan peralatan komunikasi. Platform berupa bobot, panjang, lebar, draf, material, kemampuan manuver, dan kemampuan operasional. Proses desain kapal selam mini berupa, studi literatur dan pengumpulan data, penyusunan DR&O, preliminary design platform, preliminary design inner system, evaluasi dan review desain, dan pembuatan model uji hidrodinamik. Pada proses penyusunan DR&O disusun metodologi yang dimulai dari pengumpulan data, AHP, design calculation, generic algorithm, hingga pada akhirnya didapatkan hasil desain yang feasible dan optimum. Pada akhir proses rancang bangun kapal selam mini 22 meter ini didapatkan hasil desain kapal selam ringan yang mampu membawa 14 orang pengawak dengan ukuran utama LOA: 28 m; B: 4 m; H: 4 m; T: 3 m; V submerged maximum: 15 knot; bobot: 223.0 ton.

Kata kunci: kapal selam mini, operational requirement, platform

ABSTRACT

This development of 22 meters light-submarine design is based on predetermined operational requirements. The operational requirements consist of some criteria among othersthe Indalsen capabilities, weapons and platform. Indalsen consists of sonar, periscope, radar and optronic. Weaponry consists of torpedoes, mines base, weapon control systems, navigation equipment, and communications equipment. Platforms consists of weight, length, width, draft, material, maneuverability and operational capability. The design process of a light-submarine consists of literature and data collection, preparation of DR&O, preliminary design platform, inner system preliminary design, evaluation and review of design and manufacture hydrodynamic test models. In the process of drafting the DR&O a methodology was prepared starting from data collection, AHP, design calculation, generic algorithm, and eventually the optimum and feasible design obtained. At the end of the process, the developed 22 meters light-submarine design capable of carrying 14 people with main LOA dimensions: 28 m; B: 4 m; H: 4 m; T: 3 m; V submerged maximum: 15 knots; Weight: 223.0 tons.

Keywords: light-submarines, operational requirements, platform

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kapal selam mini di dunia saat ini sangat pesat. Teknologi yang berkembang ini mencakup wahana, sistem propulsi, sistem komunikasi, sensor, servo mekanik, instrumentasi dan kendali yang memungkinkan memantau kondisi bawah air dengan akurat. Kapal selam dengan panjang 20-25 meter pada umumnya dikategorikan sebagai kapal selam kecil seka-ligus terbukti salah satu tipe kapal laut yang paling penting dalam tugas kemiliteran serta komersial (Russo, 1960).

Walaupun teknologi kapal selam telah dikembangkan sejak akhir abad ke-19, tetapi Indonesia, negara kepulauan seluas Amerika Serikat dan dua pertiga wilayahnya merupakan laut, belum pernah menempatkan kapal selam sebagai teknologi kelautan untuk menunjang kepentingan pertahanan dan keamanan serta komersial yang urgen. Teknologi ini dianggap sangat penting di antara gugusan peralatan perang laut karena *kill capability* yang tinggi serta *detect probability* yang rendah. Akibatnya, tingkat konfidensialitas teknologi kapal selam terbilang tinggi dan tidak mudah disamai.

Maksud dan tujuan penelitian ini adalah melakukan pengembangan rancang bangun kapal selam mini 22 meter untuk terwujudnya teknologi dan sumber daya pertahanan sesuai kemajuan IPTEK dan mampu dikembangkan secara mandiri. Kapal selam ini dirancang untuk dapat melakukan misi *attacking/small patrolling* berikut: melepas dan memuat kembali pasukan komando; *intelligence, reconnaissance* dan *surveillance*; *mine counter measures*; mempunyai kemampuan defensif/menghindari ancaman dan mampu bergerak dengan kecepatan tinggi 15 knots; *search* dan *salvage* (Achmadi, 1997).

Selain itu, kapal selam mini juga dirancang untuk dapat dilepas dari kapal tender seperti KRI Surabaya, KRI Dr. Suharso, atau KRI Makassar. Kapal dirancang agar dapat bergerak seanehng mungkin. Ukuran kapal relatif kecil dengan kemampuan manuver yang baik serta berkecepatan tinggi. Kapal ini juga dirancang untuk melakukan penetrasi ke pelabuhan musuh guna memperoleh ISR secara detail serta melakukan MCM (Achmadi, 1997).

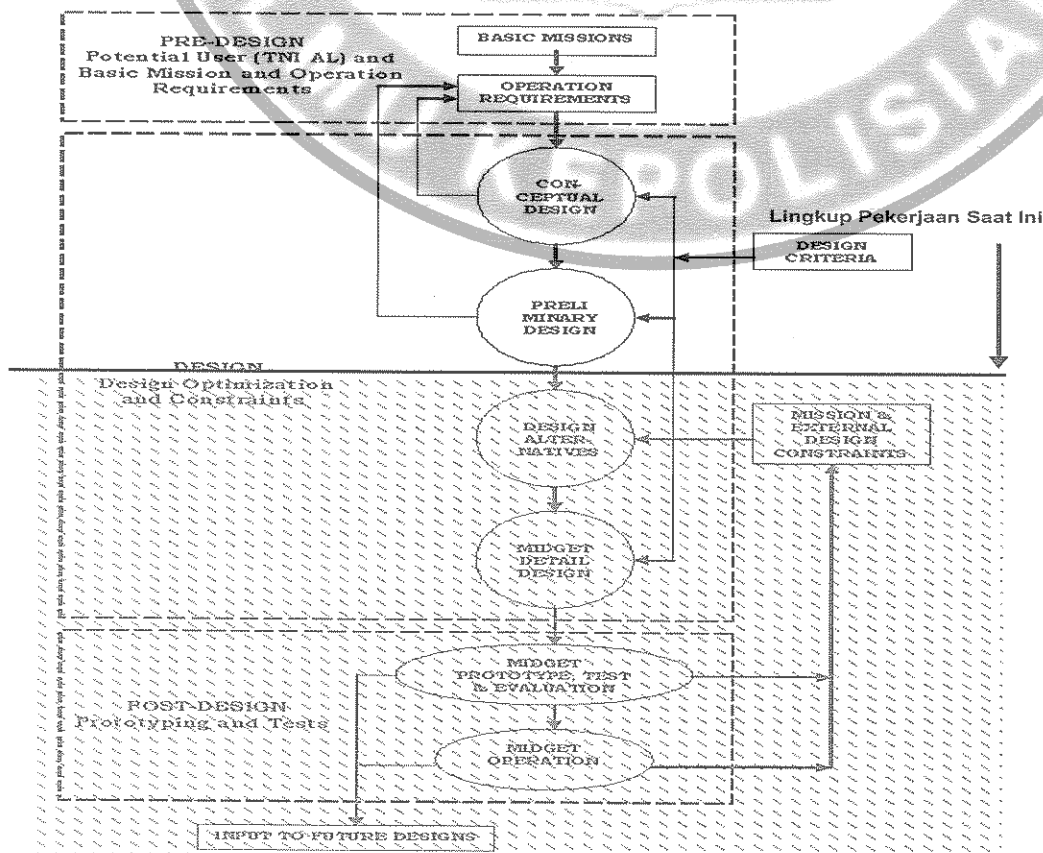
Penetapan misi kapal selam mini ini membawa konsekuensi-konsekuensi di dalam proses desain.

Dengan ditetapkannya misi-misi kapal selam maka berbagai skenario pelaksanaannya dapat dibayangkan. Pelaksanaan skenario ini secara khusus merupakan tugas TNI-AL dan secara umum TNI dalam rangka menegakkan pertahanan dan keamanan di wilayah NKRI. Dengan demikian, penyusunan skenario pelaksanaan misi harus melibatkan kondisi kewilayahan NKRI beserta seluruh aspek permasalahannya.

METODOLOGI

Secara umum, metodologi penelitian ini terbagi atas dua bagian yaitu penelitian numerik dan penelitian eksperimental. Penelitian numerik dilaksanakan dengan menggunakan model matematis melibatkan data lapangan serta menggunakan komputer sebagai sarana solusinya. Penelitian eksperimental dilaksanakan dengan model fisik serta pelaksanaan percobaan di laboratorium seperti laboratorium *towing tank* dan *cavitation tunnel flume tank*.

