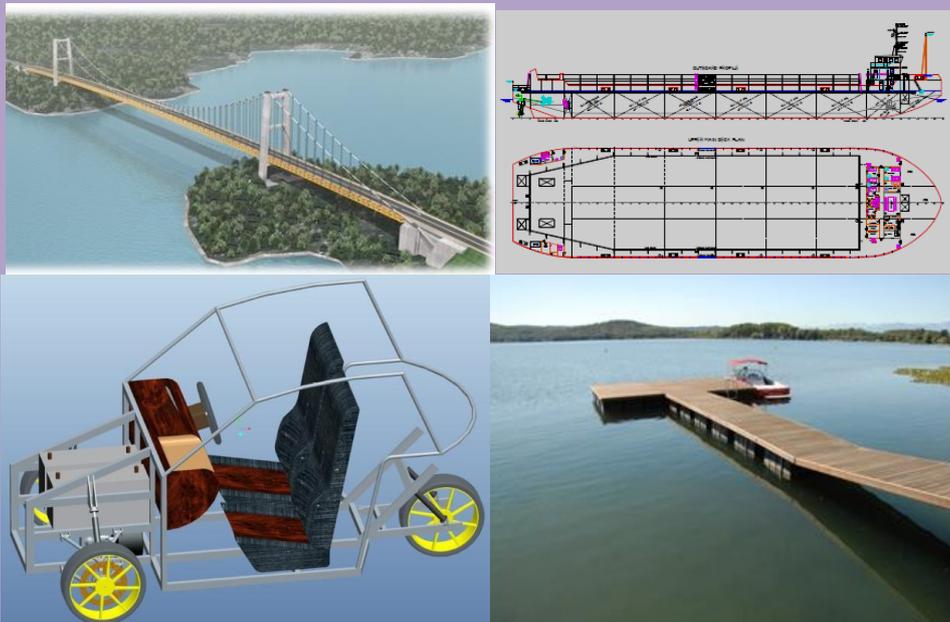




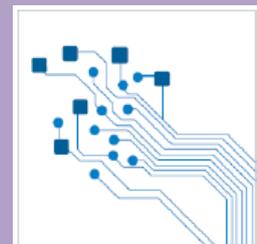
Majalah Ilmiah
Pengkajian Industri

Volume 11 Nomor 2 : Agustus 2017

Topik
Industri Teknologi Transportasi



Diterbitkan oleh :
Deputi Teknologi Industri Rancang Bangun & Rekayasa
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Jakarta



MPI	Vol. 11	No. 2	Hal. 85 - 154	Jakarta, Agustus 2017	E-ISSN 2541-1233 P-ISSN 1410-3680
-----	---------	-------	---------------	-----------------------	--------------------------------------



LEMBAGA
ILMU PENGETAHUAN
INDONESIA

P2
MI
Panitia
Penilai
Majalah
Ilmiah

SERTIFIKAT

Nomor: 585/Akred/P2MI-LIPI/09/2014

Akreditasi Majalah Ilmiah

Kutipan Keputusan Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Nomor 1014/E/2014 Tanggal 26 September 2014

Nama Majalah : Majalah Ilmiah Pengkajian Industri
ISSN : 1410-3680
Redaksi : Deputi Bidang Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa,
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT),
Gedung Teknologi II (251), Lantai 3, PUSPIPEK Serpong,
Tangerang Selatan 15314

Ditetapkan sebagai Majalah Ilmiah

TERAKREDITASI

Akreditasi sebagaimana tersebut di atas berlaku selama 3 (tiga) tahun

Cibinong, 26 September 2014
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Ketua Panitia Penilai Majalah Ilmiah-LIPI

Prof. Dr. Rochadi,
NIP 195007281978031001



E-ISSN 2541-1233
P-ISSN 1410-3680

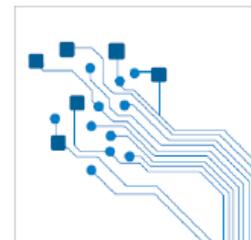


Majalah Ilmiah
Pengkajian Industri

Volume 11 Nomor 2 : Agustus 2017

Topik
Industri Teknologi Transportasi

Diterbitkan oleh :
Deputi Teknologi Industri Rancang Bangun & Rekayasa
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Jakarta



MPI	Vol. 11	No. 2	Hal. 85 - 156	Jakarta, Agustus 2017	E-ISSN 2541-1233 P-ISSN 1410-3680
-----	---------	-------	---------------	-----------------------	--------------------------------------

Majalah Ilmiah Pengkajian Industri

Volume 11 Nomor 2 : Agustus 2017

Majalah Ilmiah Pengkajian Industri adalah wadah informasi bidang Pengkajian Industri berupa hasil penelitian, studi kepustakaan maupun tulisan ilmiah terkait dalam bidang industri. Terbit pertama kali pada tahun 1996 frekuensi terbit tiga kali setahun bulan April, Agustus dan Desember

Editor in Chief :

Dr. Ir. Rizqon Fajar, M.Sc (Tek. Bahan Bakar dan Pembakaran) (PTSPT)

Editors :

Dr. Dipl.Ing. Mulyadi Sinung Harjono,MT (PTSPT-BPPT)

Ir. Endro Wahyu Tjahjono, (PTSEIK-BPPT)

Section Editors :

Ihwan Haryono,ST, (BT2MP-BPPT)

Eka Febriyanti, ST. MT. (B2TKS-BPPT)

Mohamad Ivan Ajisaputro,ST, (PTSTP-BPPT)

Copy Editors :

Prasetyaning Diah Rizky Lestari,M.Si, (BT2MP-BPPT)

Dimas Bahtera Eskayudha,ST (PTSPT-BPPT)

Malinda Sabrina,S.Si (PTSPT-BPPT)

Hendrato, ST (PTSPT-BPPT)

Fitriyanto, ST, PTIH-BPPT)

Siti Yubaidah, ST, MT, (BT2MP-BPPT)

Layout Editors :

Muhammad Maruf,MT, BT2MP-BPPT)

Era Restu Finalis, ST,MT (PTSEIK-BPPT)

Proofreaders :

Eka Febriyanti, ST. MT. (B2TKS-BPPT)

Ihwan Haryono,ST, (BT2MP-BPPT)

Reviewers :

Dr. Maizirwan Mel, MSc. Bidang Bio Process Engineering IIUM Gombak-Kuala Lumpur Dr. Ing.Ir.,

Prof. Ir. Wimpie Agoeng N. Aspar, MSCE., Ph.D. Bidang Teknik Sipil BPPT

Ir. Eko Syamsudin, M. Eng. (Teknik Mesin, Bid. Industri Hankam),(PTIPK)

Prof. Dr.Ir. Sulistijono, DEA Bidang Teknik Desain Material FTI-ITS

Dr. Ir. Myrna Ariati,MS Bidang Metalurgi dan Material, FT-UI

Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng. Bidang Teknik Mesin BPPT

H. Agus Suhartono Bidang Material BPPT

Alamat Redaksi/Penerbit :

Deputi Bidang Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa

Gedung Teknologi II (251) Lantai 3, PUSPIPTEK Serpong, TangSel (15314)

Telepon : (021)75875944, ext. 1112, Fax.(021)75875938

E-mail : majalah_mpi@yahoo.com

Home Page : <http://ejurnal.bppt.go.id/index.php/MIPI>



9 772541 123012

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada para pakar yang telah diundang sebagai Mitra Bestari/Penelaah oleh Majalah Ilmiah Pengkajian Industri dalam Volume 11, No. 2, Tahun 2017. Berikut ini daftar nama pakar yang berpartisipasi :

Nama	Alamat/Instansi
Dr, Ir. Eko Syamsudin, M.Sc. (Specialist Avionics and Navigation)	Pusat Teknologi Industri Keamanan dan Pertahanan Gedung Teknologi 2, PUSPIPTEK, Serpong
Agus Suhartono , H.Dr.Ing.Ir. (Bid.Material)	B2TKS, Kawasan Puspiptek, Gedung 220 Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang, Banten
Dr.Ir. Suryadi,MT. (Bidang Mekanika dan Material)	Pusat Teknologi Material Gedung Pusat Teknologi Material (224), Lt.2 Kawasan Puspiptek Serpong,
Prof. Dr. Ir. Buana Maruf,MSc (Bidang Teknik Perkapalan)	Pusat Teknologi Rekayasa Industri Maritim Gedung Teknologi 2 Lt.3, Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang, Banten
Dr. Ir. Amin Suhadi, M. Eng (Bidang Mekanika dan Material)	B2TKS, Kawasan Puspiptek, Gedung 220 Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang, Banten
Dr. Ir. Rizkon Fajar, (Bid.Teknik Bahan Bakar dan Pembakaran)	Pusat Teknologi Sistem dan Prasarana Transportasi Gedung Teknologi II (251), Lt.3 Kawasan Puspiptek Serpong,

SUSUNAN REDAKTUR PELAKSANA

Editor in Chief :

Dr. Ir. Rizqon Fajar, M.Sc (Tek. Bahan Bakar dan Pembakaran) (PTSPT)

Editors :

Dr. Dipl.Ing. Mulyadi Sinung Harjono,MT (PTSPT-BPPT)

Ir. Endro Wahyu Tjahjono, (PTSEIK-BPPT)

Section Editors :

Ihwan Haryono,ST, (BT2MP-BPPT)

Eka Febriyanti, ST. MT. (B2TKS-BPPT)

Mohamad Ivan Ajisaputro,ST, (PTSTP-BPPT)

Copy Editors :

Prasetyaning Diah Rizky Lestari,M.Si, (BT2MP-BPPT)

Dimas Bahtera Eskayudha,ST (PTSPT-BPPT)

Malinda Sabrina,S.Si (PTSPT-BPPT)

Hendrato, ST (PTSPT-BPPT)

Fitriyanto, ST, (PTIH-BPPT)

Siti Yubaidah, ST, MT, (BT2MP-BPPT)

Layout Editors :

Muhammad Maruf,MT, (BT2MP-BPPT)

Era Restu Finalis, ST,MT (PTSEIK-BPPT)

Proofreaders :

Eka Febriyanti, ST. MT. (B2TKS-BPPT)

Ihwan Haryono,ST, (BT2MP-BPPT)

Reviewers :

Dr. Maizirwan Mel, MSc. Bidang Bio Process Engineering IIUM Gombak-Kuala Lumpur

Dr. Ing.Ir., Prof. Ir. Wimpie Agoeng N. Aspar, MSCE., Ph.D. Bidang Teknik Sipil BPPT

Dr.Ir. Eko Syamsudin, M. Sc. Bid. Teknik Mesin, Industri Hankam BPPT

Prof. Dr.Ir. Sulistijono, DEA Bidang Teknik Desain Material FTI-ITS

Dr, Ir. Myrna Ariati,MS Bidang Metalurgi dan Material, FT-UI

Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng. Bidang Teknik Mesin BPPT

Prof.Dr.Ir. Buana Maruf, Bidang Transportasi Perkapalan BPPT

Dr. Ir. Amin Suhadi, M. Eng Bidang Mesin dan Material BPPT

Dr. Ir. H. Agus Suhartono Bidang Material BPPT

Dr.Ir. Suryadi,MT, Bidang Mesin dan Material BPPT

Prof. Dr. Ir. Bambang Teguh P., Dipl. Ing. DEA. Bidang Mekanika Fluida, Konversi Energi BPPT

Dr. Ir. Cuk Supriyadi Ali Nandar, M.Eng. Bidang Teknologi Sistem Stabilitas Ketenagaan dan Kendali BPPT

Dr. Hari Setiapraja, M.Eng. Bidang Teknologi Industri dan Otomotif BPPT

Ir. Djoko W. Karmiadji, MSME., Ph.D., Bidang Konstruksi Beton, Teknik Sipil BPPT

Pengantar

Majalah Pengkajian Industri Volume 11 No. 2 Agustus 2017 merupakan edisi dengan topik Industri Teknologi Transportasi. Teknologi transportasi selama ini terus dikembangkan baik berupa sarana maupun prasarana, karena adanya peningkatan tuntutan kebutuhan akan pemindahan manusia dan barang yang aman, nyaman dan cepat. Banyak penelitian dan kajian yang dilakukan oleh berbagai pihak baik berupa lembaga maupun perorangan yang bertujuan untuk memenuhi tuntutan tersebut. Pada Majalah Ilmiah Pengkajian Industri edisi kali ini memuat beberapa penelitian dan kajian menarik mengenai industri transportasi terutama untuk kepentingan pertahanan nasional diantaranya adalah :. Simulasi Numerik Hidrodinamika Pada Desain Konfigurasi Wave Deflector Untuk Kendaraan Amfibi Beroda Ban, Kemampuan Strategis Pesawat Udara Nir Awak Bppt Untuk Dioperasikan Dari Kapal Perang serta Anoda Pb dan Gel Elektrolit Untuk Propulsi Kapal Selam

Pada terbitan ini juga ditampilkan topik yang terkait penelitian dan analisa yang terkait transportasi yaitu, Analisis Kekuatan Lentur Statis Dan Dinamis Bantalan Sintetis Untuk Jalan Kereta Api. Analisis Kegagalan *Impeller* Penyebab Kerusakan Pompa Air Kapal Laut. Analisis Kerusakan Radiator Sepeda Motor 150cc, Analisis Pembebanan Statik Pada Rangka Bogie Automatic People Mover System (Apms) Menggunakan Standar Uic-615 Dengan Finite Element. Dan Kajian Hidrodinamika Kapal Semikatamaran Untuk Transportasi Sungai

Semoga pembahasan pada terbitan ini bermanfaat bagi perkembangan industri transportasi sehingga mampu menjadi industri yang unggul dengan didukung oleh sumber daya yang produktif. Diharapkan juga informasi ini akan menjadi bagian dalam perkembangan penelitian dan rekayasa lebih lanjut.

Redaksi selalu berusaha melakukan perbaikan-perbaikan dalam rangka meningkatkan mutu Majalah Pengkajian Industri. Selanjutnya redaksi berencana menerbitkan Vol. 11 No. 3 bulan Desember 2017 dengan Topik "Industri Teknologi Hankam dan Material". Redaksi sangat mengharapkan adanya kritik dan saran yang sifatnya membangun.

Redaksi

Majalah Pengkajian Industri

- Analisis Kegagalan *Impeller* Penyebab Kerusakan Pompa Air Kapal Laut. 85 - 94
Impeller Failure Analysis Causes Of Sentrifugal Pump Damage From Ship Unit (Eka Febriyanti, Sutarjo, Khairul Anwar)
- Analisis Kekuatan Lentur Statis Dan Dinamis Bantalan Sintetis Untuk Jalan Kereta Api 95 - 100
Static And Dynamic Analysis Of Bending Strength Of Synthetic Sleepers For Railway (Puguh Triwinarno)
- Analisis Kerusakan Radiator Sepeda Motor 150cc 101 - 108
Failure Analysis of 150cc Motor Cycle Radiator. (Amin Suhadi)
- Simulasi Numerik Hidrodinamika Pada Desain Konfigurasi Wave Deflector Untuk Kendaraan Amfibi Beroda Ban 109 - 116
Simulation Of Numerical Hydrodynamics In Wave Deflector Configuration Design For Equipment Amfibi Vehicles. (Abdul Aziz, Abid Paripurna Fuadi, Apid Rustandi)
- Kemampuan Strategis Pesawat Udara Nir Awak Bppt Untuk Dioperasikan Dari Kapal Perang. 117 - 130
The Strategic Flight Performance Of Bppt Uav For Supporting The Naval Operation. (Jemie Muliadi, Dewi H. Budiarti, Akhmad Rifai, Dyah Jatiningrum)
- Analisis Pembebanan Statik Pada Rangka Bogie Automatic People Mover System (Apms) Menggunakan Standar Uic-615 Dengan Finite Element. 131 - 140
Analysis Of Static Loading On Bogie Frame Automatic People Mover System (Apms) Using Uic-615 Standard With Finite Element. (Setyo Margo Utomo, Jean Mario Valentino, Beny Halfina, Hendrato)
- Anoda Pb dan Gel Elektrolit Untuk Propulsi Kapal Selam 141 - 146
Anoda Pb and Electrolit Gel for Submarine Propution. (Hens Saputra, M. Rosjidi, Abdul Ghofar, Murbantan T., M. Ismail, Dorit B. Islami)
- Kajian Hidrodinamika Kapal Semikatamaran Untuk Transportasi Sungai. 147 - 156
Study Of Semikatamaran Ship Hydrodynamics For River Transportation. (Luhut Tumpal Parulian Sinaga)

**ANALISIS KEGAGALAN *IMPELLER* PENYEBAB KERUSAKAN POMPA AIR KAPAL LAUT
(*IMPELLER FAILURE ANALYSIS CAUSES OF CENTRIFUGAL PUMP DAMAGE FROM SHIP UNIT*)**

Eka Febriyanti, Sutarjo, Khairul Anwar

Abstrak

Impeller merupakan bagian dari pompa sentrifugal yang digunakan untuk kapal laut dan telah mengalami korosi seragam secara signifikan setelah satu tahun pengoperasian. *Impeller* terbuat dari ASTM B198-13A, grade C87400 yang merupakan jenis *silicon brass*. Hasil pemeriksaan visual menunjukkan bahwa seluruh permukaan kecuali pada bagian yang dilindungi oleh cat mengalami proses korosi di seluruh permukaan. Sedangkan pemeriksaan SEM menunjukkan adanya *selective etching* fasa-fasa tertentu. Hal pemeriksaan tersebut juga dikonfirmasi dengan pemeriksaan metalografi dimana menunjukkan adanya *leaching* dari fasa yang kaya akan unsur Zinc mendekati zona terekspos. Oleh karena itu, mekanisme korosi yang terjadi mengarah pada *dezincification*. Analisis komposisi kimia dari *impeller* menunjukkan bahwa material *impeller* yang diperiksa merupakan jenis *silicon brass* yang tidak tahan terhadap serangan klorida dibandingkan *leaded red brass*. Dalam *rules klas/marine klas* umumnya menggunakan material *leaded gunmetal bronze* yang mengacu pada spesifikasi ASTM B584-836 atau SAE 40 atau UNS C83600 atau lebih dikenal dengan *leaded red brass*. *Leaded red brass* mempunyai karakteristik seperti *machinability* yang sangat baik, ketahanan aus yang sangat baik pada pelumasan normal, serta ketahanan terhadap korosi, fatik, dan dampak yang baik. Selain itu, material ini juga memiliki kualitas permukaan yang sangat baik, konduktivitas yang baik, dan sekaligus tahan terhadap air laut. Oleh karena itu, material *leaded red brass* sering diaplikasikan pada produk *marine*^{1-3]}.