Metodologi penelitian digambarkan pada diagram alir di bawah. Gambar 1 memperlihatkan proses pengerjaan secara umum serta proses desain yang dilakukan.

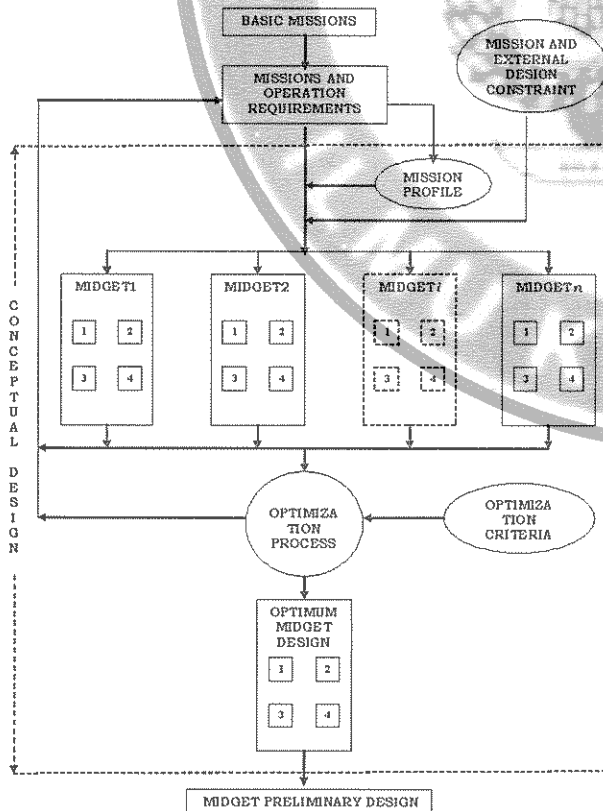


Gambar 1. Diagram alir proses desain.

Gambar 1 di atas menunjukkan bahwa aktivitas dimulai dengan *Exploration design concept* yang mencakup penentuan *basic mission and operation requirements* serta dilanjutkan dengan tahapan *conceptual design*. Tahap *basic mission and operation requirement* mencakup penentuan misi utama kapal selam mini yang disesuaikan dengan kebutuhan NKRI serta persyaratan utama operasi yang disesuaikan dengan kemampuan dan kelaziman yang berlaku di jajaran TNI-AL maupun pihak galangan nasional, seperti PT. PAL Indonesia (Persero) atau yang lainnya.

Desain Konseptual

Di bawah ini adalah diagram alir *conceptual design* yang menjelaskan konsep *mission and operation requirements*. Terdapat pilihan ukuran mini dengan berbagai macam sistem yang diterapkan pada masing-masing pilihan ukuran. Proses optimisasi dilakukan pada pilihan mini dengan berbagai macam ukuran dan sistem.

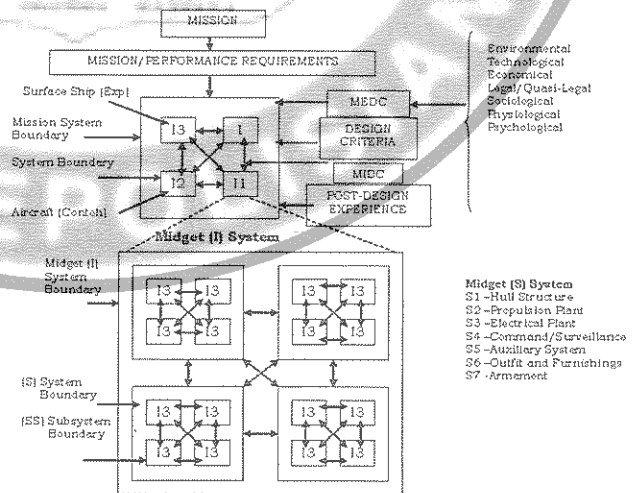


Gambar 2. Design feasibility study.

Materi diskusi antara lain mencakup bahasan kondisi geografis dan kelautan NKRI, kebutuhan serta permasalahan pertahanan dan keamanan khususnya pertahanan dan keamanan laut NKRI,

pelaksanaan operasi pertahanan dan keamanan laut khususnya operasi kapal selam, peralatan yang dibutuhkan dalam operasi kapal selam, jenis/ tipe/merek peralatan kapal selam khususnya yang berkaitan dengan pengindraan, persenjataan, dan komunikasi, serta kemungkinan pengembangan teknologi kapal selam. Hasil diskusi ini merupakan masukan untuk proses optimisasi penentuan spesifikasi teknis kapal selam mini sebagaimana nampak pada Gambar 2 di atas.

Proses *trade-off* optimisasi dilakukan dengan algoritma genetika karena algoritma ini lebih cepat dalam mencari titik optimum dengan *multi-objectives*. *Objective/tujuan* dalam proses optimisasi ini adalah memaksimalkan efektivitas kapal selam mini (*overall measure of effectiveness/OMOE*), meminimumkan biaya pembangunan (*criteria for building cost of construction/CBCC*), serta meminimumkan risiko (*overall measure of risk/OMOR*). Program *Multi-Objective Genetic Algorithm Optimization (MOGO)* ditulis dalam bahasa MATLAB7.3 dengan hasil seperti nampak pada Gambar 3 di bawah (Arentzen, 1960; Gabler, 1986; Boisiayon, 1983; Brown, 2003; Brown et al., 2005).



Gambar 3. Mission system dan design inputs.

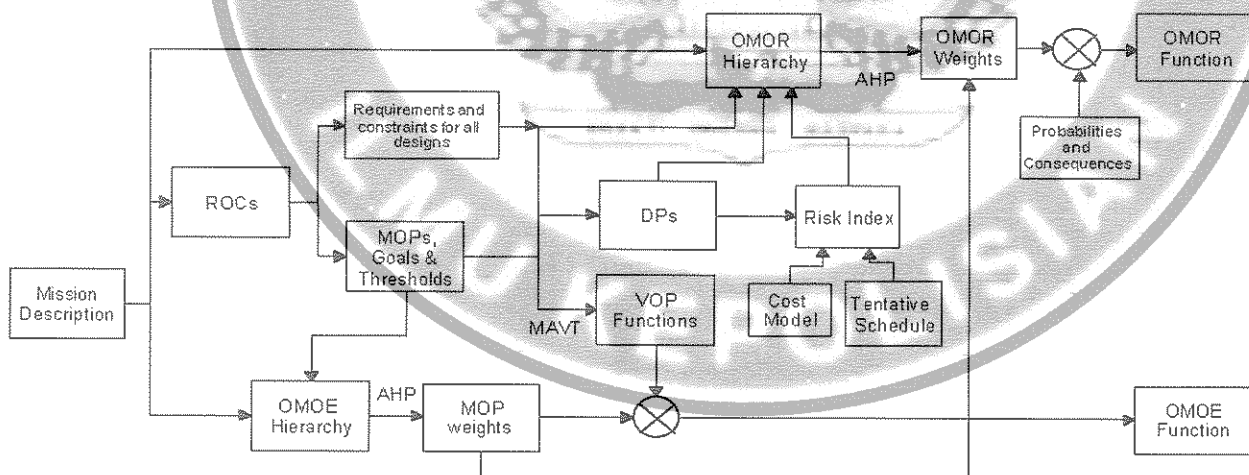
Diagram proses *trade-off* ini dapat dilihat pada Gambar 3 di atas. Dari *n* buah kemungkinan kombinasi spesifikasi kapal selam mini akan dipilih satu kombinasi dengan nilai efektivitas terbaik dan biaya serta risiko tertentu. Gambar 3 menunjukkan sistem kapal selam mini yang dibuat terpisah dari *mission system* di mana sistem dalam kapal selam mini tersebut dapat terdiri dari *N* sistem individual yang berinteraksi satu dengan lainnya.

Proses *trade-off* pada tahap eksplorasi konsep di atas masih menggunakan rumus empiris, sehingga hasil spesifikasi kapal selam mini yang diperoleh juga masih bersifat empiris. Untuk memperoleh hasil optimisasi yang lebih akurat, maka proses dalam *conceptual design* berikutnya perlu dilakukan yaitu pengembangan konsep (*concept development*). Pada tahap ini, kajian untuk setiap elemen desain dievaluasi kembali lewat kajian yang lebih terperinci menurut langkah spiral desain pada Gambar 3. Kajian lebih terperinci ini meliputi kajian aspek hidrostatika/hidrodinamika, relasi berat/ruang, *ballasting system*, material dan struktur, *resistance and powering*, tata letak dan bentuk geometri, *dynamics and control*, *sensing system*, *manufacturing process and specification* serta biaya pembangunannya. Kegiatan riset ini juga melibatkan pembuatan dan pengujian model pada laboratorium komputer untuk model numerik, laboratorium konstruksi untuk pengetesan material, serta laboratorium *towing tank* dan *manoeuvring basin* untuk aspek

tingkah laku statika dan dinamikanya.

Apabila elemen-elemen penelitian tersebut telah dilakukan dengan tingkat kerincian yang cukup, maka *database* elemen penelitian dapat diintegrasikan dalam kapal selam *Mini Product Definition System* (MPDS) yang merupakan desain sistem kapal selam mini atau kapal selam pada umumnya.

Penelitian ini dimulai dengan kajian *basic mission and operation requirements* seperti yang terlihat pada Gambar 4, melibatkan telaah lingkungan dan konsep pertahanan dan keamanan laut NKRI. Berbagai kemungkinan pembangunan *land base* di beberapa lokasi kepulauan Indonesia, permasalahan logistik, serta jumlah dan dimensi kapal selam mini dengan berbagai spesifikasi akan diuji untuk memperoleh *total cost system* minimum. Luaran dari kajian aspek pertahanan dan keamanan ini akan berupa ditetapkan persyaratan *basic mission and operation* sebagai basis acuan perencanaan teknis kapal selam mini berikutnya.



Gambar 4. Proses perhitungan OMOE dan OMOR dalam *conceptual design*

Dengan telah ditetapkan misi serta diperincinya persyaratan misi dan kemampuan yang harus dimiliki kapal selam mini (*Required of Capability/ROC*) maka berbagai kombinasi sistem peralatan/kemampuan dapat dikaji. Dengan demikian, *Overall Measure of Effectivity* (OMOE), biaya (*Building Cost of Construction/CBCC*), dan *Overall Measure of Risk* (OMOR) dari suatu desain kapal selam mini dapat dikaji, divariasikan, serta dilakukan *trade-off* untuk memperoleh desain dengan OMOE terbaik maupun CBCC dan OMOR terendah. Proses perhitungan OMOE dan OMOR dapat dilihat

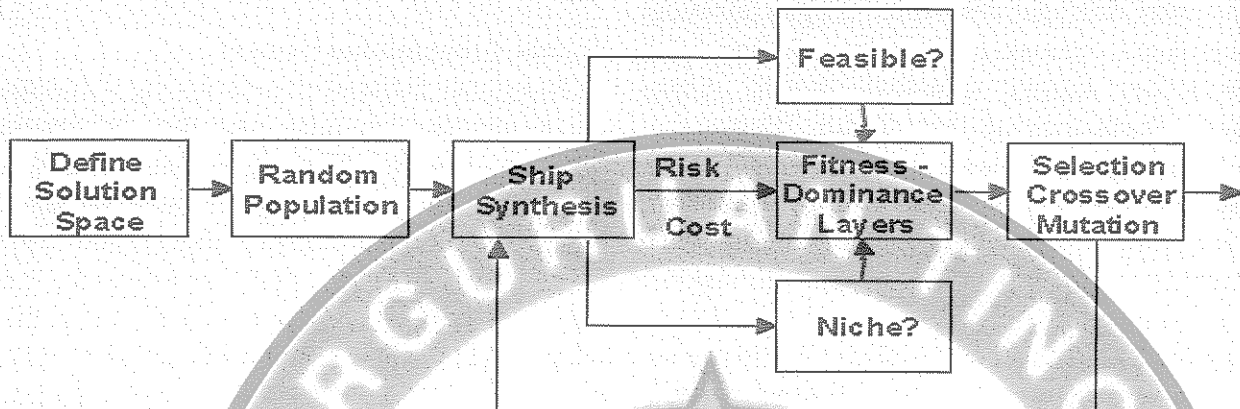
pada Gambar 6 di bawah (Brown, 2003; Brown et al., 2005; Burcher et al., 1994).

Metode optimisasi yang dipakai di dalam penelitian ini menggunakan metode berbasis program *Multi-Objective Genetic Algorithm Optimization* (MOGO) (Brown 2003). Dengan pendekatan ini, algoritma akan mencari titik-titik optimum dalam ruang desain dengan jalan menyimulasikan proses evolusi, seperti ditunjukkan pada Gambar 5 berikut (Brown, 2003; Brown et al., 2005).

Tampak dalam proses optimisasi yang

tergambar pada Gambar 5 bahwa karakteristik kapal selam mini dihitung di dalam subprogram *midget design synthesis* yang memuat *routine*

dengan formulasi empiris sebagai pendekatan perhitungan awal karakteristik kapal selam mini. Rumus-rumus empiris tersebut diturunkan dari



Gambar 5. Program *Multi-Objective Generic Algorithm Optimization* (MOGO).

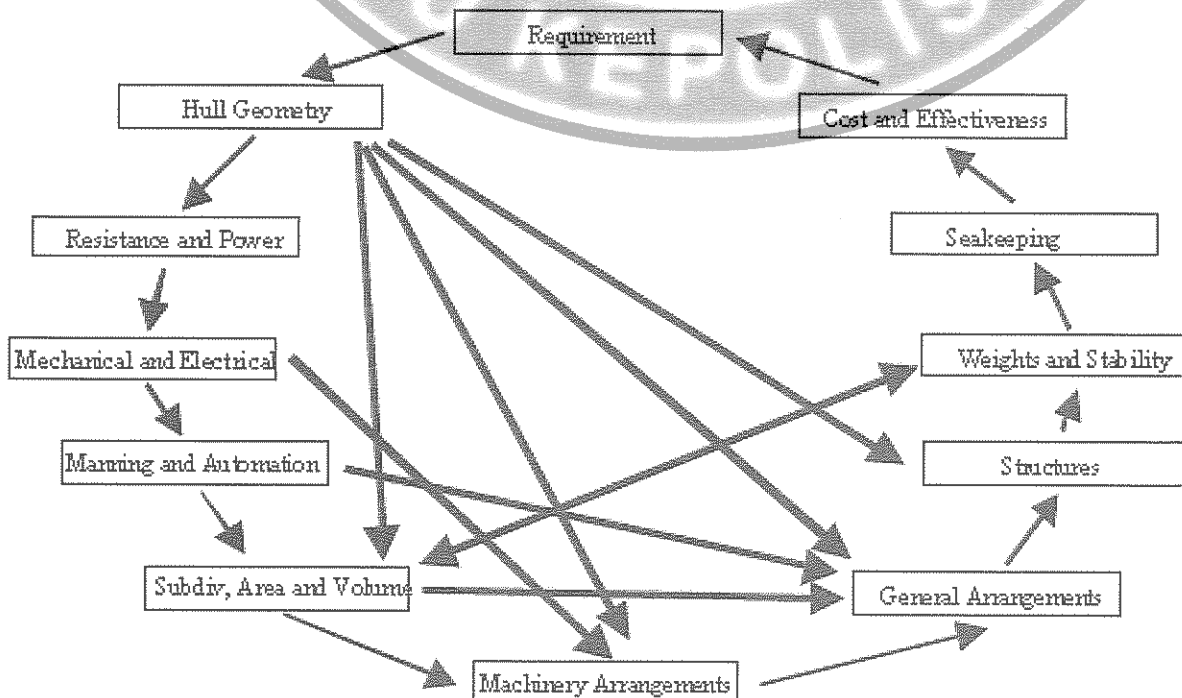
metode statistik, pengalaman, maupun proses pendekatan lain untuk memperoleh hubungan antara variabel desain dengan bentuk yang relatif sederhana. Manfaatnya yakni untuk memudahkan dan mempercepat perhitungan optimisasi (Saaty, 1994).