Kata Kunci : *Impeller*, pompa, kapal laut, korosi, *dezincification*

**ANALISIS KEKUATAN LENTUR STATIS DAN DINAMIS BANTALAN SINTETIS UNTUK JALAN KERETA API
(*STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF BENDING STRENGTH OF SYNTHETIC SLEEPERS FOR RAILWAY*)**

Puguh Triwinanto

Abstrak

Tingginya biaya perawatan dan permasalahan lingkungan dari bantalan kayu, beton, dan baja memacu peneliti untuk melakukan penelitian bantalan alternatif, salah satunya adalah bantalan komposit. Pada saat ini pasar global bantalan komposit dan juga bantalan sintesis meningkat, sebab mempunyai keunggulan mencakup rasio kekuatan tinggi terhadap berat, tahan korosi, tahan kelembaban dan serangga serta tidak menghantarkan panas dan listrik.

Material tradisional yang digunakan untuk bantalan jalan kereta api adalah kayu, beton, dan baja. Bantalan beton tidak sesuai dipasang pada jembatan baja dan yang sesuai adalah bantalan kayu, tetapi bantalan kayu mempunyai umur pakai pendek, mahal, dan langka.

Di Indonesia wacana penggunaan bantalan sintesis sudah diusahakan dalam 10 tahun terakhir. Pada dua tahun terakhir dimulai riset dan pengembangan bantalan sintesis jenis *urethane foam resin* yang diperkuat *glass fibre*. Metode dan kriteria lulus uji digunakan JIS E 1203 : 2007. Dari hasil pengujian dan analisis spesimen bantalan sintesis memenuhi persyaratan kekuatan lentur statis dan dinamis sesuai standar JIS E 1203 : 2007. Dengan demikian bantalan hasil riset ini dapat dilanjutkan uji *track*, dimana bantalan sintesis diuji coba untuk dipasang pada jalan kereta api.

Kata kunci : bantalan, sintesis, lentur, statis, dinamis

**ANALISIS KERUSAKAN RADIATOR SEPEDA MOTOR 150cc
(FAILURE ANALYSIS OF 150cc MOTOR CYCLE RADIATOR)**

Amin Suhadi

Abstrak

Sepeda motor yang mempunyai kapasitas mesin relatif besar memerlukan pendingin yang efisien agar ketika beroperasi tidak mengalami panas yang berlebihan sehingga dapat merusak mesin tersebut. Jika sepeda motor dengan kapasitas mesin kecil cukup menggunakan pendingin udara, maka sepeda motor dengan kapasitas mesin besar menggunakan pendingin dengan sistem cairan, dan dikenal dengan nama radiator. Jika radiator rusak maka proses pendinginan tidak berjalan dengan baik sehingga berpotensi terjadi kebakaran pada mesin. Pada penelitian ini dilakukan analisa terhadap kebocoran yang terjadi pada sebuah radiator sepeda motor 150cc, dengan tujuan untuk mencari penyebab kerusakan dari radiator tersebut agar kerusakan serupa tidak terjadi pada produk sepeda motor yang sejenis. Analisa yang dilakukan meliputi pemeriksaan permukaan patahan dengan cara analisa makro fraktografi, pemeriksaan struktur mikro, pemeriksaan komposisi kimia, pemeriksaan kekerasan dan pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) serta pemeriksaan menggunakan EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa retak dan patahnya penopang radiator disebabkan adanya beban dinamis atau getaran yang terjadi pada konstruksi tersebut dan dipikul oleh pelat penopang radiator. Bukti dari hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa karet yang berfungsi sebagai peredam getaran radiator pada posisi atas telah aus dan kendur sehingga fungsi peredaman tidak optimum lagi, sehingga pelat penopang radiator retak dan retaknya merambat ke kisi kisi yang berisi cairan pendingin dan mengakibatkan kebocoran.

Kata Kunci : radiator, pendingin, mesin, bocor

**SIMULASI NUMERIK HIDRODINAMIKA PADA DESAIN KONFIGURASI WAVE DEFLECTOR
UNTUK KENDARAAN AMFIBI BERODA BAN
(SIMULATION OF NUMERICAL HYDRODYNAMICS IN WAVE DEFLECTOR CONFIGURATION
DESIGN FOR EQUIPMENT AMFIBI VEHICLES)**

Abdul Aziz, Abid Paripurna Fuadi, Apid Rustandi,

ABSTRAK

Wave Deflector merupakan komponen pendukung pada kendaraan amfibi yang berfungsi untuk menghempaskan aliran fluida dari arah depan ke samping kendaraan sehingga meningkatkan faktor keselamatan pengendara kendaraan amfibi saat melakukan penyeberangan atau pendaratan dari kapal ke pantai. Sampai saat ini industri pertahanan dan keamanan di Indonesia memproduksi kendaraan tempur beroda ban yang belum dilengkapi *Wave Deflector*. Oleh karenanya perlu dikaji dan dikembangkan desain konfigurasi *Wave Deflector* yang memiliki nilai tahanan air yang optimal dan sesuai dengan mission requirements. Metodologi yang digunakan pada tulisan ini menggunakan penelitian dan pengembangan (*research & development*), dan tahap kegiatan penelitian ini baru sampai tahap validasi desain dengan melakukan simulasi numerik hidrodinamika pada desain konfigurasi *Wave Deflector* kendaraan amfibi beroda ban. Basis evaluasi hidrodinamika dilakukan dengan perhitungan kinerja tahanan (*resistance*) konfigurasi desain *Wave Deflector* serta diuji melalui simulasi numerik efek *wave making* yang terjadi dari 3 (tiga) tipe konfigurasi desain *Wave Deflector* yang digunakan pada kendaraan tempur. Parameter evaluasi yang dijadikan referensi meliputi : faktor besaran tahanan air, kecepatan kendaraan, tinggi gelombang dan luasan permukaan *Wave Deflector*. Dengan pemasangan *Wave Deflector* model *Wave Deflector* 3 (WD3) pada kendaraan Panser ANOA-2 dalam kondisi operasi penyeberangan basah kerkecepatan 3-4 Knot, dapat menurunkan efek tinggi gelombang yang terjadi berkisar 35 – 80 %. Dari hasil simulasi numerik tersebut dapat disimpulkan dengan penggunaan konfigurasi *Wave Deflector* yang tepat, maka akan mengurangi efek tinggi gelombang pada badan kendaraan amfibi dan akan meningkatkan keselamatan pengendara kendaraan tempur panser amfibi yang ada *Wave Deflector*-nya.

Kata kunci : Wave Deflector, Resistance , Wave making, Kendaraan tempur amfibi

**KEMAMPUAN STRATEGIS PESAWAT UDARA NIR AWAK BPPT UNTUK DIOPERASIKAN DARI KAPAL PERANG
(THE STRATEGIC FLIGHT PERFORMANCE OF BPPT UAV FOR SUPPORTING THE NAVAL OPERATION)**

Jemie Muliadi ^a, Dewi H. Budiarti ^a, Akhmad Rifai ^a, Dyah Jatiningrum ^b

Abstrak

Salah satu cara pemenuhan Minimum Essential Force TNI-AL adalah melalui peningkatan kemampuan Alutsista yang sudah dimiliki. Peningkatan kemampuan tersebut dapat dilakukan dengan melengkapi kapal perang (KRI) dengan PUNA BPPT. Penempatan PUNA BPPT pada kapal perang TNI-AL akan mendukung fungsi operasionalnya, antara lain patroli perbatasan, pengawasan wilayah bahkan hingga pengintaian.

Dalam naskah ini akan disajikan kemampuan jangkauan jarak, ketahanan dan ketinggian terbang PUNA BPPT yang relevan dengan pengoperasiannya dari kapal perang. Perhitungan parameter prestasi terbang PUNA BPPT akan dilakukan dengan pengolahan data uji terbang, dokumen perancangan, dan pendekatan-pendekatan perhitungan yang terkait.

Meskipun PUNA belum mampu menggantikan keseluruhan fungsi helikopter di kapal perang, tapi beberapa fungsi penting tersebut dapat dikerjakan oleh PUNA. PUNA beroperasi dengan konsumsi bahan bakar yang sangat sedikit dan dapat bertolak dan mendarat dengan lebih mudah. Dengan sifat Nir Awak-nya, penggunaan PUNA mengurangi resiko terhadap keselamatan personel yang mengoperasikannya. Hal-hal ini menjadi acuan BPPT dalam mengembangkan PUNA yang dapat beroperasi dari kapal perang.

Kata kunci : PUNA KRI, PUNA BPPT, PUNA tanpa ekor, Jangkauan Terbang, Ketahanan Terbang

**ANALISIS PEMBEBANAN STATIK PADA RANGKA BOGIE AUTOMATIC PEOPLE MOVER SYSTEM (APMS) MENGGUNAKAN STANDAR UIC-615 DENGAN FINITE ELEMENT
(ANALYSIS OF STATIC LOADING ON BOGIE FRAME AUTOMATIC PEOPLE MOVER SYSTEM (APMS) USING UIC-615 STANDARD WITH FINITE ELEMENT)**

Setyo Margo Utomo, Jean Mario Valentino, Beny Halfina, Hendrato

Abstrak

Bogie merupakan suatu kesatuan konstruksi yang mendukung sarana kereta api monorel saat berjalan diatas track. Rangka bogie merupakan konstruksi untuk mendukung carbody terhadap pembebanan. Tujuan dari analisis ini adalah menentukan dan memastikan batas kekuatan statik rangka bogie secara numerik sebelum prototype rangka bogie melalui proses pengujian statik atau tahap verifikasi desain. Tahapan dalam penelitian ini adalah pengumpulan data dan gambar bogie APMS dari PT.INKA Madiun, kemudian dilakukan identifikasi struktur model 3D CAD bogie, dilanjutkan penentuan boundary conditions untuk pembebanan statik dan simulasi pembebanannya. Berdasarkan standar UIC-615 hanya ada dua jenis beban yaitu vertikal dan transversal, dengan nilai maksimumnya adalah 53.234 N dan 48.619 N. Hasil simulasi pengujian statik untuk beban luar biasa (Static test with exceptional load), terjadi deformasi terbesar 0,5 mm pada bagian balanced wheel, dan tegangan maksimal sebesar 175,97 MPa yang terletak pada tumpuan anti roll bar, dikarenakan transverse load yang terjadi pada tumpuan anti roll bar tersebut cukup besar. Nilai safety factor yang terjadi pada area anti roll bar tersebut cukup rendah, yaitu 1,39. Hasil simulasi pengujian statik untuk beban kerja (Static test to simulate the main in-service load) didapat nilai safety factor terendah 2,39 dengan nilai tegangan maksimal sebesar 102,26 MPa dan deformasi sebesar 0,339 mm pada saat load case 8.

Kata kunci : Rangka bogie, standar UIC-615, beban statik

ANODA PB DAN GEL ELEKTROLIT UNTUK PROPULSI KAPAL SELAM (ANODA Pb AND ELECTROLIT GEL FOR SUBMARINE PROPULTION)

Hens Saputra, M. Rosjidi, Abdul Ghofar, Murbantan T., M. Ismail, Dorit B. Islami

Abstrak

Baterai merupakan komponen paling penting dalam sistem energi kapal selam. Hingga saat ini mayoritas kapal selam masih mengandalkan baterai jenis lead acid sebagai sumber energinya termasuk untuk propulsi karena pertimbangan faktor keamanan yang lebih baik untuk jenis baterai dengan kapasitas sangat besar, yaitu sekitar 10.000-15.000 Ah. Kendala yang terjadi untuk baterai yang menggunakan elektrolit berupa cairan antara lain timbulnya gas hidrogen pada waktu charging. Hal ini dapat mengakibatkan baterai menjadi kering dan performanya menurun. Selain itu gas hidrogen yang berlebihan dapat membahayakan kapal selam itu sendiri. Pada penelitian ini dilakukan proses pembuatan anoda dan elektrolit berupa gel yang dapat mengurangi terjadinya penguapan elektrolit sertaantisipasi terjadinya tumpahan elektrolit pada waktu kapal selam melakukan manuver. Sebagai elektrolit digunakan bahan berupa nanoporus anorganik MCM-41 yang dibuat dengan cara hidrotermal menggunakan Tetraethylortosilicate (TEOS) sebagai sumber silika, template organik Cethyltrimethylammonium bromide (CTAB) dan katalis H₂SO₄. Baterai gel lead acid MCM-41 dapat menghasilkan OCV sekitar 2,1 V.

Kata kunci : anoda; lead acid; baterai kapal selam; gel MCM-41; Hexagonally-ordered nanopores

KAJIAN HIDRODINAMIKA KAPAL SEMIKATAMARAN UNTUK TRANSPORTASI SUNGAI

(STUDY OF SEMIKATAMARAN SHIP HYDRODYNAMICS FOR RIVER TRANSPORTATION)

Luhut Tumpal Parulian Sinaga

Abstrak-

Suatu usaha perancangan pemakaian kapal dengan efek gelombang yang tidak merusak lingkungan dan mampu berlayar pada kedalaman perairan terbatas perlu dibuat dan dikembangkan. Bentuk rekayasa lambung yang digunakan adalah mengurangi tegangan permukaan air dengan cara membuat *body ganda* (semacam *Tunnel*) di bawah permukaan air. Untuk selanjutnya *body ganda* di bawah permukaan air ini dinamakan dengan Kapal Hull Semi Catamaran (HSC). Rekayasa lambung kapal HSC dilaksanakan dengan pembuatan beberapa buah model kapal dengan variasi bentuk dan ukuran *Tunnel*. Gelombang timbul akibat pergerakan Kapal HSC diobservasi di kolam uji yang dapat dikontrol kedalaman perairannya. Dari observasi percobaan model kapal yang dilakukan, *Body* kapal bentuk HSC lebih unggul bila dibandingkan dengan penggunaan bentuk *body* kapal konvensional, beberapa keunggulan yang diberikan bentuk kapal HSC diantaranya adalah pola dan tinggi gelombang timbul akibat pergerakan kapal lebih baik. Kapal semikatamaran di perairan dangkal memiliki perbedaan 6,61% lebih kecil bila dibandingkan dengan kapal monohull pada displasmen yang sama. Diharapkan penggunaan kapal HSC sangatlah efektif digunakan sebagai sarana transportasi sungai maupun laut (*Sea River Ship*). Pengembangan, rekayasa dan inovasi bentuk HSC dilaksanakan di Laboratorium Hidrodinamika (UPT-BPPH, BPP Teknologi).

Kata kunci : *perairan dangkal, wake wash, lambungkapal, tunnel body, efisien*

ANALISIS KEGAGALAN *IMPELLER* PENYEBAB KERUSAKAN POMPA AIR KAPAL LAUT

IMPELLER FAILURE ANALYSIS CAUSES OF SENTRIFUGAL PUMP DAMAGE FROM SHIP UNIT

Eka Febriyanti, Sutarjo, Khairul Anwar

Perekayasa Pada Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, BPPT
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang 15314
Tel. (021)-7560539; Fax. (021)-7560538

e-mail : eka.febriyanti@bppt.go.id, sutarjodurrahman@yahoo.com, khairul.anwar@yahoo.com

Abstrak

Impeller merupakan bagian dari pompa sentrifugal yang digunakan untuk kapal laut dan telah mengalami korosi seragam secara signifikan setelah satu tahun pengoperasian. *Impeller* terbuat dari ASTM B198-13A, grade C87400 yang merupakan jenis *silicon brass*. Hasil pemeriksaan visual menunjukkan bahwa seluruh permukaan kecuali pada bagian yang dilindungi oleh cat mengalami proses korosi di seluruh permukaan. Sedangkan pemeriksaan SEM menunjukkan adanya *selective etching* fasa-fasa tertentu. Hal pemeriksaan tersebut juga dikonfirmasi dengan pemeriksaan metalografi dimana menunjukkan adanya *leaching* dari fasa yang kaya akan unsur Zinc mendekati zona terekspos. Oleh karena itu, mekanisme korosi yang terjadi mengarah pada *dezincification*. Analisis komposisi kimia dari *impeller* menunjukkan bahwa material *impeller* yang diperiksa merupakan jenis *silicon brass* yang tidak tahan terhadap serangan klorida dibandingkan *leaded red brass*. Dalam *rules klas/ marine klas* umumnya menggunakan material *leaded gunmetal bronze* yang mengacu pada spesifikasi ASTM B584-836 atau SAE 40 atau UNS C83600 atau lebih dikenal dengan *leaded red brass*. *Leaded red brass* mempunyai karakteristik seperti *machinability* yang sangat baik, ketahanan aus yang sangat baik pada pelumasan normal, serta ketahanan terhadap korosi, fatik, dan dampak yang baik. Selain itu, material ini juga memiliki kualitas permukaan yang sangat baik, konduktivitas yang baik, dan sekaligus tahan terhadap air laut. Oleh karena itu, material *leaded red brass* sering diaplikasikan pada produk *marine* ^{1-3]}.

Kata Kunci : Impeller, pompa, kapal laut, korosi, *dezincification*

Abstract

An impeller that was part of a centrifugal pump used in potable ship was found to have experienced significant corrosion after only one year of service. The impeller was made from ASTM B198-13A, grade C87400 which is a silicon brass. The visual examination showed extensive metal loss on all surfaces. SEM examination showed selective etching of certain phases. This was confirmed with the metallographic examination which showed leaching of the zinc-rich phases close to the exposed surface. The corrosion mechanism was therefore found to be dezincification. A chemical analysis of the impeller material revealed that it was silicon brass and is not as resistant to chloride attack as leaded red brass. In rules klas/marine klas impeller generally uses leaded gunmetal bronze material refers to ASTM B584-836 spesification also called SAE 40 or UNS C93600. This grade is also known "leaded red brass". Leaded red brass offers characteristic such as excellent machinability, excellent wear resistant at normal lubrication, with good resistance to corrosion, fatigue, and impact. Moreover, this material has also anti frictional and excellent quality, good conductivity, and good corrosion resistance to

seawater. Therefore, leaded red brass material is often applied to marine products¹⁻³.

Keywords: Impeller, pump, ship, corrosion, dezinfication

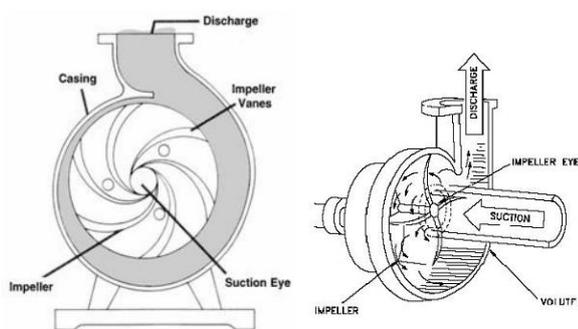
Diterima (received) : 13 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 8 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 29 Juli 2017

PENDAHULUAN

Pompa sentrifugal salah satu jenis *Variable Displacement Pump*. Prinsip kerja dari *Variable Displacement Pump* adalah volume air per menit yang dilewatkan tidak sama dengan volume air yang dihisap setiap menitnya. Pompa ini memiliki prinsip dimana perpindahan zat aliran didasarkan atas adanya gaya sentrifugal⁴.

Untuk dapat bekerja, pompa membutuhkan daya dari mesin penggerak pompa, dimana di dalam pompa fluida terjadi percepatan sedemikian rupa sehingga fluida tersebut mempunyai kecepatan mengalir keluar dari sudu-sudu. Kecepatan keluarnya fluida ini akan berkurang akibat perubahan kenaikan fluida yang dialirkan melalui sudu-sudu ke pipa outlet. Besarnya tekanan yang timbul tergantung pada besarnya kecepatan fluida⁵.

Pompa ini terdiri dari *impeller* yang dipasang pada sebuah poros berputar dalam rumah pompa (*casing*) atau rumah keong (*volute casing*) serta memiliki saluran masuk (*suction*) dan keluaran (*discharge*) fluida. *Impeller* yang berputar menimbulkan tekanan dalam air. Pada tengah *impeller*, air keluar melalui sudu-sudu dengan kecepatan yang diakibatkan adanya gaya sentrifugal sehingga arah aliran yang keluar dari *impeller* tegak lurus terhadap aliran yang menuju ke pusat sudu *impeller*⁶) seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1.
Bagian-bagian pompa sentrifugal⁵

Impeller pada pompa merupakan bagian yang mengubah energi mekanik

(energi pada sudu-sudu *impeller*) diteruskan kepada daya pompa dan akibat adanya efisiensi karena perubahan arah aliran pada sudu-sudu *impeller*⁶).

Kronologis

Impeller pompa sentrifugal dilaporkan mengalami kerusakan setelah 1 tahun pengoperasian. Pompa yang diteliti merupakan pompa ke-satu, dan merupakan pompa yang paling banyak digunakan dari ketiga sistem pompa yang didesain untuk menggerakkan kapal laut. Masalah pada pompa ditemukan ketika terdengar gangguan suara berlebih yang keluar dari pompa. Gambaran desain menyebutkan bahwa *impeller* terbuat dari material B198-13A Grade C87400 yaitu merupakan tipe (*silicon brass*) (82 Cu-0,5 Pb-14 Zn-3,5 Si)⁷.

Grade C87400 merupakan paduan kuningan hasil coran dan yang mempunyai tegangan tinggi (*high strength*) dan merupakan *solid solution strengthened*. Material *silicon brass* mengandung Zn \leq 20% dan Si \leq 6%. Selain itu material *cast silicon brass* memiliki ketahanan korosi yang sangat baik terutama pada lingkungan *aqueous* dan atmosferik. Namun, ketahanan korosi *silicon brass* pada lingkungan air laut (lingkungan klorida) lebih rendah dibandingkan *leaded red brass*. Konduktivitas paduan kuningan dari *silicon brass* lebih rendah dibandingkan paduan tembaga murni²⁻³.

Dalam *rules klas/marine klas* biasanya menggunakan material *leaded gunmetal bronze* yang mengacu pada spesifikasi ASTM B584-836 atau SAE 40 atau UNS C83600 atau lebih dikenal dengan *leaded red brass*. *Leaded red brass* mempunyai karakteristik seperti *machinability* yang sangat baik, ketahanan aus yang sangat baik pada pelumasan normal, serta ketahanan terhadap korosi, fatik, dan dampak yang baik. Selain itu, material *leaded red brass* juga memiliki kualitas permukaan yang sangat baik, konduktivitas yang baik, dan sekaligus tahan terhadap air laut. Oleh karena itu, material *leaded red brass* sering diaplikasikan pada produk *marine*¹⁻³). Pada lingkungan *sea water* yang diatur dalam *rules klas/marine klas*, paduan kuningan

(paduan Cu-Zn) sering mengalami *dezincification*. *Dezincification* merupakan *selective dissolution* unsur Zn yang terjadi pada paduan kuningan (Cu-Zn) yang mempunyai kandungan Zn lebih dari 15% yang terekspos *aerated water* yang mengandung CO₂ dan klorida yang tinggi. *Dezincification* dapat diminimalisir dengan mengurangi agresivitas lingkungan (misalnya dengan *oxygen removal* atau dengan proteksi katodik, namun kedua metode tersebut tidak ekonomis. Biasanya menggunakan paduan yang kurang rentan terhadap *dezincification* seperti *red brass* (15% Zn) dan *admiralty metal* (70% Cu, 29% Zn, 1% Sn, dan 0,04% As). Bahkan untuk lingkungan yang sangat korosif dimana *dezincification* muncul atau untuk bagian-bagian kritis menggunakan *cupronickel* (70-90% Cu, 30-10% Ni)^[8-9].

Lalu, *impeller* yang rusak diuji dan diperiksa di laboratorium supaya akar penyebab kerusakan dapat ditemukan. Hal ini dilakukan untuk mempercepat proses perbaikan dan mencegah terjadinya kerusakan serta kerugian yang sama di pengoperasian selanjutnya.



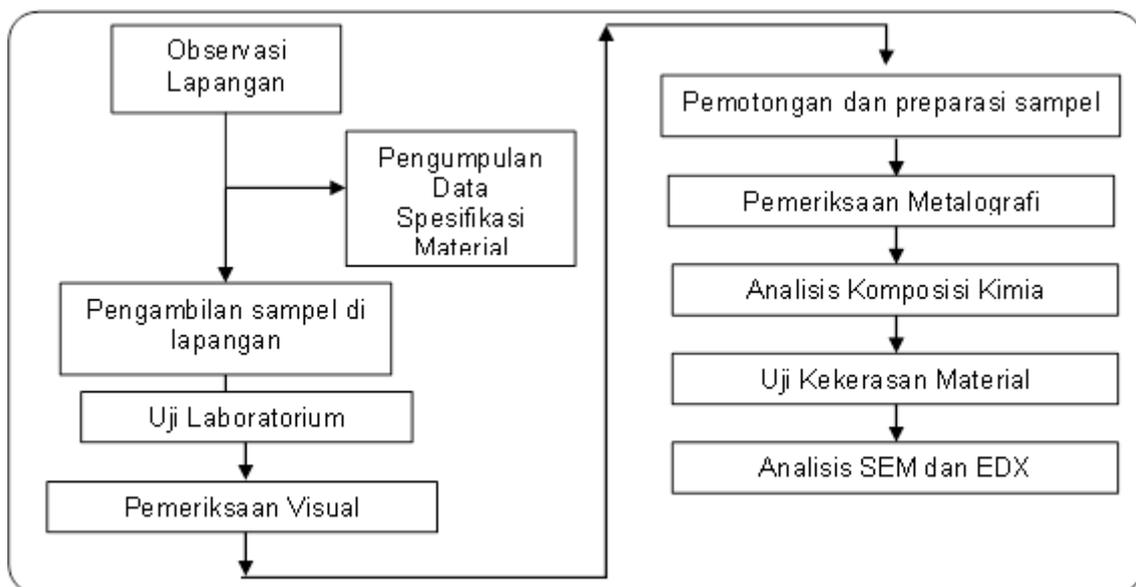
Gambar 2. *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam di Permukaan

BAHAN DAN METODE

Metode penelitian terhadap *impeller* yang mengalami kerusakan perlu mengacu pada *Rules Klas* karena tergolong *marine use* yang digunakan dalam kapal.

Tahapan analisis kerusakan *impeller* menurut *rules klas/ marine klas* dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) terdiri atas pemeriksaan visual yang bertujuan untuk mengidentifikasi awal kerusakan seperti retak, deformasi, efek kavitasi, dll. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan *non destructive* untuk mendeteksi adanya retak. Selanjutnya dilakukan analisis mikroskopik untuk mengidentifikasi proses kerusakan¹⁰⁾.

Di bawah ini merupakan tahapan analisis kerusakan terhadap *impeller* kapal yang mengacu pada *Rules Klas* (BKI) seperti dapat dilihat pada Gambar 3:



Gambar 3.

Diagram Alir Pemeriksaan dan Pengujian terhadap *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam

Pemeriksaan Visual

Analisis visual dan pengamatan menggunakan mikroskop stereo (perbesaran 40x) dilakukan secara detail pada *impeller* yang diterima di laboratorium. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa *impeller* pompa mengalami serangan korosi seragam (*uniform corrosion*) di seluruh permukaan¹¹⁾ seperti yang terlihat pada Gambar 4. Selain itu, permukaan sudu *impeller* pompa juga mengalami korosi *pitting* secara merata di bagian dalam maupun luar seperti yang terlihat pada Gambar 5.

Serangan korosi yang terjadi adalah serangan *uniform corrosion* dengan penampakan seperti busa (*spongy*) di daerah lainnya. Selain itu, daerah yang terserang korosi dan terkena *pitting* mengandung produk korosi berwarna "hijau" atau disebut "*green corrosion residu*"¹²⁾.



Gambar 4.
Pemeriksaan *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam pada Permukaan

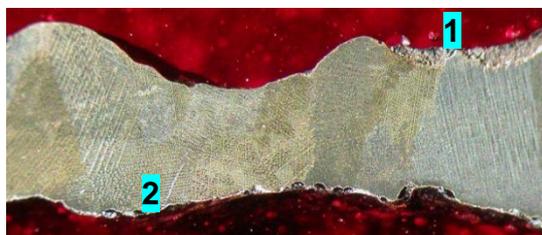


Gambar 5.
Permukaan Sudu *Impeller* Pompa Mengalami Korosi *Piting* secara Merata di Bagian Luar maupun Dalam

Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh serangan korosi terhadap struktur mikro *impeller*. Hasil pengamatan secara mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200x dan 500x yang dapat dilihat dari Gambar 6 sampai Gambar 9.

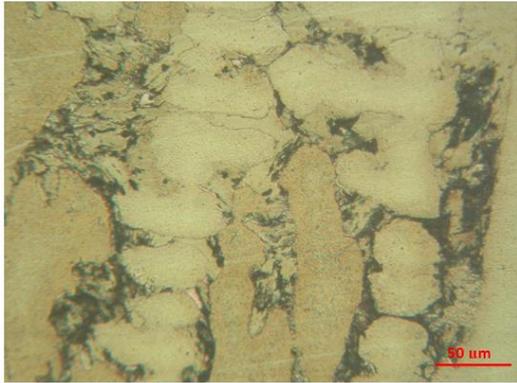
Pengambilan foto mikro etsa sampel metalografi terdiri atas 4 sampel yaitu sampel 1 dan 2 di daerah dinding sudu *propeller*, sampel 3 di lokasi sudu *lining edge*, dan sampel 4 di lokasi sudu *trilling edge*.



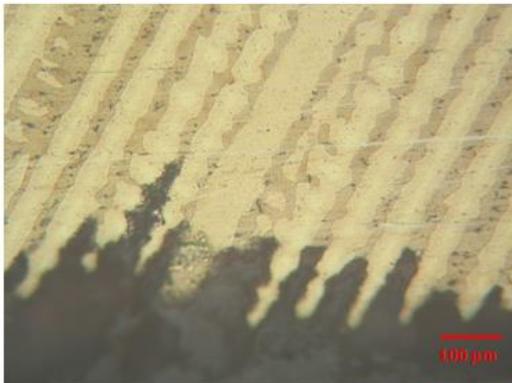
Gambar 6.
Sampel 1 (Dinding Sudu Pengarah)



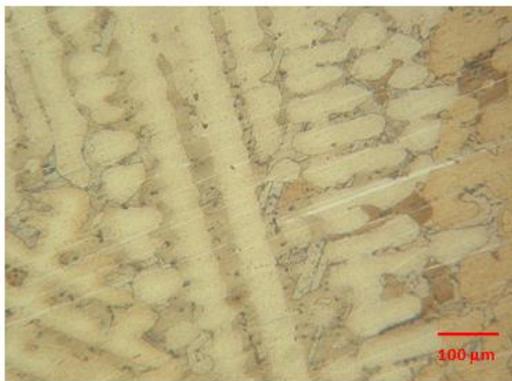
Gambar 7.
Struktur Mikro Sampel 1, Lokasi 1 pada Dinding Sudu Daerah Tepi Material *Impeller* Zn-chill Cast berupa *segregated-alpha dendrites* dan Mengalami Serangan Korosi Melalui Batas Butir



Gambar 14.
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*
Lokasi 2 pada daerah tepi

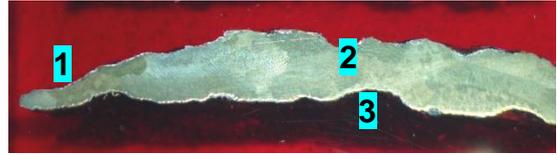


Gambar 15.
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*
Lokasi 3 pada daerah tepi 4 berupa berupa
segregated- α dendrites dan mengalami
serangan korosi merata melalui batas butir

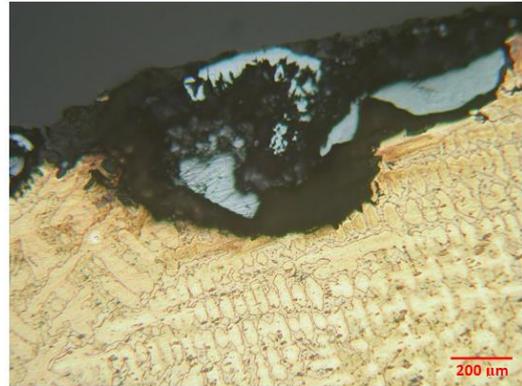


Gambar 16.
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*
Lokasi 4 pada daerah tepi berupa berupa
segregated- α dendrites dan mengalami
serangan korosi merata melalui batas butir

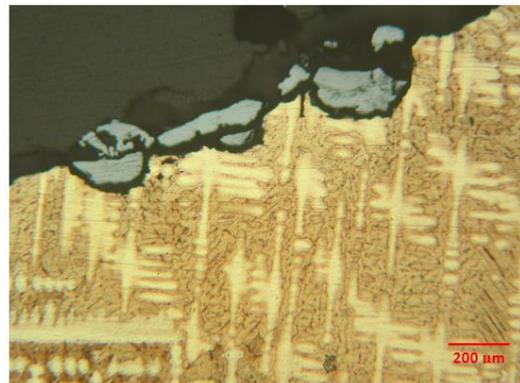
Untuk sampel 4 (sudu *trilling edge*) di lokasi 1, 2, dan 3 pada daerah tepi juga menunjukkan bahwa struktur mikro berupa *segregated- α dendrites*¹³⁾ dan mengalami serangan korosi pitting¹¹⁾ dan merata melalui batas butir¹¹⁾ seperti yang terlihat pada Gambar 17 s/d Gambar 20.



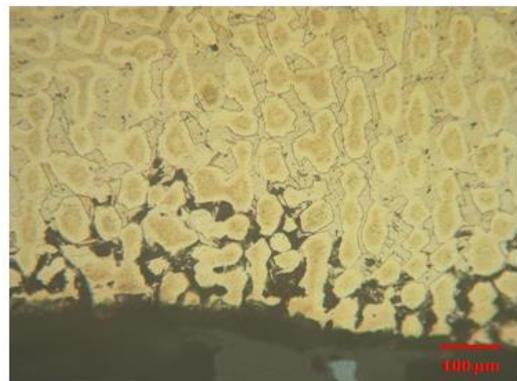
Gambar 17.
Sampel 4 (Sudu *Trilling Edge*)



Gambar 18.
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*
Lokasi 1 pada daerah tepi berupa *segregated- α dendrites* dan mengalami serangan korosi pitting dan merata melalui batas butir



Gambar 19.
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*
Lokasi 2 pada daerah tepi



Gambar 20.
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*
Lokasi 3 pada daerah tepi

Hasil pemeriksaan metalografi pada sampel diambil dari *spongy area* pada permukaan *impeller*. Permukaan sampel yang di-*mounting*, dipoles, dan dietsa dengan $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$. Pemeriksaan metalografi menunjukkan bahwa permukaan lapisan pada kedalaman tertentu sangat berbeda dari hasil pengecoran. Pemeriksaan yang lebih detail pada permukaan lapisan ini seperti yang terlihat pada Gambar 6 s/d Gambar 20. Namun, fasa *zinc interdendritic* mengalami *selective etching*¹⁵⁾ sehingga mempengaruhi performa dari logam.