Hasil dari proses optimisasi pada tahap *concept exploration* ini berupa tempat kedudukan titik-titik desain optimum yang menempati ruang desain dalam bentuk *non-dominated frontier* atau disebut juga *pareto Frontier* (Budiyanto, 2002). Aktivitas yang diusulkan pada periode selanjutnya merupakan upaya untuk menyempurnakan dan

memvalidasi persamaan-persamaan empiris tersebut serta memperkaya hubungan antara variabel pada perhitungan *midget design synthesis*. Tujuannya adalah agar hasil yang diperoleh dalam proses optimisasi lebih akurat. Proses perhitungan karakteristik teknis kapal selam mini dapat dilihat pada pembahasan.

Desain Awal

Tahap pengembangan desain konsep, yaitu mengevaluasi kembali keseluruhan proses desain spiral dengan kajian yang lebih detail, ditunjukkan Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Pengembangan konsep dengan spiral desain.

Meskipun banyak data masih berorientasi teknologi AS, pengembangan konsep desain telah dilaksanakan dan verifikasi/modifikasi akan terus dilakukan agar data sesuai dengan teknologi yang lazim digunakan di Indonesia yang lebih berorientasi kearah teknologi Jerman, Eropa Timur, Rusia maupun Asia Timur. Hingga saat ini mengakses informasi detail berkenaan dengan peralatan dan persenjataan tempur khususnya kapal selam, biaya pembangunan kapal, kurangnya pengalaman desain, pembangunan dan operasi peralatan-peralatan tersebut masih sulit karena tingginya tingkat konfidensialitas informasi dan hal ini perlu secara bertahap dieliminasi pada tahapan penelitian berikutnya.

Skenario misi berdampak terhadap desain kemampuan spesifikasi (*Required of Capability/ROC*) kapal selam mini agar dapat menunjang misi secara efektif. Pengertian efektif tidak selalu berorientasi pada spesifikasi teknologi terkini atau bahkan teknologi masa depan karena teknologi tinggi berimplikasi pada biaya dan risiko yang tinggi pula. Sebaliknya, pengertian efektif adalah bahwa kapal selam mini perlu didesain untuk dapat melaksanakan misi dengan tingkat efektivitas terbaik serta tingkat biaya dan risiko yang relatif rendah. Dari deskripsi ROC di atas dapat dirancang berbagai alternatif kombinasi spesifikasi peralatan/sistem yang diperlukan kapal selam mini untuk menunaikan tugasnya. Pada tahap ini, eksplorasi desain, analisis misi, dan pengembangan teknologi berperan menentukan spesifikasi kapal selam mini. Agar proses optimisasi dapat dilakukan secara kuantitatif, skor perlu diberikan kepada berbagai alternatif kombinasi peralatan/sistem melalui metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*) dan MAVT (*Multi-Attribute Value Theorem*). Tujuannya yakni memperoleh bobot untuk membandingkan tingkat efektivitas suatu peralatan/sistem terhadap suatu peralatan/sistem yang lain (*Measure of Performance/MOP*) (Budiyanto, 2004).

Dengan diketahuinya MOP peralatan/sistem didalam kapal selam mini maka perlu dirancang eksplorasi desain kapal selam mini yang mampu memuat berbagai kombinasi peralatan/sistem tersebut serta memungkinkan sistem bekerja dengan baik. Tujuannya yakni untuk melaksanakan misi dengan tingkat efektivitas terbaik dan dengan biaya dan risiko rendah. Perancangan

untuk menentukan desain terbaik ini memerlukan proses *trade-off* di antara seluruh kombinasi yang mungkin terjadi.

Teknik Pengambilan Sampel

Kuesioner merupakan proses yang dibutuhkan untuk memperoleh nilai atau skor berdasarkan Struktur Analisa Hierarki Proses Pemilihan Parameter Green Port yang sesuai diterapkan di Indonesia. Karenanya, diperlukan teknik pengambilan sampel untuk mendapatkan hasil kuesioner yang baik. Adapun teknik pengambilan sampel yang akan digunakan adalah teknik *purposive sampling*. Teknik ini digunakan mengacu pada tujuan yang ingin dicapai pada proses penelitian yakni memberikan informasi data dari sebagian anggota dalam kelompok tertentu. Hal ini mengharuskan peneliti mengetahui latar belakang pe-ngisi kuesioner (Tongco, 2007; Budiyanto, 2004).

Proses pengambilan sampel dimulai dengan menghitung jumlah sampel. Perhitungan jumlah sampel menggunakan persamaan slovin. Persamaan slovin adalah persamaan yang digunakan untuk mengetahui jumlah sampel minimum jika jumlah populasi (N) diketahui pada taraf signifikan (α). Berikut persamaan yang digunakan:

$$n = \frac{N}{1 + \left[\frac{N\alpha}{2} \right]^2}$$

(Sevilla, 2007)

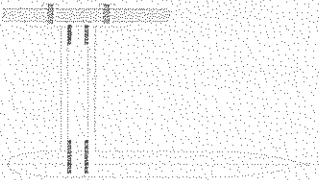
N adalah jumlah pengelola yang mempunyai kepentingan, α adalah batas toleransi kesalahan, dan n adalah jumlah sampel (Daniel, 1998).

ANALISIS DAN EVALUASI

Proses Pembuatan Model Uji

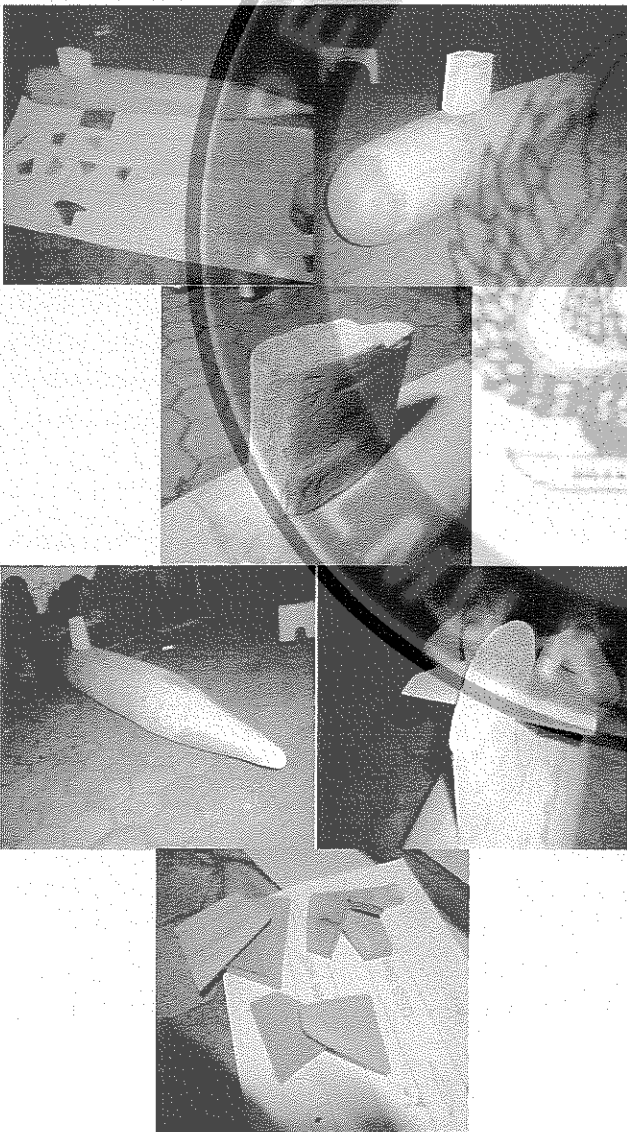
Bahan utama pembuatan model adalah bahan *fibreglass*. Badan model dibuat dengan lapisan *fibreglass* setebal 4 mm. Dengan demikian, model diperkirakan mampu menahan tekanan hidrostatis pada percobaan di tangki tarik dengan ketenggelaman sekitar 1 meter di bawah permukaan (tekanan hidrostatis sekitar 0,1 Bar). Hubungan model dengan *carriage* melalui perantaraan lengan merupakan penerusan *Bridge water/sail* hingga mencapai pengikat pada *carriage*. Lengan harus dibuat sekuat mungkin. Oleh karenanya, diperlukan penguat pipa besi agar sewaktu percobaan tidak timbul getaran berlebihan yang dapat memengaruhi akurasi

pengukuran (lihat Gambar 7).