Analisis Komposisi Kimia

Sampel untuk analisis komposisi kimia diambil dari *impeller* pompa lalu diuji dengan *optical emission spectrometer* (OES). Hasil pengujian komposisi kimia material dari *impeller* dapat. Hasil uji menunjukkan bahwa material *impeller* yang diperiksa sesuai dengan standar material ASTM B198-13A (*silicon brass*) Grade C87400¹⁶⁾ seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1.
Hasil Uji Komposisi Kimia *Impeller*

Unsur / Elemen	<i>Impeller</i>	Standar ASTM B198-13A Grade 87400
Fe	0,179	
Si	3,43	Max. 3,5
Mn	0,0106	
Cr	< 0,001	
Ni	0,0727	
Cu	80,4	Max. 82
Al	< 0,0010	
Ti	< 0,0010	
Zn	15,8	Min. 14
Ag	0,0249	
Sn	0,014	
Pb	< 0,20	Max. 0,5
Mg	< 0,0005	
Co	< 0,0020	
Cd	< 0,0020	

Pengujian Kekerasan

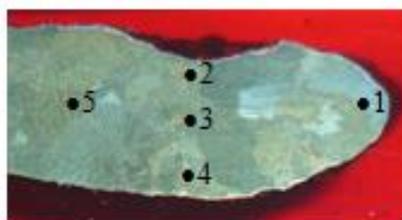
Hasil uji kekerasan terhadap *impeller* dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil uji menunjukkan bahwa untuk permukaan sampel 1, sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 *impeller* memiliki nilai kekerasan masing-masing sekitar 124 – 146 HV, 130-141 HV, 114-131 HV, dan 117-131 HV. Nilai kekerasan yang diperoleh pada keempat sampel sesuai dengan standar ASTM B198-13A kecuali di beberapa titik pada sampel 1 dan Sampel 2 memiliki kekerasan standar ASTM B198-13A (80-137 HV)¹⁶⁾.



Gambar 21.
Sampel 1 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 22.
Sampel 2 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 23.
Sampel 3 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 24.
Sampel 4 Uji Kekerasan *Impeller*

Tabel 2.
Hasil Uji Kekerasan *Impeller*

No.	Nilai Kekerasan (HV)
Sampel 1	
1	146
2	141
3	132
4	133
5	124
Rata-rata	135
ASTM B 198-13A	80-137
Sampel 2	
1	137
2	135
3	132
4	141
5	130
Rata-rata	135
ASTM B 198-13A	80-137
Sampel 3	
1	131
2	123
3	114
4	120
5	127
Rata-rata	123
ASTM B198-13A	
Sampel 4	
1	117
2	
3	
4	
5	
Rata-rata	
ASTM	

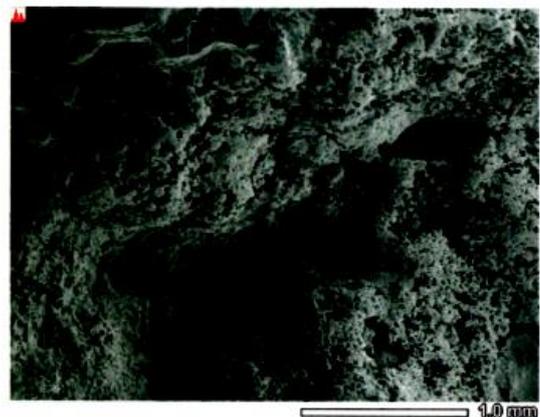
B198-13A

Sumber Data: Hasil pengujian dengan menggunakan alat Frank Finotest

Analisis SEM dan EDX

Sampel untuk analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) diambil dari daerah yang terkorosi pada permukaan *impeller* pompa. Pemeriksaan SEM menunjukkan bahwa *impeller* pompa telah mengalami serangan korosi merata dan telah tertutup produk korosi. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *selective leaching* terjadi pada *silicon brass base metal*. *Selective leaching* tampak dari bentuk pola dendritik dari pengecoran seperti yang terlihat pada Gambar 25 s/d Gambar 27 dalam skala mikroskopik.

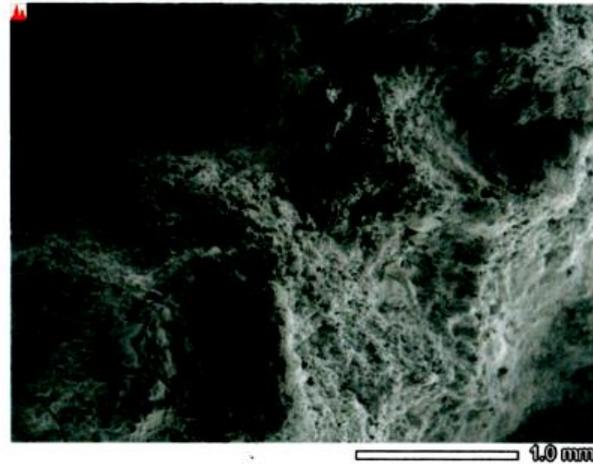
Sedangkan sampel "*green*" *corrosion residu* dari daerah *impeller* yang terkorosi dilakukan pemeriksaan menggunakan analisis semi-kuantitatif EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Hasil analisis menunjukkan bahwa "*green*" *corrosion residu* mengandung unsur Si, Fe, Cu, dan Zn masing-masing sebesar 0,55%; 1,17%; 52,56%; dan 2,61%; serta sejumlah unsur korosif yaitu ion Cl⁻ sebesar 0,33% dan ion S²⁻ sebesar 1,07%. Hasil analisis EDS seperti yang terlihat pada Tabel 3.



```

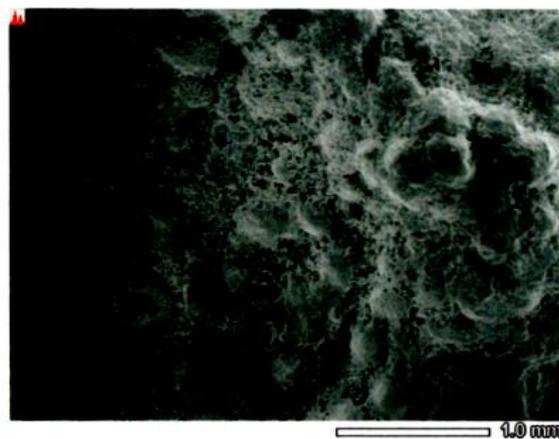
Title      : IMG1
-----
Instrument  : 6510(LA)
Volt       : 20.00 kV
Mag        : x 40
Date      : 2016/01/25
Pixel     : 512 x 384
    
```

Gambar 25.
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 35
Date	: 2016/01/25
Pixel	: 512 x 384

Gambar 26.
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 2



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 35
Date	: 2016/01/25
Pixel	: 512 x 384

Gambar 27.
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 3

Tabel 3.
Analisis EDS pada Produk Korosi di
Permukaan *Impeller*

No.	Nama Unsur	Kandungan Unsur (%) [*]
1	C	12,12
2	O	29,53
3	Si	0,55 ^{**}
4	S	1,07
5	Cl	0,33 ^{***}
6	Ca	1,29 ^{**}
7	Fe	1,17 ^{**}
8	Cu	52,56
9	Zn	2,61

^{*}Semi kuantitatif, nilai rata-rata dari 3 posisi pengukuran

^{**}Hasil pengukuran hanya terlihat pada 2 posisi dari 3 posisi pengukuran

^{***}Hasil pengukuran hanya terlihat pada 1 posisi dari 3 posisi pengukuran

PEMBAHASAN

Hasil dari beberapa pemeriksaan, pengujian, dan analisis menunjukkan bahwa *impeller* pompa secara kimiawi terkorosi oleh kandungan ion klorin dan ion sulfur yang

jelas terlihat dari analisis EDS. Dalam beberapa literatur menunjukkan bahwa sejumlah kandungan ion klorin akan merusak *silicon brass*^{8-9,17-18}). Analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa *impeller* terbuat dari *silicon brass* (ASTM B198-13A Grade C87400). Logam *silicon brass* kurang tahan terhadap lingkungan yang banyak mengandung kandungan klorin dibandingkan *silicon red brass*. Sebagai tambahan, paduan tembaga dengan kandungan unsur Zinc melebihi 15% lebih rentan terhadap *dezincification* seperti yang terjadi pada kerusakan *impeller* pompa.

SIMPULAN

Dari hasil observasi, pengamatan, dan analisis laboratorium serta pembahasan dapat disimpulkan bahwa penyebab kerusakan *impeller* pompa utamanya diperburuk oleh *dezincification*¹⁹⁻²¹) yang disebabkan karena kehadiran unsur korosif seperti ion Cl⁻ dan S²⁻ dalam air laut. Material yang digunakan untuk *impeller* yaitu ASTM B198-13A merupakan jenis *silicon brass* yang merupakan material yang tidak tahan terhadap serangan korosi dibandingkan *leaded red brass*.

SARAN

Saran yang perlu dilakukan untuk mencegah terjadi kerusakan yang sama di masa mendatang yaitu mengganti material *impeller* dari jenis *silicon brass* menjadi *leaded red brass* yang lebih tahan terhadap serangan *dezincification*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Sudarmadi, M.Eng., MSc. selaku Kepala B2TKS BPPT, Dr.Ing.H.Agus Suhartono selaku Kepala Bidang Kajian Material B2TKS, dan Sutarjo, ST, MM selaku Kepala Sub Bidang Analisis Kerusakan dan Umur Sisa untuk koordinasi dan pemberian ijin dalam menggunakan alat uji laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

1. Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Ships: Part 1, Indian Register of Shippings, 2017.

2. *Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications, American Standard of Testing Material*, ASTM B584-14, 2014.
3. William D. Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering 5th edition*, John Willey & Sons Inc., 2001.
4. Josifovic, Aleksandar, Jennifer J. Roberts, dkk, "Reducing the environmental impact of hydraulic fracturing through design optimisation of positive displacement pumps", Energy, 115, 2016, hal. 1216-1233
5. Lee, D.I., dan H.C.Lim, "Erosion-Corrosion Damages of Water Pump Impeller", International Journal of Automotive Technology, 10 (5), 2009, hal.629-634
6. Sharma, Pankaj, "Premature Failure of Ductile Iron Pump Impeller in Cooling Tower System", Journal Failure Analysis and Prevention, 14, 2006, hal. 303-306
7. Lee, Dong-Bok, dan Jae-Jin Moon, "The effect of small additions of Zr, Cr, Mg, Al, and Si on the oxidation of 6 : 4 brass", Metal and Materials International, 8 (2), 2002, hal. 327-332
8. M.G.Fontana, *Corrosion Engineering*, hal. 86-88, McGraw- Hill Book Company, New York, 1986.
9. Denny A. Jones, *Principle and Prevention of Corrosion*, Macmillan Publishing Company, New York, 1992.
10. Rules for The Classification and Construction, Part 1 : Seagoing Ships, Volume I, Biro Klasifikasi Indonesia, 2014.
11. Drach, Andrew, dkk, "Field studies of corrosion behaviour of copper alloys in natural seawater", Corrosion Science, 76, 2013, hal.453-464
12. Nady, H., M.M. El-Rabiei, dan M.Sany, "Corrosion Behaviour and electrochemical properties of carbon steel, commercial pure titanium, copper, and copper-aluminum-nickel alloy in 3,5% sodium chloride containing sulfide ions", Egyptian Journal of Petroleum, 2016.
13. Wang Y.H., dkk, "Microstructure and mechanical properties of columnar-grained copper produced by Ohno continous casting techniques", Material Science and Engineering A, 639, 2015, hal. 122-130 Du, X.S, dkk, "Inhibitive and mechanism of phosphates on the stress corrosion cracking of brass in ammonia solutions", Corrosion Science, 60, 2012, hal. 69-75

14. Bravenec, Edward V. dan J. Edgar Zapata, "*Metallurgical Failure Analysis of A Domestic Water Pump Impeller*", Engineering Failure Analysis, Vol. 1, No.1, 1994, hal. 29-34
15. Bauccio, Michael L., *ASM Metals Reference Handbook 3rd Edition*, hal.458-459, ASM International, Metal Park, Ohio , 1999.
16. *Failure Analysis and Prevention, Metal Handbook*, Vol. 11, 9th edition, hal. 187-221, and 632, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1986.
17. *Corrosion, Metals Handbook, Vol. 13 9th edition*, hal. 131 dan 614, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1986.
18. Kumar, Satendra, dkk, "*Effect of lead content on the dezinfication behaviour of leaded brass in neutral and acidified 3,5% NaCl solution*", Materials and Chemistry and Physics, 105 (1), 2007, hal. 131-141
19. Troiani, H.E., dan A.Baruj, "*In situ optical microscopy study of a phase transformation induced by the dezinfication of beta Cu-Zn*", Material Science and Engineering : A, 454-455 ,2007, hal. 441-445
20. Campanella, L., dkk, "*The effect of tin on dezinfication of archaeological copper alloy*", Corrosion Science, 51 (9) , 2009, hal.2183-2191

ANALISIS KEKUATAN LENTUR STATIS DAN DINAMIS BANTALAN SINTETIS UNTUK JALAN KERETA API

STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF BENDING STRENGTH OF SYNTHETIC SLEEPERS FOR RAILWAY

Puguh Triwinanto

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) BPPT
Kawasan PUSPIPTEK Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail : puguh.triwinanto@yahoo.co.id

Abstrak

Tingginya biaya perawatan dan permasalahan lingkungan dari bantalan kayu, beton, dan baja memacu peneliti untuk melakukan penelitian bantalan alternatif, salah satunya adalah bantalan komposit. Pada saat ini pasar global bantalan komposit dan juga bantalan sintetis meningkat, sebab mempunyai keunggulan mencakup rasio kekuatan tinggi terhadap berat, tahan korosi, tahan kelembaban dan serangga serta tidak menghantarkan panas dan listrik.

Material tradisional yang digunakan untuk bantalan jalan kereta api adalah kayu, beton, dan baja. Bantalan beton tidak sesuai dipasang pada jembatan baja dan yang sesuai adalah bantalan kayu, tetapi bantalan kayu mempunyai umur pakai pendek, mahal, dan langka.

Di Indonesia wacana penggunaan bantalan sintetis sudah diusahakan dalam 10 tahun terakhir. Pada dua tahun terakhir dimulai riset dan pengembangan bantalan sintetis jenis *urethane foam resin* yang diperkuat *glass fibre*. Metode dan kriteria lulus uji digunakan JIS E 1203 : 2007. Dari hasil pengujian dan analisis spesimen bantalan sintetis memenuhi persyaratan kekuatan lentur statis dan dinamis sesuai standar JIS E 1203 : 2007. Dengan demikian bantalan hasil riset ini dapat dilanjutkan uji *track*, dimana bantalan sintetis diuji coba untuk dipasang pada jalan kereta api.

Kata kunci : bantalan, sintetis, lentur, statis, dinamis

Abstract

Due to high cost of maintenance and the environment problems of timber, concrete, and steel sleepers, researchers try to seek their alternatives sleeper, one of which is that is made of composite material. Nowadays, composite and synthetic sleepers are going into the global market due to the advantages they offer, these include the high strength to weight ratio, corrosion resistant, moisture resistant, insects resistant and non-head and electricity conducting properties.

Traditionally, timber, concrete, and steel are used as sleepers for railways. Concrete sleepers are not suitable for a railway truss bridges, and timbers are more suitable but they have shorter lifetime, more expensive and rarely obtainable due to environmental issues.

In Indonesia, used of synthetic sleeper have been tried in the last decades. In the last two years, a study has been done on synthetic sleeper made of glass fiber reinforced urethane foam resin. In this study, test method and acceptance were in accordance to JIS E 1203:2007. Test and analysis have been conducted and the synthetic sleeper were found out to be fulfilled the static and dynamic requirement of the JIS E 1203:2007. We conclude therefore, that this type of sleeper can proceed to the track test, in which the sleeper are installed at railway in operation.

Key word: *sleeper, synthetic, bending, static, dynamic*

Diterima (*received*) : 14 Juni 2017, Direvisi (*reviewed*) : 9 Juli 2017, Disetujui (*accepted*) : 30 Juli 2017

PENDAHULUAN

Material tradisional yang digunakan untuk bantalan jalan kereta api adalah kayu, beton, dan beberapa kasus seperti pada tikungan digunakan material baja. Material yang pertama kali digunakan untuk bantalan adalah kayu. Sifat kayu sangat baik untuk beban dinamis dan sebagai isolator listrik dan bunyi. Umumnya bantalan kayu didesain sampai umur-pakai 20 tahun dan untuk bantalan beton dan baja didesain sampai umur-pakai 50 tahun^{1,2,3)}.

Pada tahun 1888 C. E. W. Doehring dari Jerman mendapatkan hak paten beton yang diperkuat dengan logam yang telah ditarik. Penemuan inilah yang menjadi asal-usul beton prategang. Teknologi beton prategang terus berkembang setelah E. Freyssinet dari Perancis yang berjasa dalam perkembangan beton prategang modern⁴⁾. Pada tahun 1928 mulai digunakan baja mutu tinggi sebagai kabel prategang. Kekuatan tarik kabel baja adalah 1725 MPa dan tegangan luluh 1240 MPa⁴⁾. Pada tahun 1943 pertama kali diaplikasikan *Mono-block Prestresses Concrete* pada konstruksi lintasan rel kecepatan tinggi⁵⁾.

Pada tahun 1980-an teknologi beton prategang mulai dikaji di Indonesia. Kemudian pada tahun 1990-an bantalan beton prategang mulai digunakan pada jalan kereta api. Pengujian bantalan beton pertama kali dilakukan di Indonesia pada Agustus 1991. Pengujian dinamis bantalan beton dilakukan sampai 2 juta siklus di Unit Pelaksana Teknis – Laboratorium Uji Konstruksi (UPT-LUK), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) pada September 1991.

Penggunaan bantalan beton pada jalan kereta api pada segmen tertentu seperti jembatan terdapat keterbatasan. Bantalan beton tidak sesuai untuk digunakan pada jembatan baja dan wesel. Di Indonesia saat ini (2017) pada jembatan baja dan wesel digunakan bantalan kayu. Dibanding bantalan beton, satu set harga bantalan kayu lebih mahal, disamping itu terdapat alasan lingkungan dan juga ketersediaan kayu seperti kayu ulin dan kayu jati semakin langka. Dalam sepuluh tahun terakhir sudah direncanakan penggantian bantalan kayu dengan bantalan sintetis pada jembatan baja dan wesel.

Pada saat ini pasar global untuk bantalan komposit dan juga bantalan sintetis cenderung meningkat, sebab banyak

keunggulan mencakup rasio kekuatan tinggi terhadap berat, tahan korosi, tahan kelembaban dan serangga serta tidak menghantarkan panas dan listrik⁶⁾.

Kajian dan penelitian bantalan kereta api terus dilakukan dan berkembang di dunia. Keunggulan yang terus dikembangkan seperti : a) perbandingan berat dan kekuatan yang tinggi, b) bantalan tahan korosi, c) tahan kelembaban, d) tahan terhadap serangga, e) umur pakai yang meningkat, dan f) harga dan perawatan yang lebih murah.

Riset dan pengembangan bantalan terakhir menuju pada bantalan komposit (*composite railway sleepers*). Terdapat 3 tipe bantalan komposit yang dikembangkan yaitu : a) Type 1: *Sleeper with short or no fibre reinforcement*, b) Type 2: *Sleeper with long fibre reinforcement in the longitudinal direction*, c) Type 3: *Sleepers with fibre reinforcement in longitudinal and transverse directions*⁷⁾.

Perbandingan antara tipe-tipe bantalan komposit ditampilkan pada Tabel 1⁸⁾.

Tabel 1.
Perbandingan Sifat Mekanis Bantalan

Sifat Mekanis	Type 1	Type 2	Type 3
Kuat lentur & kekakuan	Rendah	Baik	Baik
Kuat geser	Rendah	Sedang	Baik
Kapasitas angkut	Rendah	Baik	Baik
Pengeboran & pemotongan	Mudah	Mudah	Cukup mudah

Sumber Data : Daftar Pustaka 8

Bantalan komposit sudah digunakan pada jembatan kereta api. Kekuatan *screw spike* yang berfungsi sebagai angkut harus dapat menahan beban cabut minimal 40 kN dan untuk bantalan modern harus kuat paling kurang 60 kN^{9,10)}.

Kajian dan penelitian bantalan alternanif untuk penggantian bantalan kayu terpasang juga telah dilakukan oleh peneliti. Hasil kajian didapatkan bahwa permintaan bantalan alternanif pengganti bantalan kayu meningkat. Permintaan sangat dibutuhkan material baru untuk bantalan¹¹⁾.

Bantalan kereta api merupakan elemen penting dalam sistem jalan kereta api. Material plastik yang dapat didaur ulang dapat digunakan sebagai bahan bantalan. Bantalan jenis ini mempunyai ikatan komposit kuat, perawatan lebih mudah, dan umur pakai

lebih lama. Bantalan komposit polimer (*polymeric composite sleeper*) sedang dilakukan penelitian dan pengembangan. Jenis dari bantalan komposit polimer adalah : a) *Glue-laminated fiber composite sandwiches*, b) *Polyurethane materials composite*, c) *Recycled plastic materials and fiber composite*¹²⁾.

Dengan tujuan yang sama di Jepang juga dilakukan penelitian bantalan baru yang dinamakan bantalan sintetis (*synthetic sleepers*). Definisi bantalan sintetis yaitu bantalan yang dibuat *urethane foam resin* yang diperkuat *glass fibre*. Penggunaan bantalan sintetis dipasang pada jalan kereta api umum dan jalan kereta api Shinkansen dan dapat dipasang di jembatan. Meskipun termasuk baru, permintaan bantalan sintetis terus meningkat. Hal ini karena bantalan sintetis mempunyai sifat mekanis yang baik, seperti tidak adanya pembusukan dan penurunan sifat mekanis, serta kinerja yang telah ditunjukkan selama 25 tahun. Dengan alasan ini maka dibuat standar bantalan sintetis nomor JIS E 1203¹³⁾.

Saat ini pasar global untuk bantalan sintetis dan bantalan komposit semakin meningkat. Di Jepang telah dilakukan penelitian dan pembuatan standar JIS dan dilakukan *review* untuk waktu 25 tahun¹⁴⁾. Standar bantalan sintetis telah dibuat oleh *Japanese Industrial Standard Board Committee* dan *Technical Committee on Railways and Rolling Stock* Nomor JIS E 1203 : 2007. Pada saat ini JIS E 1203 : 2007 dipakai sebagai rujukan oleh kementerian perhubungan RI sebagai dasar acuan pengujian bantalan sintetis di Indonesia.

Di India juga telah dilakukan kajian perbandingan antara bantalan kayu, bantalan baja, dan bantalan komposit dan ditampilkan pada Tabel 2¹⁵⁾.

Tabel 2.
Perbandingan Bantalan Kayu, Baja, dan Komposit

Item	Tipe Bantalan Pada Jembatan		
	Kayu	Baja	Komposit
Umur (tahun)	8 – 10	15 – 20	40 – 50
Berat (kg)	100-171	110	54
Penggantian Bantalan	Mudah	Susah	Mudah
<i>Handling</i>	Sedang	Susah	Mudah
Penggantian di lintasan	Mudah	Sangat susah	Mudah

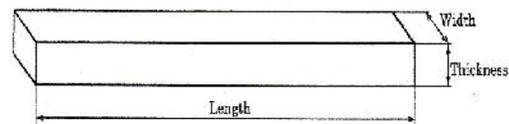
Sumber Data : Daftar pustaka 15

Pada makalah ini dibahas tentang kekuatan lentur bantalan sintetis (*synthetic*

sleeper) baik lentur (bending) statis maupun lentur dinamis. Jumlah spesimen sesuai ketentuan pada JIS E 1203 : 2007 untuk lentur statis dan dinamis adalah 2 sampel. Spesimen 1 diuji bending statis (*withstand bending load*) dan Spesimen 2 diuji bending dinamis (*fatigue resistance test*). Dari hasil eksperimen ini diharapkan dapat meningkatkan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya bidang bantalan sintetis.

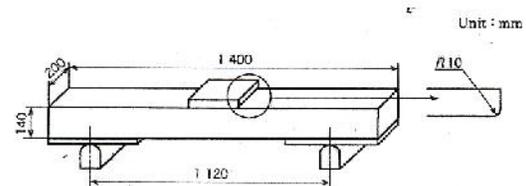
BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan pada eksperimen ini adalah bantalan sintetis dari *urethane foam resin* yang diperkuat *glass fibre*. Jumlah spesimen sebanyak 2 buah. Spesimen 1 diuji bending statis dan Spesimen 2 diuji bending dinamis. Dimensi spesimen ditampilkan pada Gambar 1. Ukuran spesimen bantalan sintetis adalah panjang (*length*) : 1 400 mm, lebar (*width*) : 200 mm, dan tebal (*thickness*) : 140 mm.



Gambar 1.
Ukuran Spesimen Bantalan Sintetis

Pengujian bending statis digunakan standar JIS E 1203 : 2007¹³⁾. Pengujian bending statis dilakukan pada suhu ruang. Skema pengujian bending statis ditampilkan Gambar 2.



Gambar 2.
Skema Uji Bending Statis Bantalan Sintetis

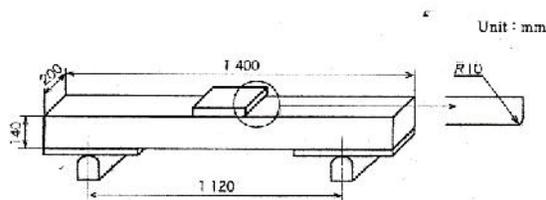
Foto Spesimen 1 ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3.
Foto Spesimen 1

Beban diberikan mulai dari 0 kN sampai dengan beban maksimum dengan kecepatan $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ per menit. Untuk menghindari kerusakan lokal dipasang pelat pada tumpuan ukuran $12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ dan pada titik beban ukuran $12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$.

Pengujian bending dinamis dilakukan pada kondisi suhu ruang dengan standar JIS E 1203: 2007. Skema uji ditampilkan pada Gambar 3. Pembebanan dinamis dilakukan pada tegangan bending maksimum 28,0 MPa. Pengujian dilakukan sampai 100.000 siklus. Untuk menghindari panas dan penurunan akibat gesekan antara pelat dan spesimen diberi pelumas. Untuk menghindari kerusakan lokal dipasang pelat pada tumpuan ukuran $12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ dan pada titik beban ukuran $12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ¹³.



Gambar 4.
Skema Uji Bending Dinamis Bantalan Sintetis

Foto Spesimen 2 ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5.
Foto Spesimen 2

Mesin uji yang digunakan adalah Mesin hidrolis PL 250 kN. Mesin uji ini disamping dapat digunakan untuk pengujian statis juga dapat digunakan untuk pengujian dinamis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bantalan baru yang dikembangkan meliputi bantalan komposit, bantalan sintetis, dan bantalan komposit polimer. Dari hasil resensi bantalan baru bahwa struktur dan jumlah serat serta material berbeda-beda untuk masing-masing peneliti dan perusahaan pembuat bantalan kereta api. Spesimen pada eksperimen adalah bantalan sintetis jenis *urethane foam resin* yang diperkuat *glass fibre*. Hasil pengujian bending statis didapatkan hasil uji 242,5 kN. Tegangan bending dapat dihitung dengan rumus lenturan¹⁶.

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} \quad (1)$$

Dimana σ adalah tegangan bending (MPa), M adalah momen lentur (N.mm), c adalah jarak dari sumbu netral ke serat terjauh (mm), dan I adalah momen lembam terhadap sumbu netral (mm^4).

Momen lembam untuk potongan melintang persegi panjang maka dapat dihitung dengan persamaan¹⁶:

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (2)$$

Dimana I adalah momen lembam terhadap sumbu netral (mm^4), b adalah panjang sisi bawah (mm), dan h adalah tinggi (mm).

Dengan digunakan rumus lenturan persamaan 1 dan 2 maka dapat dihitung tegangan bending. Perhitungan didasarkan pada skema uji (Gambar 2) dan dimensi spesimen (Gambar 1) untuk hasil uji 242,5 kN maka didapatkan tegangan bending 103,9 MPa. Menurut JIS E 1203 : 2007, persyaratan beban bending adalah 170,0 kN.

Perbandingan hasil uji bending statis dan persyaratan Spesimen 1 ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3.
Perbandingan Hasil Pengujian Bending Statis Dengan Persyaratan JIS

Hasil Uji Bending (kN)	Persyaratan JIS E 1203 (kN)	Keterangan
242,5	170,0	Memenuhi persyaratan standar JIS

Sumber Data : Hasil Olahan Data Penelitian

Uji Dinamis (fatik) :

Meskipun telah dilakukan sejumlah pengujian dinamis sampai 2 dan 3 juta siklus pada bantalan komposit dan bantalan sintetis¹⁷⁾, tidak/belum ada hubungan antara beban-operasi dan fatik material. Sehingga perlu riset tentang tegangan-batas, kondisi tumpuan dan pola beban pada model fatik pada bantalan.

Menurut JIS E 1203 : 2007, bantalan sintetis diuji pada tegangan lentur maksimum 28,0 MPa dan frekuensi 2 Hz sampai 5 Hz. Pada eksperimen ini, pengujian dinamis dilakukan pada frekuensi 4 Hz dengan tegangan lentur maksimum 28,0 MPa dari tegangan lentur statis maksimum 103,9 MPa. Sesuai skema uji (Gambar 4) dan dimensi spesimen (Gambar 1), dengan rumus lenturan persamaan 1 maka pada tegangan 28,0 MPa didapatkan gaya bending maksimum -65,33 kN dan digunakan gaya-atas -6,53 kN. Perbandingan hasil uji dan persyaratan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4.
Perbandingan Hasil Pengujian Bending Dinamis Dengan Persyaratan JIS

Beban Dinamis (kN)	Persyaratan JIS E 1203:2007 Section 5.13	Keterangan
- 65,33	Spesimen tidak runtuh setelah menerima beban dinamis 100.000 siklus	Memenuhi Persyaratan JIS E 1203: 2007 Section 5.13
- 5,53		

Sumber Data : Hasil Olahan Data Penelitian

Ditinjau dari persyaratan JIS E 1203 : 2007 dari segi kekuatan persyaratan yang tersulit untuk dipenuhi adalah kekuatan bending. Persyaratan kekuatan bending adalah 170,0 kN. Hasil uji bending adalah 242,5 kN. Sedangkan pada saat uji bending dinamis pada tegangan bending 28,0 MPa tidak terjadi kerusakan bantalan sintetis. Sehingga ditinjau dari kekuatan lentur maka

bantalan sintetis pada eksperimen ini memenuhi persyaratan JIS E 1203 : 2007.

SIMPULAN

Pada dua tahun terakhir dimulai riset dan pengembangan bantalan sintetis di Indonesia. Dari hasil pengujian dan analisis, spesimen bantalan sintetis memenuhi syarat kekuatan lentur statis dan dinamis sesuai standar JIS E 1203 : 2007. Dengan demikian bantalan hasil riset ini dapat dilanjutkan uji track, dimana bantalan sintetis diuji coba untuk dipasang pada jalan kereta api.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Fauzi Firmansyah sebagai mitra diskusi dan ahli kimia di Indonesia dalam bidang bantalan sintetis. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Waris Susilo, Ari Rulianto dan kawan-kawan atas pelaksanaan pengujian di Laboratorium B2TKS BPPT Kawasan Puspiptek Serpong.

DAFTAR PUSTAKA

1. Crawford RH, *Greenhouse Gas Emissions Embodied in Reinforced Concrete and Timber Railway Sleepers*, Environ Sci Technol 2009:43-3885-90.
2. *Rail Corp Engineering Specification, SPC 232: Concrete Sleepers*, Australia, 2012.
3. *ARTC Sleepers – Usage and Installation Standards TCS 10 Engineering (Track)* Australian Rail Track Corporation, 2009.
4. T.Y Lin dan Ned H. Burn, *Desain Struktur Beton Prategang*, Jilid 1, Binarupa Aksara, 2000.
5. Kaewunruen S., *Sleepers and Fastenings, Track Design Fundamental*, Rail Engineering Course, Rail Corporation, 2010.
6. GangaRao HVS, Taly N, Vijay VP, *Reinforced Concrete Design With FRP Composites*, CRC Press, 2007.
7. Ferdous W, Manalo A, Van Erp G, Aravintan Th, Kaewunruen S, Remennikov A, *Review – Composite Railway Sleepers – Recent developments*, Challenges, Journal Composite Structure 134, Elsevier, 2015, 158-168.
8. Manalo A, Aravinthan T, Karunasena W, Stevens N, *Analysis of a Typical railway Turnout Sleeper System Using Grillage*

- Beam Analogy*, Finite Element Analysis, December 2012: 48: 1376-91.
9. Kaewunruen S, *Acoustic and Dynamic Characteristics of a Complex Urban Turnout using fibre-reinforced foamed urethane (FFU) Bearers*, International Workshop on Rialway Noise, 2013.
 10. Chattré R, Manoharan S, Satyanayarana PVV, *Composite Sleepers for Bridges: Progress Till Date and Road Head*, Pune, India, Indian Railway Institute of Civil Engineering.
 11. Manalo A, Aravinthan T, Karunasena W, Ticoalu A, *A Review of Alternative Materials for Replacing Existing Timber Sleepers*, Composite Structure, Elsevier 2010:92:603-11.
 12. Ghorbani A, Erden S, *Polymeric Composite Railway Sleepers*, Uluslar ArasibRayli Sistemler Muhendisligi Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim 2013, Karabuk, T rkiye, 2013.
 13. JIS E 1203 : 2007, *Synthetic Sleeper, Made from Fiber Reinforced Foamed Urethane*, Japanese, 2007
 14. Takai H, Sato Y, Sato K, *Japanese Twenty Five years Experiences and Standardization of Synthetic Sleeper*, 2006.
 15. Chattré R, Manoharan S, Satyanayarana PVV, *Composite Sleepers for Bridges: Senior Proffesional Course Notes*, Indian Railway Railway Institute of Civil Engineering.
 16. Popov E. P., *Mekanika Teknik*, Alih bahasa Astamar Z., Penerbit Erlangga, 1996.
 17. Degieck J, Paepegen WV, *Fatigue Damage Modeling of Fiber-reinforced Composite Material: Review*, Appl Mech Rev 2001: 54 279-300.