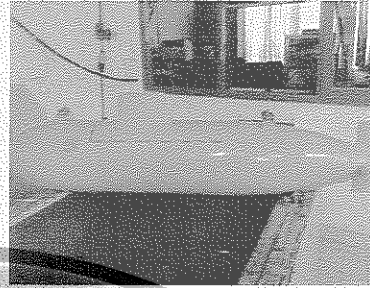


Gambar 7. Peletakan model pada *carriage tank* ditarik.

Sirkularitas dari model harus dibuat sesempurna mungkin karena ketidaksempurnaan sirkularitas akan mengakibatkan timbulnya gaya samping atau gaya ke atas (*side and vertical forces*) (Wardhana et al., 1998).



Gambar 8. Model USS Permit, model Bare Hull Midget, kombinasi Hull Conning Tower, bagian buritan model kapal selam, model *hydroplane* haluan, bahan dasar model *appendices* dari kayu sebelum dilapisi *fibreglass*.



Gambar 8a. Model uji tampak samping, depan, dan belakang.

Proses Uji Laboratorium

Percobaan model kapal dilaksanakan pada Laboratorium Hidrodinamika Fakultas Teknologi Kelautan ITS. Tangki percobaan memiliki panjang 50 meter, lebar 3 meter, dalam 2 meter, dan sarat 1,8 meter.

Kereta penarik model kapal menggunakan empat buah motor listrik linier yang memungkinkan dicapainya kecepatan konstan yang diinginkan dengan waktu relatif singkat. Dengan demikian, tersedia waktu pengukuran yang cukup sebelum kereta berhenti pada ujung tangki atau kolam. Selama percobaan, model kapal ditarik oleh kereta dengan mempergunakan poros vertikal dilengkapi *loadcell*. *Loadcell* inilah yang mengukur besarnya *force* atau hambatan model kapal. *Loadcell* lantas dihubungkan ke penguat tegangan sebelum masuk ke jaringan komputer di dalam ruang kontrol.

Percobaan ini dilakukan dalam kondisi air tenang dan selama percobaan model kapal dapat melakukan gerakan mengangguk (*heaving* dan *pitching*) secara bebas. Percobaan tarik ini dilakukan pada beberapa kecepatan (4–15 knots) sehingga dapat diperoleh grafik hubungan antara tenaga kuda efektif (EHP) dan kecepatan kapal (knots).

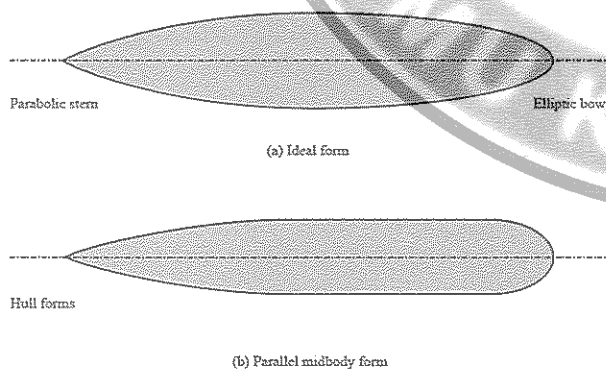
Pada kajian laboratorium fisik, langkah awal adalah pembuatan beberapa model percobaan. Model tersebut akan digerakkan dengan

kecepatan sekitar 4 meter/detik pada tangki percobaan. Lantas, tahanan serta karakteristik aliran akan direkam untuk dianalisis. Alat ukur berupa transduser akan dirancang agar dapat melakukan pengukuran enam derajat kebebasan sekaligus. Konfigurasi model dengan peralatan *carriage towing tank* secara umum dapat dilihat pada Gambar 7.

Sirkularitas dari model harus dibuat sesempurna mungkin karena ketidaksempurnaan sirkularitas akan mengakibatkan timbulnya gaya ke samping atau gaya ke atas (*side and vertikal forces*).

Dimensi Kapal

Sebelumnya telah dilakukan kalkulasi untuk menentukan ukuran utama kapal dan bentuk lambung kapal selam. Bentuk yang dijadikan opsi pemilihan lambung adalah *ideal form* dan *parallel midbody form*. Dengan menggunakan *ideal form* aliran fluida akan mengalir lebih lancar sehingga hambatan lebih kecil. Namun, salah satu bahan pertimbangan perencanaan pembuatan *hull form* adalah kesederhanaan *lines plan*. Kesederhanaan *lines plan* dibutuhkan guna mempermudah proses produksi yang akan dilakukan. Pertimbangannya, bentuk *hull form* yang dipilih adalah *parallel midbody form*.



Gambar 9. *Hull form*

Setelah ditentukan *hull form* kapal yang akan direncanakan, estimasi dilakukan untuk menentukan diameter kapal. Setelah berkali-kali proses optimisasi penentuan ukuran lambung dengan berbagai aspek pertimbangan, maka didapatkanlah ukuran utama yang digunakan untuk proses desain. Dari hasil perhitungan, didapatkan ukuran utama sebagaimana tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran lambung kapal selam hasil perhitungan.

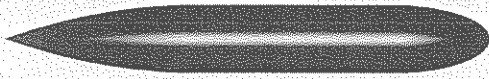
—	D LOA	=4m
∅		=28m
—	L/D B	=7.00
∅		=4m
—	Hsail	=1.5m
∅	B/D	=1
∅	Laft	=11m
—	Lpmb	=11.5m
∅	Lbow	=5.5m

Selanjutnya, dari ukuran utama tersebut akan dibuat *lines plan* dengan menggunakan Maxsurf. Dalam proses pembuatannya, karakteristik desain *hull form* pada Maxsurf tidak bisa sepenuhnya sama dengan hasil perhitungan. Perbedaan karakteristik tersebut membutuhkan koreksi. Koreksi yang diizinkan dalam proses pembuatan desain kapal selam ini tidak boleh lebih besar dari 1% terhadap perhitungan awal.

Pressure Hull dan Outer Hull

Pressure hull atau badan tekan merupakan komponen utama dari kapal selam yang mengakomodasi kru beserta sistem kapal pada tekanan atmosfer dan tahan tekanan hidrostatik saat menyelam. Tekanan atmosfer pada *Pressure hull* akan dijaga pada tekanan sekitar 1 atmosfer. Berdasarkan hasil proses desain dengan menggunakan Maxsurf, perbedaan karakteristik pada *pressure hull* tidaklah lebih dari 1% terhadap perhitungan awal (Wardhana et al., 2004; Djatmiko et al., 2002; Hess, 1976; Leksono et al., 1997; Popov, 1976).

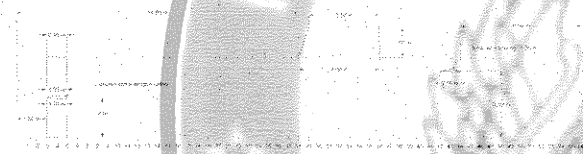
Selanjutnya pada proses desain ini dilakukan proses desain *Outer Hull*. Pembuatan *outer hull* ini merupakan penambahan bentuk *bow* dan *cone* pada *pressure hull*. Penambahan bagian *outer hull* pada bagian haluan dan buritan merupakan karakteristik dari pemilihan bentuk *parallel midbody form*. Hasil dari proses desain *outer hull* menggunakan Maxsurf dapat dilihat pada gambar di bawah (Rosyid et al., 2001).



Gambar 10. Desain bentuk *outer hull* menggunakan Maxsurf

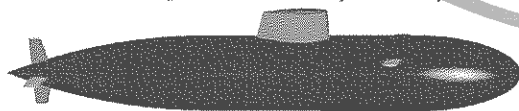
Sail dan Control Surface

Setelah terbentuk *outer hull* selanjutnya dilakukan proses penambahan *sail* dan *control surface*. *Control surface* yang digunakan pada desain kapal selam ini terdiri dari *top rudder*, *bottom rudder*, *aft planes*, dan *Forward planes*. Penempatan *control surface* pun perlu mengikuti hasil optimisasi yang telah dilakukan. Berikut adalah penempatan *control surface* dan *sail* berdasarkan hasil optimisasi.



Gambar 11. Penempatan *control surface* dan *sail*

Setelah ditentukan posisi penempatannya, maka diperlukan pemilihan jenis *foil* yang mampu memberikan gaya angkat dan gaya tekan yang cukup untuk desain kapal selam. Jenis *foil* yang digunakan untuk kapal selam ini adalah NACA 020. Penggunaan jenis *foil* tersebut ditujukan agar manuver kapal maksimal. Berikut adalah hasil desain *control surface* dan *sail* pada kapal selam.

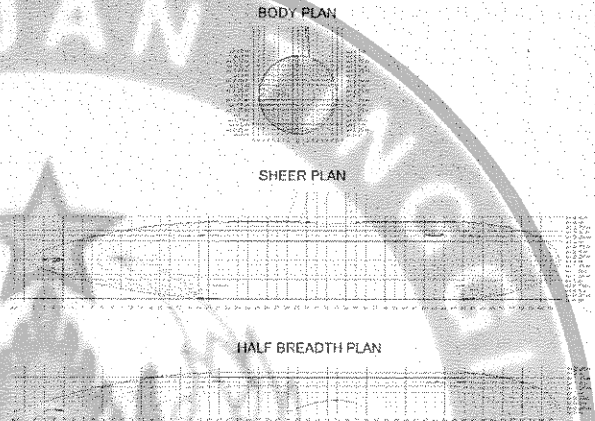


Gambar 12. Desain *Control surface* dan *Sail* dengan Maxsurf.

Lines plan

Setelah proses desain *hull form* kapal selam selesai, selanjutnya dibuat *lines plan*. *Lines plan* merupakan gambar yang menyatakan bentuk potongan *body* kapal dengan tiga sudut pandang yaitu *body plan* (secara melintang), *sheer plan* (secara memanjang), dan *half breadth plan* (dilihat dari atas). Garis-garis bentuk potongan ini menyatakan bentuk tiga dimensi dari kapal untuk mempermudah proses desain serta produksi di lapangan selanjutnya (Popov, 1976).

Ada berbagai cara membuat *lines plan*. Namun, seiring kemajuan teknologi kini telah hadir *software* khusus yang biasa digunakan untuk menggambar *lines plan* dalam waktu relatif singkat. *Software* untuk proses desain kapal selam ini adalah Maxsurf. Maxsurf digunakan sebagai awalan desain sebelum dilanjutkan dengan AutoCad untuk penyempurnaan.



Gambar 13. *Lines plan* yang telah disempurnakan dengan AutoCad

Dari hasil penyempurnaan pembuatan *lines plan* tersebut dapat diketahui karakteristik dari hasil desain kapal selam. Koefisien tersebut digunakan untuk mengetahui kesesuaian hasil desain dengan optimisasi yang sudah dilakukan. Koefisien yang perlu diperiksa antara lain adalah B, T, H, LOA, CB, CP, dan *displacement*.

Hydrostatics at DWL

Measurement	Value	Units
1 Displacement	223,0	t
2 Volume (displaced)	217,590	m ³
3 Draft Amidships	3,000	m
4 Immersed depth	3,000	m
5 WL Length	25,782	m
6 Beam max extents on WL	3,484	m
7 Wetted Area	214,751	m ²
8 Max sect. area	10,108	m ²
9 Waterpl. Area	72,711	m ²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0,836	
11 Block coeff. (Cb)	0,813	
12 Max Sect. area coeff. (C)	0,973	
13 Waterpl. area coeff. (Cw)	0,815	
14 LCB length	15,412	from zero
15 LCF length	15,588	from zero
16 LCB %	59,824	from zero
17 LCF %	60,509	from zero
18 KB	1,707	m
19 KG fluid	0,000	m
20 BMT	0,293	m
21 BML	13,043	m
22 GMT corrected	1,998	m
23 GML	14,749	m
24 KMT	1,958	m
25 KML	14,749	m
26 Immersion (TPC)	0,748	tonne/cm
27 MTC	1,298	tonne.m
28 RM at 1deg = GMT.Disp.sl	7,781	tonne.m

Density (water) 1.025 tonne/m³

Gambar 14. Karakteristik kapal hasil desain Maxsurf.

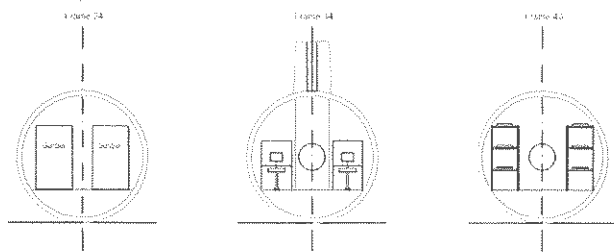
General Arrangement dan Kompartemen Kapal Selam

General arrangement atau rencana umum didefinisikan sebagai perencanaan ruangan yang dibutuhkan pada kapal sesuai dengan fungsi dan perlengkapannya. General arrangement dibuat berdasarkan lines plan yang telah dirampungkan pada proses sebelumnya. Dengan lines plan, bentuk badan kapal secara garis besar akan terlihat. Hal ini memudahkan dalam merencanakan serta menentukan pembagian ruangan sesuai dengan kebutuhannya masing-masing. Secara umum ruangan/kompartemen pada kapal selam dibagi menjadi lima ruangan yaitu engine room, control room, accomodation room, diver room, dan torpedo room. Penampakan kapal selam dari samping dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut.



Gambar 15. General arrangement kapal selam.

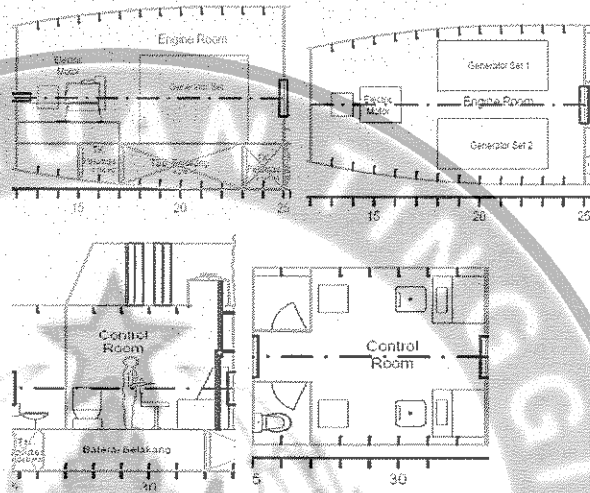
Dengan diameter kapal sebesar 4 meter, kapal selam ini tidak disarankan memiliki lebih dari satu dek. Hal ini dikarenakan kebutuhan akomodasi yang sangat terbatas jika kapal selam memiliki lebih dari satu dek. Double bottom di bawah dek digunakan sebagai penempatan tangki-tangki dan battery room. Kebutuhan volume telah ditentukan berdasarkan hasil optimisasi yang telah dilakukan sebelumnya. Setelah didapatkan volume kebutuhan tangki, maka dibuatlah tank arrangement sesuai gambar di atas. Dari sini, didapatlah penampang melintang kapal selam sebagai berikut.