ANALISIS KERUSAKAN RADIATOR SEPEDA MOTOR 150cc

FAILURE ANALYSIS OF 150cc MOTOR CYCLE RADIATOR

Amin Suhadi

Peneliti pada Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, BPPT
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang 15314
Tel. (021)-7560565; Fax. (021)-7560903
e-mail : aminsuhadi@gmail.com

Abstrak

Sepeda motor yang mempunyai kapasitas mesin relatif besar memerlukan pendingin yang efisien agar ketika beroperasi tidak mengalami panas yang berlebihan sehingga dapat merusak mesin tersebut. Jika sepeda motor dengan kapasitas mesin kecil cukup menggunakan pendingin udara, maka sepeda motor dengan kapasitas mesin besar menggunakan pendingin dengan sistem cairan, dan dikenal dengan nama radiator. Jika radiator rusak maka proses pendinginan tidak berjalan dengan baik sehingga berpotensi terjadi kebakaran pada mesin. Pada penelitian ini dilakukan analisa terhadap kebocoran yang terjadi pada sebuah radiator sepeda motor 150cc, dengan tujuan untuk mencari penyebab kerusakan dari radiator tersebut agar kerusakan serupa tidak terjadi pada produk sepeda motor yang sejenis. Analisa yang dilakukan meliputi pemeriksaan permukaan patahan dengan cara analisa makro fraktografi, pemeriksaan struktur mikro, pemeriksaan komposisi kimia, pemeriksaan kekerasan dan pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) serta pemeriksaan menggunakan EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa retak dan patahnya penopang radiator disebabkan adanya beban dinamis atau getaran yang terjadi pada konstruksi tersebut dan dipikul oleh pelat penopang radiator. Bukti dari hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa karet yang berfungsi sebagai peredam getaran radiator pada posisi atas telah aus dan kendur sehingga fungsi peredaman tidak optimum lagi, sehingga pelat penopang radiator retak dan retaknya merambat ke kisi kisi yang berisi cairan pendingin dan mengakibatkan kebocoran.

Kata Kunci : radiator, pendingin, mesin, bocor

Abstract

*Motorcycle with relatively high capacity engine needs efficient cooling system to avoid overheating and engine damage. Usually air cooling system is used for low engine capacity motor cycle, but this system is not sufficient for high capacity engine. Therefore, liquid cooling system which called radiator is selected. If radiator is not working properly the engine become overheated and has potential to be burned. In this research deep analysis is conducted on leakage radiator of 150cc motor cycle, and the aim of this research is to find the root cause of failure of the radiator to prevent similar cases occur on other motorcycle. Analysis that were done consist of macro fractography on surface fracture, microstructure analysis, chemical composition testing, hardness testing, micro fractographic analysis using SEM (*Scanning Electron Microscopy*) and spot chemical analysis using EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*). Experimental result indicates that crack and leakage of the radiator was caused by dynamic load or vibration which occurred at the construction of radiator support. The evidence that was found after examination confirm that a rubber which has a function of vibration absorbance at top position is worn out and loose, so that its function is not optimum. As a result, a crack developed at radiator supporter and then propagated to the radiator grill which has liquid cooler inside became leak.*

Keywords : radiator, cooler, engine, leak

Diterima (received) : 16 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 10 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 1 Agustus 2017

PENDAHULUAN

Sepeda motor yang mempunyai kapasitas mesin 150cc dengan konfigurasi 4 klep dengan sistem *fuel injection* mampu menghasilkan daya maksimum 12,2 kW/8500 rpm dan torsi maksimum 14,5 Nm/7500 rpm. Mesin dengan daya yang besar tersebut dapat diperoleh dari proses pembakaran yang cukup besar dan optimum, namun dampaknya selain menghasilkan tenaga juga mengeluarkan panas yang sangat tinggi, karena itu membutuhkan pendinginan yang efisien agar tidak terjadi pemanasan berlebih ketika mesin menyala. Jika radiator rusak maka sistem pendinginan tidak berjalan dengan baik sehingga berpotensi terjadi kebakaran pada mesin.

Sistem pendingin merupakan salah satu sistem yang paling penting pada mesin sepeda motor. Fungsi dari sistem pendingin pada mesin antara lain:^{1,2)}

1. Berguna untuk menyerap panas pada bagian-bagian mesin agar tidak terjadi panas berlebih sehingga akan mengurangi tingkat kerusakan dan keausan pada komponen mesin
2. Berguna untuk menjaga temperatur mesin pada suhu kerjanya yang ideal.

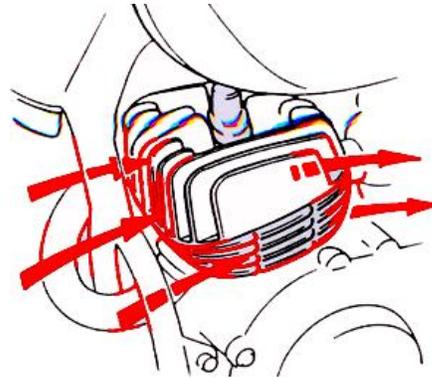
Sistem pendingin pada mesin sepeda motor bermacam-macam berdasarkan bahan yang digunakan untuk pendinginannya, yaitu sistem pendinginan menggunakan udara dan sistem pendinginan menggunakan cairan (air).

Pendinginan menggunakan udara

Untuk mengoptimalkan pendinginan pada sistem pendinginan menggunakan pendingin udara, pada bagian blok silindernya dilengkapi dengan sirip-sirip. Sirip-sirip ini berfungsi menambah permukaan bidang gesek dengan udara sehingga pemindahan panas dari dalam mesin ke udara berlangsung lebih banyak demikian juga sebaliknya efek sentuhan udara dingin dari luar ke mesin juga lebih banyak (Gambar 1)³⁾.

Cara kerja dari sistem pendinginan udara ini adalah sangat sederhana, yaitu panas yang ditimbulkan oleh mesin akan disalurkan dan dipindahkan ke dinding-dinding silinder, kemudian disalurkan ke sirip-sirip pada blok

silinder dan selanjutnya didinginkan oleh udara luar melalui proses pemindahan panas. Penggunaan sistem pendinginan dengan udara ini banyak diaplikasikan pada sepeda motor dengan kapasitas mesin kecil.



Gambar 1.

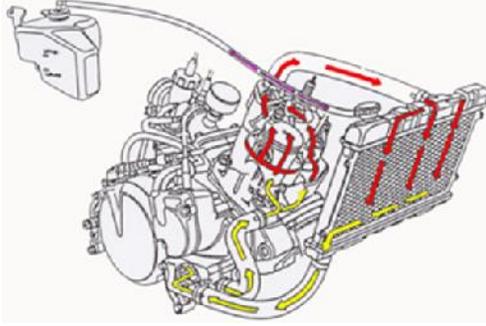
Aliran udara pada sistem pendingin udara mesin sepeda motor (tanda panah)^{1,2)}

Sifat-sifat yang dimiliki oleh sistem pendinginan dengan udara:

-) Memiliki konstruksi mesin yang sederhana
-) Suara yang ditimbulkan akibat gesekan udara pada sirip-sirip lebih keras
-) Pendinginan kurang merata karena bagian mesin yang langsung terkena hembusan udara akan mendapatkan pendinginan yang lebih
-) Perawatan mudah dan jarang sekali terdapat masalah pada sistem pendinginan yang menggunakan udara

Sistem pendinginan dengan air

Pada sistem pendinginan menggunakan air terdapat beberapa komponen diantaranya radiator dan tutup radiator, kipas, selang air, pompa air, *water jacket*, dan *thermostat*.



Gambar 2.
Skema sistem pendinginan air pada mesin
sepeda motor¹⁻³⁾

Sistem pendinginan mesin motor dengan menggunakan air, pendinginannya dilakukan dengan cara diberikan rongga-rongga berisi air yang disirkulasikan oleh pompa air pada sekeliling silinder dan kepala silinder. Air yang telah menyerap panas mesin dialirkan ke radiator untuk didinginkan melalui kisi-kisi radiator dan aliran udara yang melalui radiator (Gambar 2).

Cara kerja dari sistem pendinginan menggunakan air adalah sebagai berikut:⁴⁾

- Ketika keadaan mesin masih dingin dan kemudian mesin dinyalakan maka air hanya bersirkulasi pada bagian mesin saja dan tidak disalurkan ke radiator, hal ini dikarenakan *thermostat* yang masih belum membuka. Karena air tersebut hanya bersirkulasi pada mesin maka temperatur mesin akan cepat naik untuk mencapai temperatur pembakaran yang ideal.
- Ketika keadaan mesin sudah panas kira-kira sudah mencapai temperatur 80-90°C maka *thermostat* akan membuka. Karena *thermostat* membuka maka air yang bersirkulasi pada mesin akan disalurkan melewati radiator untuk didinginkan oleh kipas pendingin. Air yang panas dilewatkan melalui radiator ini bertujuan untuk mencegah panas yang berlebih pada mesin sehingga mesin dapat dijaga temperatur kerjanya.

Sistem pendingin pada sepeda motor dengan kapasitas mesin kecil biasanya menggunakan sistem pendinginan udara sudah cukup karena panas yang dihasilkan dari mesin tersebut tidak terlalu tinggi. Sedangkan pada sepeda motor dengan kapasitas mesin besar digunakan sistem pendingin air dengan menggunakan radiator (Gambar 3).



Gambar 3.
Contoh sepeda motor 150cc dengan sistem
pendingin tipe cairan (tanda panah)^{1,2)}

Konstruksi sistem pendingin air lebih rumit dibanding sistem pendingin udara sehingga diperlukan bentuk struktur yang tepat agar tidak mudah rusak. Pada penelitian ini dilakukan analisa terhadap kebocoran yang terjadi pada sebuah radiator sepeda motor 150cc. Tujuan penelitian adalah untuk mencari akar penyebab kerusakan dari radiator tersebut agar kerusakan serupa tidak terjadi pada produk sepeda motor yang sejenis^{3,4)}.

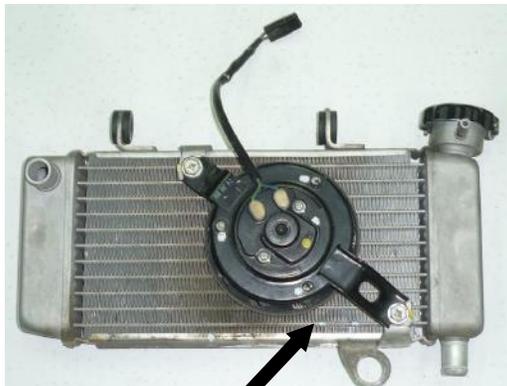
BAHAN DAN METODE

Pada penelitian ini analisa kerusakan dilakukan terhadap radiator pada sebuah sepeda motor 150cc dengan posisi radiator diletakkan dibagian depan mesin (Gambar 4).



Gambar 4.
Kedudukan radiator pada rangka sepeda
motor

Pada bagian belakang radiator diletakkan kipas untuk membantu pendinginan dengan posisi seperti pada Gambar 5.



Gambar 5.
Kipas yang dikaitkan pada bagian belakang radiator.

Kipas akan aktif dan bekerja sesuai dengan pengaturan pada sistem pendingin tersebut. Lokasi saluran air yang bocor terletak pada pipa air ke 2 dari bawah di posisi radiator bagian belakang dibawah kipas (berhadapan dengan mesin), panjang retak ± 93 mm (tanda panah pada Gambar 5).

Data Data Teknis Sepeda motor

Tipe mesin : SOHC berpendingin air
 Silinder : tunggal
 Kapasitas : 149,8 cc
 Daya maks. : 12,2 kW/8500 rpm
 Torsi maks. : 14,5 Nm/7500 rpm
 Bahan radiator : paduan aluminium

Metode Penelitian

Metode penelitian terhadap kerusakan radiator sepeda motor digunakan metode tulang ikan, yaitu mengkaji dari semua aspek yang memungkinkan menjadi penyebab kerusakan, kemudian dipilih dari yang paling potensial menjadi penyebab utama dijadikan dasar untuk meneliti lebih dalam. Tahapan tahapannya adalah sebagai berikut ⁵⁾:

- Pemeriksaan visual: yaitu pengamatan awal terhadap permukaan patahan yang masih asli dimana belum pernah terbentur atau terkontaminasi oleh elemen atau benda lain. Pemeriksaan ini tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi titik awal dari retak.
- Fraktografi makro: adalah pemeriksaan lebih fokus pada awal retak dan daerah perambatan retak menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran makro. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menentukan jenis retak dan jenis patahan yang terjadi.
- Fraktografi mikro: yaitu mengamati lebih dalam permukaan patahan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk menkonfirmasi dan

mendalami temuan jenis patahan yang ditemukan dari pemeriksaan makro.

- Metalografi: adalah pemeriksaan dengan alat mikroskop optik dengan perbesaran mikro untuk mengamati struktur mikro dan kemungkinan adanya cacat mikro yang tidak terdeteksi oleh alat lain atau adanya inklusi atau cacat yang dapat menjadi titik lemah dari radiator.
- Pengujian kekerasan: adalah pengujian mekanis mikro untuk memeriksa kondisi kekerasan terkini yang mungkin dapat memberikan informasi tentang perubahan sifat mekanis yang telah terjadi.
- Pengujian komposisi kimia: adalah untuk menelusuri kesesuaian komposisi kimia dengan standar. Selain itu juga digunakan untuk mengamati kemungkinan elemen pengotor yang mempunyai peran penting dalam penurunan sifat mekanis dan kemungkinan berperan dalam terbentuknya awal retak.

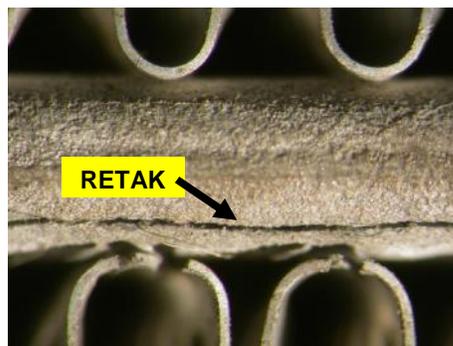
Data data tersebut kemudian dianalisa dan dikembangkan serta dibandingkan dengan spesifikasi untuk mencari penyebab kerusakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian dengan pemeriksaan dan pengujian dapat dirinci sebagai berikut.

Pemeriksaan Visual.

Dari pemeriksaan visual didapat fakta bahwa letak kerusakan radiator sepeda motor yang mengalami retak dan bocor terjadi pada pipa air ke 2 dari bawah di posisi belakang dekat kipas (berhadapan dengan mesin), panjang retak ± 93 mm (Gambar 5). Jika lokasi tersebut diamati lebih teliti terlihat jelas retakan tidak saja mengakibatkan kebocoran tapi juga putusya sirip sirip pendingin yang terjadi pada beberapa tempat (Gambar 6).



Gambar 6.
Perbesaran dari Gambar 5 pada lokasi retak di bawah kipas, terlihat dengan jelas retak dan sirip pendingin yang putus.

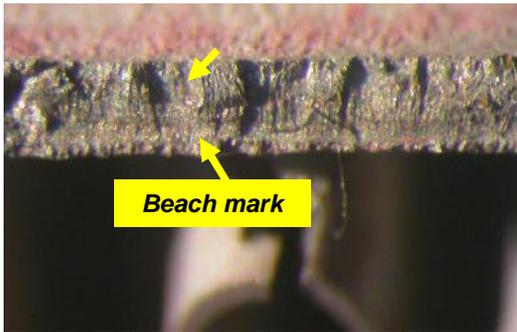
Pemeriksaan visual pada permukaan dalam pipa hanya terdapat deposit dari fluida, namun tidak ditemukan adanya bukti terjadinya proses korosi (Gambar 7).



Gambar 7.
Foto kondisi permukaan bagian dalam radiator terdapat kerak dari endapan air radiator.

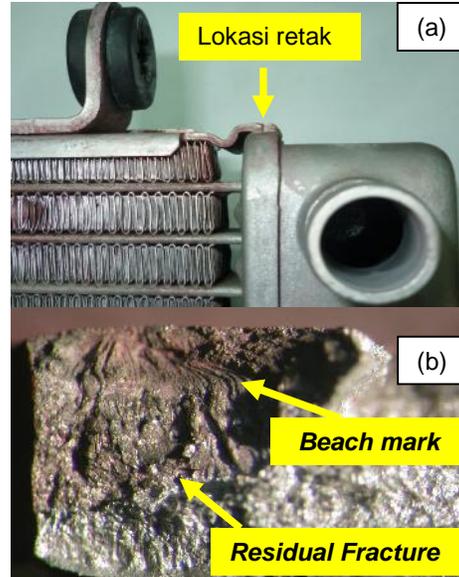
Pemeriksaan fraktografi

Hasil pemeriksaan fraktografi pada permukaan patahan dari pipa air menunjukkan bahwa retak dimulai dari sisi dalam disebabkan beban dinamis yang ditimbulkan oleh getaran. Bentuk permukaan patahan berupa patah lelah, terlihat adanya alur garis pantai (*beach mark*)⁶⁻⁸⁾(Gambar 8).



Gambar 8.
Foto makro permukaan patahan menunjukkan ciri khas patah lelah (*fatigue*) dengan adanya *beach mark* dan patah sisa.

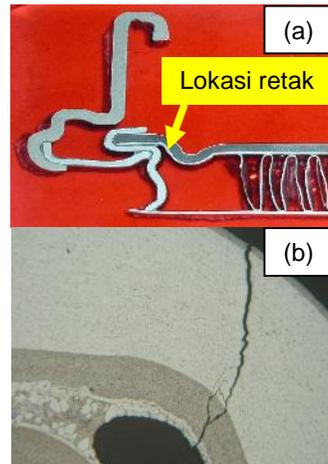
Selain itu pemeriksaan fraktografi menunjukkan juga terjadi retak pada rangka pelat radiator pada bagian atas kiri dan kanan, posisi retak dekat dengan penggantung radiator. Bentuk patahan mempunyai ciri khas dari patah lelah (*fatigue fracture*)⁹⁻¹¹⁾ yaitu terdapat *beach mark* dan patah sisan (Gambar 9).



Gambar 9.
Lokasi retak pada kerangka radiator (a), dan permukaan retak dengan ciri khas patah lelah pada retak tersebut (b).