Gambar 16. Penampang melintang kapal selam

Engine room pada kapal ini terletak pada gading nomor 12 hingga gading nomor 25. Kompartemen ini merupakan tempat keseluruhan

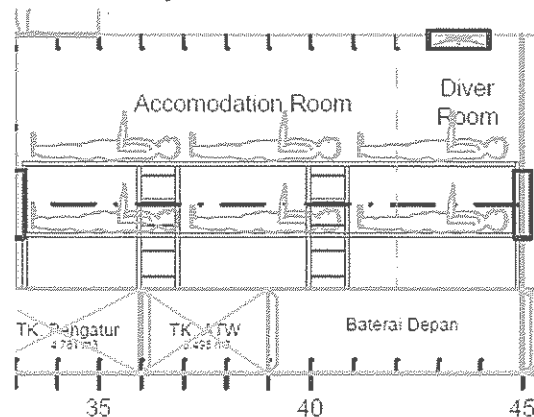
permesinan kapal. Permesinan yang diletakkan pada kompartemen ini di antaranya adalah electric motor propulsion, generator set, dan pompa-pompa. Beberapa tangki juga diletakkan di bawah dek kompartemen ini.

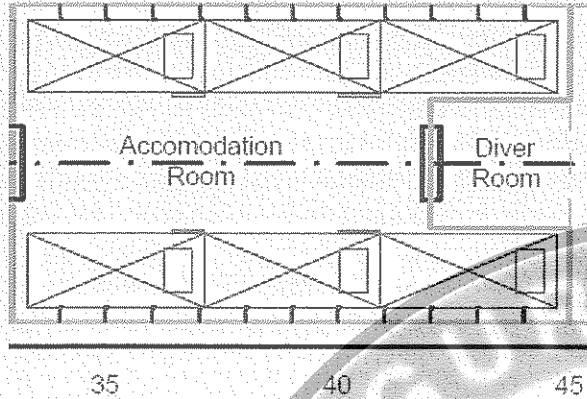


Gambar 17. Engine room tampak samping dan tampak atas, control room tampak samping dan tampak atas.

Control room pada kapal ini terletak pada gading nomor 25 hingga gading nomor 34. Kompartemen ini merupakan tempat pusat kendali kapal selam dan kontrol indra kapal selam. Pada ruangan inilah combat management system, sonar display, conning Tower atau Sail diletakkan. WC dan galley diletakkan pula di tempat yang sama. Selain itu, salah satu baterai juga diletakkan di bawah dek kompartemen ini.

Accommodation room pada kapal ini terletak pada gading nomor 34 hingga gading nomor 45. Kompartemen ini merupakan tempat akomodasi untuk para pengawak kapal. Pada kompartemen ini diletakkan dua belas tempat tidur untuk dua belas orang. Salah satu baterai juga diletakkan di bawah dek kompartemen ini.

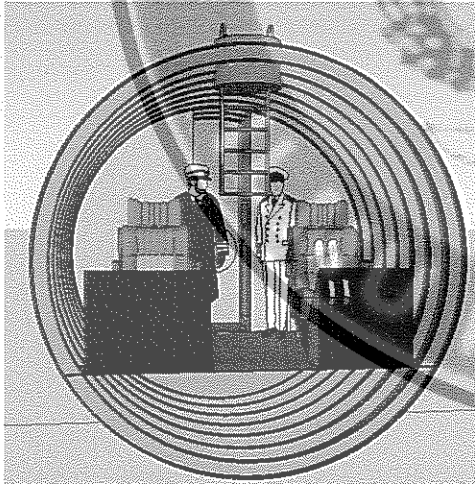




Gambar 18. *Accommodation room* tampak samping dan tampak atas.

Control Room

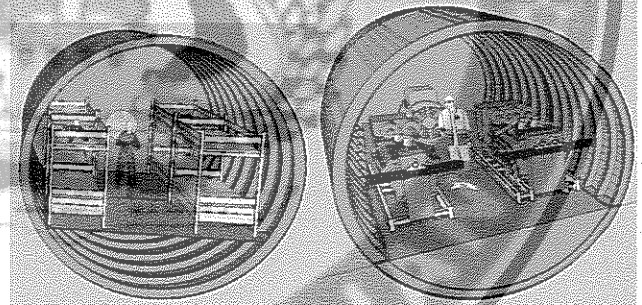
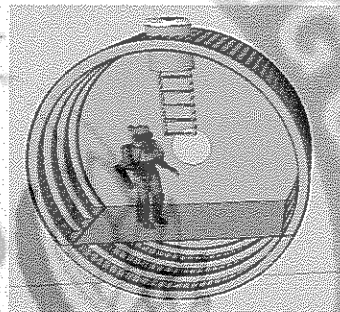
Pada ruang kontrol terdapat peralatan navigasi, komunikasi, dan alat pengontrol sistem operasional kapal selam. Pada ruangan ini terdapat pula dua kursi dan dua meja. Ruang kontrol juga dilengkapi dengan tangga untuk akses keluar kapal. Di samping itu, terdapat pula toilet serta ruangan serbaguna.



Gambar 19. *Control Room*

Acomodation Room, Diving Room, dan Engine Room

Ruang akomodasi memiliki empat tempat tidur bertingkat. Setiap tempat tidur memiliki dua tingkat, sehingga jumlah total tempat tidur di ruang akomodasi ada delapan buah. *Diving room* digunakan sebagai akses keluar prajurit untuk melakukan pengintaian bawah laut atau keluar dari kapal. Ruangan ini dilengkapi dengan tangga untuk akses keluar kapal. Pada ruang mesin terdapat dua buah *genset* sebagai sumber tenaga listrik serta motor listrik.



Gambar 20. *Acomodation room, diving room dan engine room*

Evaluasi Hambatan dengan Menggunakan CFD

Untuk menghitung hambatan kapal selam dengan menggunakan batuan *computational fluid dynamics* (CFD), langkah pertama yang harus dikerjakan adalah memodelkan kapal selam ke dalam bentuk 3D melalui ICEM CFD. Untuk dapat memodelkan kapal selam ke dalam bentuk 3D, sebelumnya kita sudah harus mempunyai desain *lines plan* dari kapal selam tersebut. Model yang digunakan untuk mengevaluasi hambatan pada kapal selam adalah model dengan skala 1:14,8 dari ukuran sebenarnya. Perbandingan dimensi kapal selam dengan dimensi model ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Ukuran utama kapal dan model kapal

Dimensi Partikular	Kapal	Model
LOA	28 m	1.891 m
B	4 m	0.270 m
H	4 m	0.270 m
T	3 m	0.202 m
WSA	214.751 m ²	0.9804 m ²
Displacement	223.0 ton	68.789 kg

Setelah model kapal selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah mengekspor file .msd (default software Maxsurf) ke dalam bentuk file .igs agar dapat dibaca oleh ICEM CFD untuk kemudian elemen-elemennya dibagi ke dalam bentuk yang lebih kecil (*meshing*).