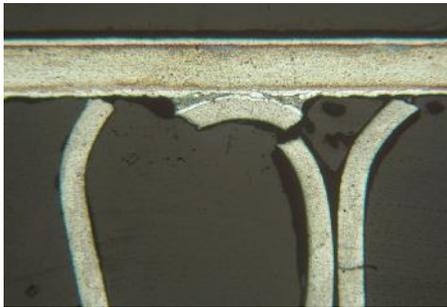
Pemeriksaan metalografi

Hasil pemeriksaan metalografi pada sampel 1 potongan melintang pada daerah *water inlet* dilokasi rangka pelat radiator yang mengalami retak menunjukkan bahwa struktur mikro berupa Al-Si dan mengalami retak dari bagian luar dengan bentuk retak memotong butir (*transgranular cracking*). Pemeriksaan metalografi pada sampel 2 yang terletak di material sirip pendingin potongan memanjang pipa air menunjukkan adanya retak akibat getaran dan beban tekuk^{12,13)}(Gambar 10).



Gambar 10.
Potongan melintang lokasi retak pada sirip pendingin (a), struktur mikro pada daerah retak dan bentuk retak trans granular (b).

Pemeriksaan metalografi pada sampel 3 pipa air potongan melintang pada daerah retak menunjukkan struktur mikro yang sama dengan lokasi lain (Gambar 11).



Gambar 11.
Potongan melintang pipa saluran air di daerah retak ber struktur sama dengan daerah lain yaitu paduan Al Si.

Hasil pengujian kekerasan

Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada pelat rangka dan pipa air (benda uji A) menunjukkan bahwa pada pelat rangka terdapat perbedaan nilai kekerasan antara bagian yang tipis dengan nilai kekerasan rata rata 18.6 HV, sedangkan pada bagian lain mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi dengan rata rata 38 HV (Tabel 1). Hal ini menunjukkan bahwa pada pelat rangka telah terjadi deformasi pada bagian tertentu sehingga mengalami pengerasan regang (*strain hardening*). Pada pengujian kekerasan di daerah pipa (sampel B dan C) didapat nilai yang sama, yaitu dengan kekerasan rata rata sekitar 20 – 22 HV.

Tabel 1.
Hasil uji kekerasan benda uji

NO.	Nilai Kekerasan HV		
	A	B	C
1	18.5	19.0	20.7
2	18.7	20.5	23.2
3	37.0	20.5	23.8
4	39.0	21.2	23.0
5	39.0	20.0	21.7
Rata rata	30.44	20.24	22.48

Catatan:

- A: benda uji pelat rangka
- B: benda uji pipa air dekat retakan
- C: benda uji pipa air daerah lain

Hasil pengujian komposisi kimia

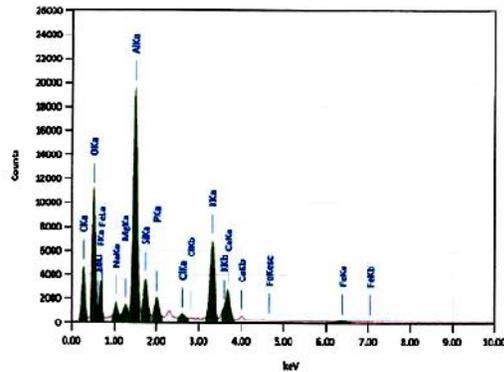
Hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa material yang diuji merupakan paduan

dengan bahan dasar Aluminium dengan beberapa unsur pepaduan yang didominasi oleh unsur Mn sebesar 1.07 % (Tabel 2).

Tabel 2.
Hasil pengujian komposisi kimia

No	Unsur	% Berat
1	Si	0.316
2	Fe	0.397
3	Cu	0.481
4	Mn	1.070
5	Mg	0.000
6	Cr	0.010
7	Ni	0.008
8	Zn	0.206
9	Sn	0.134
10	Ti	0.030
11	Pb	0.057
12	V	0.010
13	Co	0.005
14	Al	97.26

Dari hasil pemeriksaan komposisi kimia menggunakan metode EDS terlihat bahwa tidak ada elemen yang mencurigakan yang dapat menjadi petunjuk yang dapat menyebabkan sumber terjadinya retak (Gambar 12).

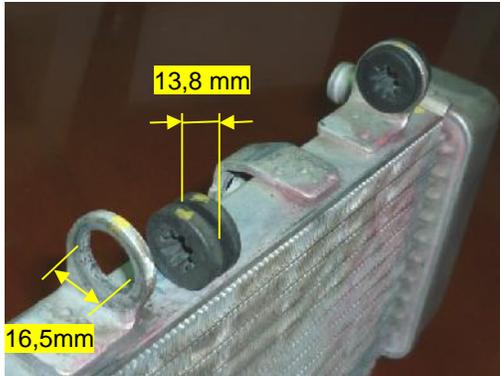


Gambar 12.
Hasil pemeriksaan komposisi kimia pada permukaan patahan dengan EDS

Pembahasan

Dari hasil semua pemeriksaan dan analisa didapatkan bukti nyata bahwa awal retakan dimulai dari pelat *support* dari radiator yang patah kemudian merambat ke tempat lainnya. Pengamatan lebih dalam terhadap konstruksi sistem radiator ini diperoleh bukti bahwa retak dan patahnya *support* radiator disebabkan adanya beban dinamis atau getaran yang terjadi pada konstruksi tersebut dan dipikul oleh pelat *support* radiator tersebut.

Beroperasinya beban dinamis ini dibuktikan dari pengamatan pada permukaan patahan yang menunjukkan adanya patah lelah (*fatigue fracture*) dengan terlihat adanya *beach marks*^{12,14}.



Gambar 13.

Hasil pengamatan terhadap perbedaan diameter karet peredam getaran dengan lubang dudukan karet pengikat radiator

Sumber getaran yang berasal dari kipas angin, serta dari mesin dan juga dari pengoperasian motor seharusnya diredam oleh karet penghubung yang melekat pada penopang radiator. Bukti dari hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa karet yang berfungsi sebagai peredam getaran radiator pada posisi atas telah aus dan kendur sehingga fungsi peredaman tidak optimum lagi. Hasil pengukuran dimensi lubang pelat (16,5 mm) dengan diameter badan karet (13,8 mm) mempunyai perbedaan cukup besar (Gambar 13).

Akibat dari kendurnya karet peredam tersebut dan tidak terdapat peredam getaran yang lain, maka getaran tetap diteruskan ke radiator dan akhirnya penopang radiator retak. Menurut Tajabadi¹⁴) getaran dan benturan dapat mengakibatkan luka menyerupai takikan (*notch*) pada konstruksi sehingga jika getaran terus berlangsung takikan ini dapat menjadi awal retak pada konstruksi. Dalam kondisi tersebut, karena getaran tetap berlangsung maka retak merambat terus dan akhirnya sampai pada pipa air sehingga pipa air juga ikut retak mengikuti mekanisme yang sama dan akhirnya bocor¹⁰⁻¹²).

SIMPULAN

Dari bukti-bukti yang diperoleh dan berdasarkan analisa terhadap bukti-bukti tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa kebocoran dan keretakan radiator diawali dari

aus dan kendurnya karet peredam pada bagian atas sehingga fungsi peredam getaran tidak optimal. Karena tidak adanya peredam lain maka getaran diteruskan ke penopang radiator dan karena penopang radiator menahan beban berat dari radiator maka keretakan terus menjalar ke pipa air radiator dan akhirnya terjadi patah lelah dan bocor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala B2TKS BPPT, Bp.Sudarmadi ST,MT, Kepala Bidang Kajian Material B2TKS Bp.Dr.Ing.H.Agus Suhartono, dan Bp.Sutarjo ST,MM untuk pemberian ijin dan pelaksanaan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Biermann, Arnold E.; Ellerbrock, Herman H., Jr (1939). *The design of fins for air-cooled cylinders* (pdf). NACA. Report N^o. 726.
2. P V Lamarque: *The Design of Cooling Fins for Motor-Cycle Engines*. Report of the Automobile Research Committee, Institution of Automobile Engineers Magazine, March 1943 issue, and also in "The Institution of Automobile Engineers Proceedings, XXXVII, Session 1942-43, pp. 99-134 and 309-312.
3. Julius Mackerle, M. E., *Air-cooled Automotive Engines*, Charles Griffin & Company Ltd., London, 1972.
4., <https://andigunawan1207.wordpress.com/2013/12/12/sistem-pendinginan-sepeda-motor/> diakses pada 3 Agustus 2017 jam:09.17
5., *Failure Analysis and Prevention*, Tenth Edition, American Society for Metals, ASM HAND BOOK Vol 11, Ohio, 2002.
6. Peng D, Jones R. Crack growth at fastener holes containing intergranular cracking, *Engineering Fracture Mechanics*; 2015.
7. Man J, Valtr M., AFM and SEM-FEG study on fundamental mechanisms leading to fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, vol.11, 2014.
8. Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1988, p.375-431.
9. Fuchs, H.O., Stephens, R.I., *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 2013.

10. Sandor, B.I., *Fundamental of Cyclic Stress and Strain*, The University of Wisconsin Press, Madison, 2014.
11. Evans R. The fatigue life prediction for structure with surface scratch considering cutting residual stress. *Engineering Fracture Mechanics* 2014.
12., *Metal Fatigue Damage Mechanisms, Detection, Avoidance and Repair*, American Society for Testing and Materials, ASTM Spec. Tech. Publ. 495, 2014.
13. Karabaya.S, Ertürkb A.T, Zerenc M., Yamano luc R., Karakulak E., *Failure Analysis of Wire-breaks in Aluminum Conductor Production and Investigation of Early Failure Reasons of Transmission Lines*, *Engineering Failure Analysis Journal*, vol.83 (2018) pp.47-56.
14. Tajabadi M.S, *Metallurgical failure analysis of a cracked aluminum 7075 wing internal angle*, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol.7 (2016), pp.9-16.

SIMULASI NUMERIK HIDRODINAMIKA PADA DESAIN KONFIGURASI WAVE DEFLECTOR UNTUK KENDARAAN AMFIBI BERODA BAN

SIMULATION OF NUMERICAL HYDRODYNAMICS IN WAVE DEFLECTOR CONFIGURATION DESIGN FOR EQUIPMENT AMFIBI VEHICLES

Abdul Aziz, Abid Paripurna Fuadi, Apid Rustandi,

Pusat Teknologi Industri Pertahanan dan Keamanan
Deputi Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa – BPPT
Gedung Hankam No. 256 Kawasan PUSPIPTEK - Serpong, Tangerang Selatan – 15314
Telp. 021-75791262 (ext. 322), Fax. 021-
E-mail : abdul.aziz@bppt.go.id, abid.paripurna@bppt.go.id, apid.rustandi@bppt.go.id

ABSTRAK

Wave Deflector merupakan komponen pendukung pada kendaraan amfibi yang berfungsi untuk menghempaskan aliran fluida dari arah depan ke samping kendaraan sehingga meningkatkan faktor keselamatan pengemudi kendaraan amfibi saat melakukan penyeberangan atau pendaratan dari kapal ke pantai. Sampai saat ini industri pertahanan dan keamanan di Indonesia memproduksi kendaraan tempur beroda ban yang belum dilengkapi *Wave Deflector*. Oleh karenanya perlu dikaji dan dikembangkan desain konfigurasi *Wave Deflector* yang memiliki nilai tahanan air yang optimal dan sesuai dengan mission requirements. Metodologi yang digunakan pada tulisan ini menggunakan penelitian dan pengembangan (*research & development*), dan tahap kegiatan penelitian ini baru sampai tahap validasi desain dengan melakukan simulasi numerik hidrodinamika pada desain konfigurasi *Wave Deflector* kendaraan amfibi beroda ban. Basis evaluasi hidrodinamika dilakukan dengan perhitungan kinerja tahanan (*resistance*) konfigurasi desain *Wave Deflector* serta diuji melalui simulasi numerik efek *wave making* yang terjadi dari 3 (tiga) tipe konfigurasi desain *Wave Deflector* yang digunakan pada kendaraan tempur. Parameter evaluasi yang dijadikan referensi meliputi : faktor besaran tahanan air, kecepatan kendaraan, tinggi gelombang dan luasan permukaan *Wave Deflector*. Dengan pemasangan *Wave Deflector* model *Wave Deflector 3* (WD3) pada kendaraan Panser ANOA-2 dalam kondisi operasi penyeberangan basah kercepatan 3-4 Knot, dapat menurunkan efek tinggi gelombang yang terjadi berkisar 35 – 80 %. Dari hasil simulasi numerik tersebut dapat disimpulkan dengan penggunaan konfigurasi *Wave Deflector* yang tepat, maka akan mengurangi efek tinggi gelombang pada badan kendaraan amfibi dan akan meningkatkan keselamatan pengemudi kendaraan tempur panser amfibi yang ada *Wave Deflector*-nya.

Kata kunci : *Wave Deflector*, *Resistance* , *Wave making*, *Kendaraan tempur amfibi*

ABSTRACT

Wave Deflector is a supporting component in the amphibious vehicle that serves to throw the flow of fluid from the front to the side of the vehicle so as to increase the safety factor of amphibious vehicle drivers when crossing or landing from ship

to shore. Until now the defense and security industries in Indonesia produce wheeled combat vehicle tires that have not equipped Wave Deflector. Therefore it is necessary to study and develop Wave Deflector configuration design which has optimum water resistance value and in accordance with mission requirements. The methodology used in this paper uses research and development, and the stage of this new research until the design validation phase by performing numerical hydrodynamics simulation in the design of the wave deflector configuration of amphibious wheel vehicle. The hydrodynamic evaluation base is performed by calculating the resistance performance of the wave deflector design configuration and tested by numerical simulation of wave making effect that occurs from 3 (three) Wave Deflector design configuration types used in combat vehicles. The evaluation parameters used as reference include: water resistance factor, vehicle speed, wave height and surface area of wave deflector. With the Wave Deflector 3 (WD3) mounting on an ANOA-2 Panzer vehicle in a wet-crossing operation of 3-4 Knot speed, it can decrease the effect of wave height that occurs in the range of 35 - 80%. From the results of numerical simulations can be concluded with the use of proper Wave Deflector configuration, it will reduce the effect of wave height on the amphibious vehicle body and will improve the safety of the driver amphibious armor fighters vehicles.

Keywords : Wave deflector, Resistance, Wave making, Amphibious combat vehicle

Diterima (received) : 13 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 8 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 29 Juli 2017

PENDAHULUAN

Wave Deflector merupakan komponen pendukung pada kendaraan amfibi yang mempunyai fungsi menghempaskan aliran fluida dari arah depan ke samping badan kendaraan. Dengan pemasangan komponen ini akan meningkatkan faktor keselamatan dalam mengendarai kendaraan amfibi di air. Hal ini akan memperjelas jarak pandang pengemudi ke depan.

Pada kendaraan tempur beroda ban produk industri dalam negeri Indonesia seperti Panzer ANOA 6X6 komponen ini belum digunakan (Gambar 1), mengingat Panzer ANOA 6x6 hanya digunakan di darat. Namun dengan beragamnya medan operasi kendaraan tempur beroda ban jenis ANOA yang belum memiliki Wave Deflector maka untuk meningkatkan kinerja kendaraan menjadi kendaraan tempur panzer amfibi, perlu dipasang Wave Deflector yang sesuai (Gambar 2) ¹⁾.



Gambar 1.
Panzer Anoa2 6X6
(source: total military.com)



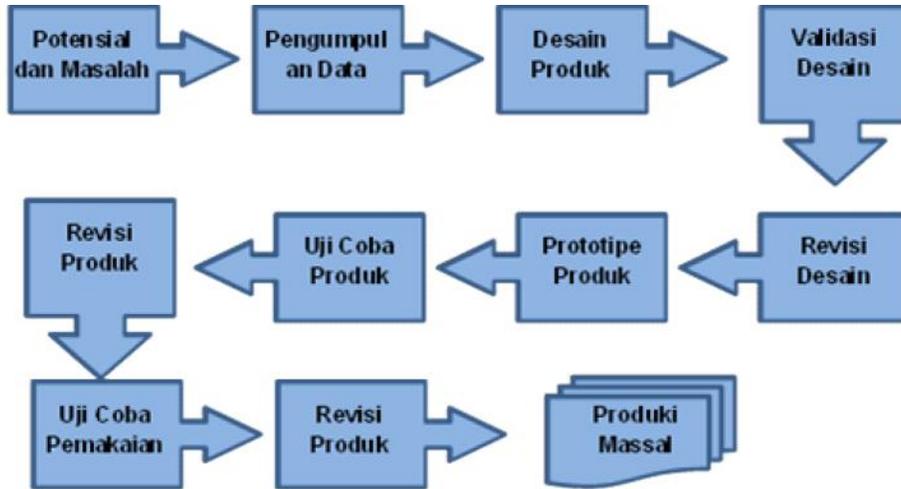
Gambar 2.
Wave Deflector pada Panzer
VAB 4X4 (France)
(source: total military.com)

Sesuai *Mission Requirements* dari kendaraan tempur amfibi yang dirancang menggunakan *platform* panzer ANOA2, maka dengan misi tempur tersebut kendaraan harus mampu menyeberangi sungai dan mampu untuk *take-off* dan *landing* dari kapal *Landing Ship Tank* menuju pantai ²⁾. Oleh karena itu perlu dirancang komponen Wave Deflector yang tepat. Untuk itu pada tulisan ini dilakukan kajian awal kinerja hidrodinamika secara numerik desain Wave Deflector yang optimal untuk kendaraan tempur beroda ban.

BAHAN DAN METODE

Metode penelitian yang digunakan untuk pengkajian *Wave Deflector* disini adalah metode penelitian dan pengembangan

(*research & development*) yang bertujuan untuk memilih desain produk *Wave Deflector* yang tepat (Gambar 3)³⁾.