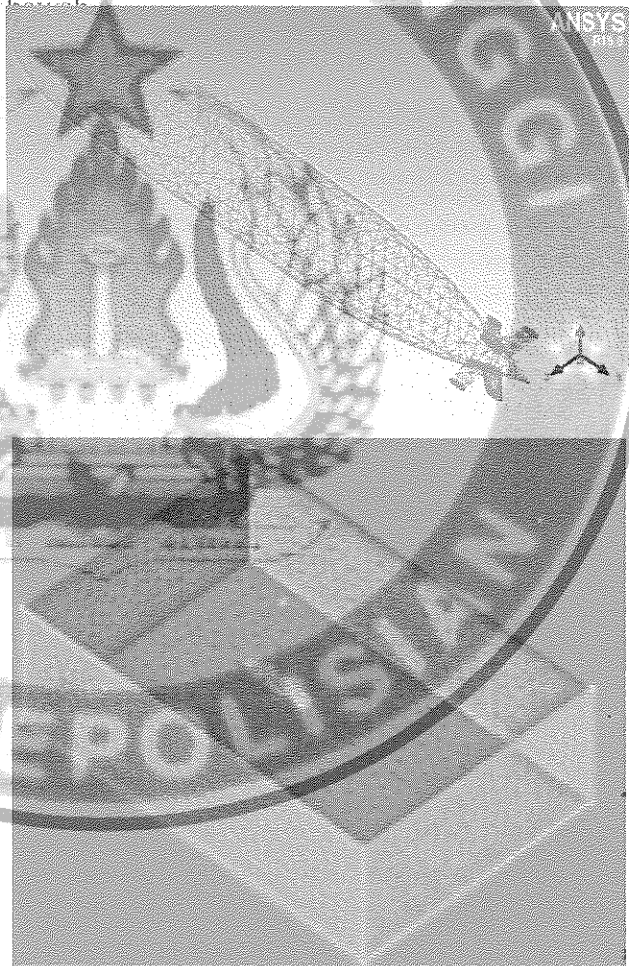
Meshing

Tahap berikutnya setelah model 3D dibuat adalah *meshing* dengan bantuan ICEM CFD. Caranya adalah dengan membagi geometri model ke dalam elemen-elemen kecil (segitiga, *tetra/mixed*, *hexa-dominant*) yang disebut *cell*. Gabungan dari *cell-cell* tersebut membentuk satu kesatuan yang disebut *mesh* atau *grid* karena gabungan dari elemen-elemen tersebut membentuk semacam jala. Setelah model 3D hasil pemodelan software Maxsurf diekspor ke dalam bentuk file .igs, selanjutnya pada ICEM CFD file tersebut diimpor untuk kemudian dilakukan pembuatan domain komputasi. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, domain-domain ini terdiri dari *inlet*, *outlet*, *wall*, *top*, dan *bottom*. Domain-domain tersebut berbentuk persegi panjang diberi *surface* dan membentuk balok yang mengelilingi model kapal. Pembuatan domain-domain tersebut dapat dilihat pada Gambar 21 di bawah ini.

Setelah itu, langkah selanjutnya adalah pembagian elemen model menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (*cells*) yang biasa disebut *meshing*. Pada tahap ini ukuran *meshing* ditentukan dengan perbandingan antara model dengan domain yakni 1:10. Durasi lamanya

proses *meshing* bergantung pada ukuran *meshing* dan jumlah elemen yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran *meshing* dan semakin banyak jumlah elemennya, maka akan semakin lama pula durasi proses *meshing*. Untuk mendapatkan ukuran *meshing* serta jumlah elemen yang optimum perlu dilakukan analisis *grid independence*.

Dengan ukuran *mesh* serta jumlah elemen optimum tersebut, *mesh* yang dihasilkan berukuran sangat kecil dan rapat satu dengan yang lain. Hasil ukuran (kerapatan) *mesh* untuk domain komputasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



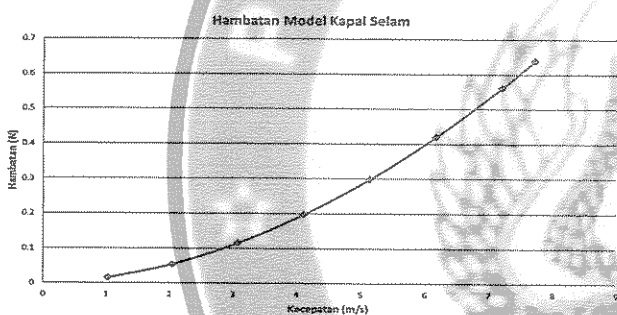
Gambar 21. Ukuran kerapatan *mesh* pada domain komputasi dan model kapal selam.

Hasil Pemodelan Numerik

Tabel 3 di bawah ini merupakan hasil percobaan hambatan viskose dengan metode numerik. Perhitungan nilai hambatan dilakukan pada 8 variasi kecepatan: 1.028 m/s, 2.057 m/s, 3.086 m/s, 4.115 m/s, 5.144 m/s, 6.172 m/s, 7.201 m/s, dan 7.716 m/s. Hasilnya menunjukkan bahwa hambatan terbesar dihasilkan oleh model yang memiliki kecepatan terbesar. Grafik hasil

perhitungan hambatan model kapal selam dengan CFD ditunjukkan pada Gambar 22.

Kecepatan(m/s)	Hambatan(N)
1.028	0.014
2.057	0.054
3.086	0.115
4.115	0.196
5.144	0.298
6.172	0.420
7.201	0.561
7.716	0.639



Gambar 22. Hasil perhitungan hambatan model kapal selam dengan CFD dan tabel hasil perhitungan hambatan model kapal selam dengan CFD.

KESIMPULAN

Kegiatan rancang bangun kapal selam mini 22 m menghasilkan desain konseptual, desain awal, dan model uji hidrodinamika namun belum mencakup desain dasar (*basic design*), desain rinci (*detailed engineering design*), dan *technical data package* (TDP).

Kegiatan penelitian dan pengembangan kapal selam mini (ringan) ini mempunyai aspek strategis karena pembuatan kapal selam mini (ringan) dapat meningkatkan *deterrent effect* (faktor penggentar), *gaining position* (posisi tawar) negara Indonesia di dunia terutama kawasan ASEAN, menyeimbangkan kekuatan militer dengan negara tetangga, menjaga wilayah NKRI di perairan dangkal, mengurangi ketergantungan kepada luar negeri dan dampak embargo, serta merupakan langkah awal menuju kemandirian

industri pertahanan nasional di bidang kapal selam mini (ringan).

Pada akhir proses rancang bangun kapal selam mini 22 meter ini didapatkan hasil desain kapal selam ringan yang mampu membawa 14 orang pengawak, dengan ukuran utama LOA: 28 m; B: 4 m; H: 4 m; T: 3 m; *V submerged maximum*: 15 knot; bobot: 223.0 ton.

DAFTAR PUSTAKA

1. Achmadi, T. et al. (1997). Optimisasi desain kapal kontainer untuk pelayaran Indonesia. *Riset Unggulan Terpadu*.
2. Arentzen, E. S. (1960). Naval architectural aspects of submarine design. *SNAME*, 68.
3. Boisiayon, G. (1983). Design criteria for conventional submarines. Makalah disampaikan dalam *International Symposium on Naval Submarines*, London.
4. Brown, A. J. (2003). Multi-objective optimization in naval ship design. *Naval Engineers Journal*.
5. Brown, A. J, et al. (2005). *Design report SSLW*. Virginia Tech University.
6. Budiyanto, D. (2002). Mencoba mengenal midget/baby submarine. *Jalesveva Jayamahe*, 22.
7. Budiyanto, D. (2004). Mencoba mengenal midget/baby submarine. Korespondensi pribadi.
8. Burcher, et al. (1994). *Concepting submarine design*. Cambridge: Cambridge University Press.
9. Daniel, R. J. (1988). Consideration influencing submarine design. Makalah disampaikan pada *International Symposium on Naval Submarines*, London.
10. Djatmiko, E. B. et al. (2002). Rancang bangun wahana benam *remotely operated vehicle* (ROV). *Riset Unggulan Kemitraan*.
11. Gabler, U. (1986). *Submarine Design*. Bernard and Craefe Verlag.
12. Hess, A. O. (1976). On the problem of shaping an axisymmetric body too btain low drag at large Reynolds number. *SNAME*.
13. Leksono, S. et al. (1997). Perancangan finned propeller untuk meningkatkan efisiensi. *Riset Unggulan Terpadu V*.

14. *Matlaband Maxsurf User Manual*. (2006).
15. Popov, E. P. (1976). *Mechanics of materials*. NJ: Prentice-Hall.
16. Rosyid, D.M. et al. (2001). Pengembangan struktur laminasi untuk aplikasi kelautan. *Riset Unggulan Kemitraan*.
17. Russo, V. L. et al. (1960). Submarine tanker. *SNAME*, 68.
18. Saaty, T. L. (1994). *Fundamental of decision making and priority theory with the analytical hierarchy process*. Pittsburgh: RWS Publications.
19. Wardhana, W. et al. (1998). Kajian numerik dan eksperimental interaksi hidrodinamika sayap hidrofoil; tahapan penting dalam racang bangun kapal hidrofoil. *Riset Unggulan Terpadu IV*.
20. Wardhana, W. et al. (2004). Kajian numerik dan eksperimental stabilitas dari gerakan model kapal hidrofil. *Riset Unggulan Terpadu X*.