Gambar 3.

Langkah-langkah metode penelitian dan pengembangan (R&D)

Pada kajian disini desain konfigurasi *Wave Deflector* yang tepat adalah desain *Wave Deflector* yang memiliki nilai tahanan air yang optimal serta tidak menambah beban berat pada kendaraan akibat efek gelombang yang terjadi, sesuai dengan *mission requirements*. Pada kajian disini dibuat 3 (tiga) model konfigurasi desain *Wave Deflector* pada panser, kemudian dilakukan validasi desain melalui simulasi numerik hidrodinamika. Dalam perhitungan numerik uji badan kendaraan panser (*hull*) dianggap solid seperti bentuk lambung kapal. Pada kajian disini digunakan batasan asumsi perhitungan yang berbasis pada parameter :

- Frungan of Reference* dimana dalam asumsi ini nilai *zero point / base line* dari badan kendaraan (tapak ban) masih dapat digunakan dalam menentukan *draft / water line* kendaraan
- Resistance Analysis*, analisis ini digunakan untuk mendapatkan koefisien gesek antara badan kendaraan terhadap air serta perhitungan total tahanan (*total resistance*) sesuai kecepatan kendaraan di air.
- Resistant Calculation* perhitungan disini menggunakan metode *free surface*. Dimana desain badan kendaraan (*hull*) diasumsikan termasuk kategori badan kapal (*hull*). Sedangkan faktor yang dijadikan referensi dalam perhitungan simulasi ini adalah faktor tahanan air,

kecepatan dan luas permukaan *wave deflector*⁴⁾.

Dari hasil perhitungan simulasi numerik hidrodinamika tersebut dapat diseleksi desain yang tepat (*feasibility design*) dari *Wave Deflector* berdasarkan nilai tahanan (*total resistance*) dan *wave making* yang terjadi akibat pemasangan *Wave Deflector* pada kendaraan panser beroda ban.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Hidrostatik Badan Panser

Untuk menganalisis kinerja hidrodinamika yang bekerja pada konfigurasi *Wave Deflector* pada Panser ANOA-2, maka di bawah ini disampaikan spesifikasi teknis Kendaraan Tempur Panser ANOA2 seperti pada Tabel 1⁵⁾.

Tabel 1.
Spesifikasi Teknis Panser ANOA2

Berat Kendaraan	14,5 Ton
Dimensi (mm)	6000 x 2500 x 2170

Untuk pengukuran yang dilakukan badan kendaraan menggunakan metode teknik perkapalan serta melakukan perhitungan hidrostatik memakai *software* Maxsurf, meliputi tinggi setiap sarat air, letak titik berat, volume / *displacement*, gaya apung dan sebagainya⁶⁾. Dari hasil perhitungan

hidrostatik dapat diketahui tinggi sarat air (*water line*) apung maksimum untuk spesifikasi berat total kendaraan Panser ANOA-2 seberat 14 ton, adalah mencapai sarat air 1272 mm. Sarat air kendaraan Panser ANOA-2 tersebut berkisar pada 2 cm di atas permukaan air atau garis air rata-rata perencanaan.

Dengan adanya sarat air yang tinggi, maka pengendara akan berada dibawah garis air, hal ini sangat membahayakan. Untuk itu perlu menentukan garis air (*water line*) hidrostatik kendaraan Panser yang aman dalam pengertian sarat air tidak menenggelamkan bagian kaca depan pengemudi sehingga pengemudi panser mempunyai jarak pandang ke depan dengan bebas serta kendaraan Panser masih tetap mempunyai daya apung. Oleh karenanya besar *displacement* Panser diturunkan menjadi 11 ton dari rancangan awal. Dengan penurunan ini maka tinggi garis air kendaraan Panser menjadi 1241 mm. Garis air ini 31 mm dibawah permukaan garis air rencana awal. Dari data pengukuran hidrostatik kendaraan Panser ANOA-2 dipilih garis air yang tepat tidak menutup pandangan pengemudi namun juga *displacement* Panser tidak berbeda jauh dengan berat total panser. Adapun hasil pengukuran hidrodinamis kendaraan Panser ANOA-2 ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2.
Pengukuran Hidrostatik

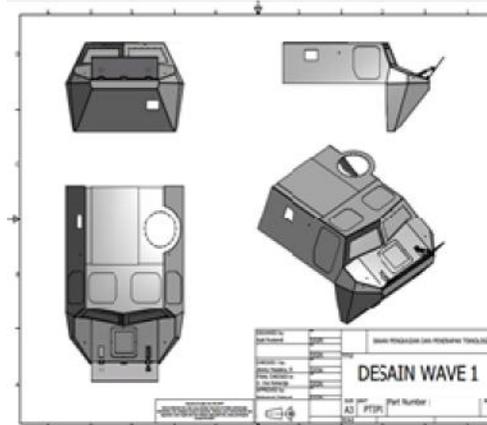
Parameter	Water Line				
	WL1	WL2	WL3	WL4	WL5
Draft pada midships (mm)	930,7	1085,8	1241,0	1396,1	1551,2
Displacement (Tonn)	7,191	9,222	10,99	12,57	14,00

Konfigurasi Desain Wave Deflector

Perancangan konfigurasi *Wave Deflector* didasarkan atas hasil pengamatan data lapangan serta diskusi dengan pihak industri manufaktur kendaraan Panser. Dari sini dibuat rancangan 3 (tiga) variasi konfigurasi model *Wave Deflector* yang dipasang pada bagian depan Panser ANOA-2, seperti pada Gambar 5, 6 dan 7. Adapun spesifikasi teknik ukuran ke tiga *Wave Deflector* ditampilkan pada Tabel 3.

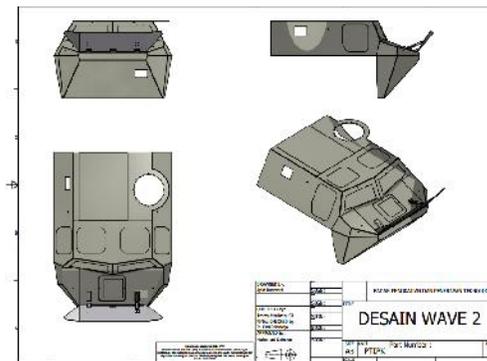
Tabel 3.
Spesifikasi Teknik *Wave Deflector*

	WD1	WD2	WD3
Panjang (mm)	1400	2078	2078
Tinggi (mm)	500	550	550
Tebal (mm)	10	10	10
Jumlah Engsel	3	3	3



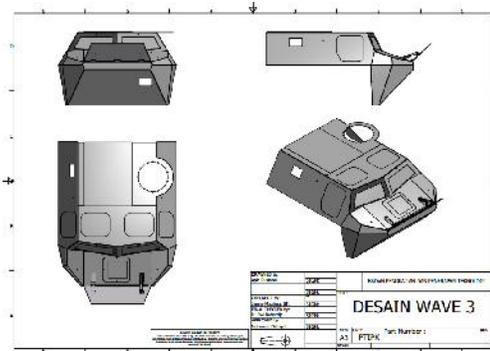
Gambar 4.
Desain *Wave Deflector* 1

Model *Wave Deflector* 1 (WD1), berbentuk dasar profil T yang dilengkapi *web plate* lurus. menyangga sepanjang *face plate* nya, dipasang pada bagian depan kendaraan Panser (Gambar 4).



Gambar 5.
Desain *Wave Deflector* 2

Pada model *Wave Deflector* 2 (WD2), berbentuk dasar profil T, pada bagian ujung kiri dan kanan *web plate* melebar menyangga *face plate* dan dipasang pada bagian depan kendaraan Panser (Gambar 5).



Gambar 6.
Desain Wave Deflector 3

Sedangkan pada model *Wave Deflector 3* (WD3), dengan bentuk dasar profil T, namun *web plate* pada bagian kedua ujungnya berbentuk tirus menyangga *face plate*, dipasang pada bagian depan kendaraan panser (Gambar 6).

Simulasi Hidrodinamik Wave Deflector

Dari masing-masing konfigurasi ke tiga desain *Wave Deflector* di atas terpasang pada kendaraan Panser ANOA-2 serta satu kondisi kendaraan Panser ANOA-2 tanpa *Wave Deflector*, dilakukan simulasi perhitungan numerik hidrodinamika untuk mengetahui besar tahanan total (*resistance*) dan besar efek gelombang yang timbul (*wave making*) akibat pemasangan *Wave Deflector* pada panser dalam kondisi kendaraan melakukan penyeberangan di air tenang. Untuk analisis perhitungan ini menggunakan soft ware Maxsurf *resistance*. memakai metode *slender body*. Adapun tahapan untuk analisis perhitungan total *resistance* dan *Wave making* dilakukan sebagai berikut :

1. Atur bagian *frame of reference* sebagai acuan nilai zero point dan garis air (*waterline*)
2. Atur metode yang digunakan yaitu dengan memakai metode *slender body*.
3. Masuk nilai *range* kecepatan yang diinginkan dalam analisis ini range kecepatan 0–6 Knot.
4. Jalankan perhitungan (*Run solve resistance analysis*) untuk melakukan analisis *resistance*
5. Untuk mengetahui *wave making*, pada program gunakan *run free surface*
6. Hasil analisis perhitungan *resistance* dan *Wave making* dapat dilihat dari nilai *result* dan *graphic*.

Data parameter *default* yang dimasukkan dalam software Maxsurf *resistance* meliputi perhiungan *resistance* dan *Wave making*

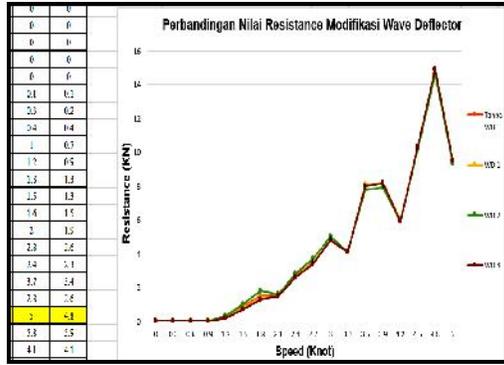
dalam kondisi perairan tenang. Dari hasil analisis perhitungan hidrodinamik didapatkan data total *resistance* dari konfigurasi kendaraan panser ANOA-2 tanpa *Wave Deflector* maupun dengan variasi *Wave Deflector* sebagai mana ditampilkan pada Tabel 4. :

Tabel 4.
Hasil Perhitungan *Resistance*

V Knot	Ro Non WD (KN)	R1 WD 1 (KN)	R2 WD 2 (KN)	R3 WD 3 (KN)
0	--	--	--	--
0.15	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0
0.45	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0
0.75	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0
1.05	0.1	0.1	0.1	0.1
1.2	0.3	0.3	0.3	0.2
1.35	0.5	0.4	0.4	0.4
1.5	0.9	0.8	1	0.7
1.65	1.1	1.1	1.2	0.9
1.8	1.5	1.4	1.8	1.3
1.95	1.5	1.4	1.5	1.3
2.1	1.6	1.5	1.6	1.5
2.25	2	1.9	2	1.9
2.4	2.7	2.6	2.8	2.6
2.55	2.4	2.3	2.4	2.3
2.7	3.5	3.5	3.7	3.4
2.85	2.7	2.6	2.8	2.6
3	4.8	4.8	5	4.8
3.15	5.8	5.9	5.8	5.9
3.3	4.1	4.1	4.1	4.1
3.45	4.9	4.9	4.9	4.9
3.6	8	8.1	7.8	8
3.75	9.4	9.5	9.2	9.5
3.9	8.2	8.2	7.9	8.2
4.05	6.3	6.3	6.2	6.3
4.2	6	6	5.9	5.9
4.35	7.6	7.6	7.4	7.6
4.5	10.3	10.3	10.1	10.3
4.65	13.1	13.1	12.8	13
4.8	14.9	14.9	14.6	14.9
4.95	15.6	15.6	15.3	15.6
5.1	15.3	15.2	15	15.2
6	9.5	9.5	9.3	9.5

Catatan : V = Speed, Ro = Slendered body Non WD, R n = Slender body with WD

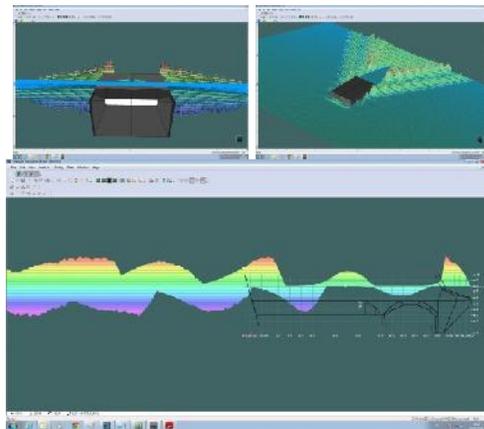
Dari data hasil analisis *resistance* dapat ditampilkan grafik perbandingan *resistance* dari kendaraan Panser ANOA-2 tanpa *Wave Deflector* maupun dengan menggunakan variasi *Wave Deflector* masing-masing, dalam berbagai kecepatan, sebagaimana pada Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7.

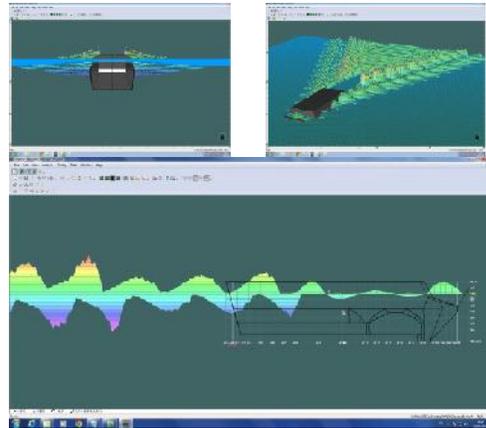
Grafik nilai resistance terhadap kecepatan

Dari Tabel 4. dan Gambar 7. grafik perhitungan di atas menunjukkan bahwa nilai hambatan dari kendaraan panser ANOA-2 tanpa menggunakan *Wave Deflector* serta dengan variasi *Wave Deflector* menunjukkan nilai tahanan (*resistance*) yang tidak berbeda jauh bahkan cenderung sama. Namun nilai tahanan terkecil dialami pada kendaraan Panser dengan konfigurasi *Wave Deflector* 2. Untuk mengetahui efek penggunaan *Wave Deflector* dapat dilihat dari efek gelombang yang dihasilkan dengan variasi kecepatan kendaraan panser berkisar antara 3 – 4 knot. Pada kecepatan tersebut kendaraan Panser disimulasikan mampu bergerak melakukan penyeberangan basah di sungai atau pantai saat beroperasi. Karenanya pada kecepatan 3 knot dengan variasi penggunaan *Wave Deflector* hasil *wave making* yang terjadi ditampilkan pada Gambar 8, 9, 10 dan 11 di bawah ini. Sedangkan variasi kecepatan kendaraan Panser 4 Knot sebagaimana ditampilkan pada Gambar 12, 13, 14, dan 15 berikut ini.



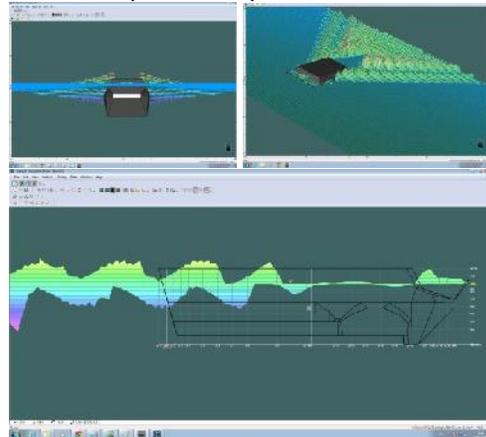
Gambar 8.

Efek Gelombang Tanpa *Wave Deflector* pada Kecepatan 3 knot



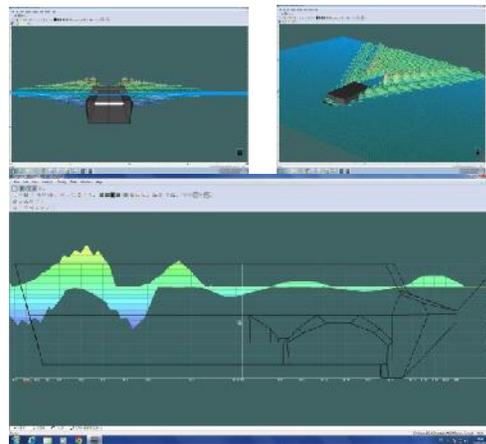
Gambar 9.

Efek Gelombang dengan *Wave Deflector 1* pada Kecepatan 3 knot



Gambar 10.

Efek Gelombang dengan *Wave Deflector 2* pada Kecepatan 3 knot



Gambar 11.

Efek Gelombang dengan *Wave Deflector 3* pada kecepatan 3 knot

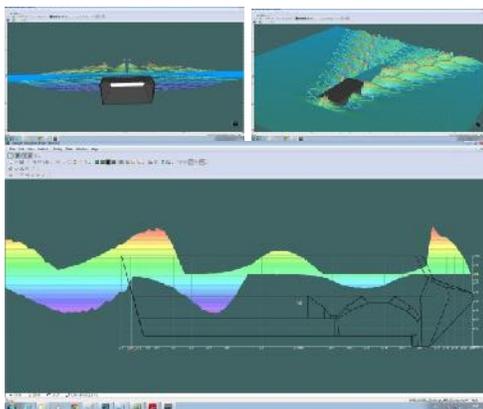
Dari hasil analisis *wave making* dengan *software Maxsurf resistance* didapatkan hasil tinggi gelombang maksimum yang mengenai bagian badan kendaraan panser ANOA-2

pada kecepatan 3 knot, sebagai mana ditampilkan pada Tabel 5.

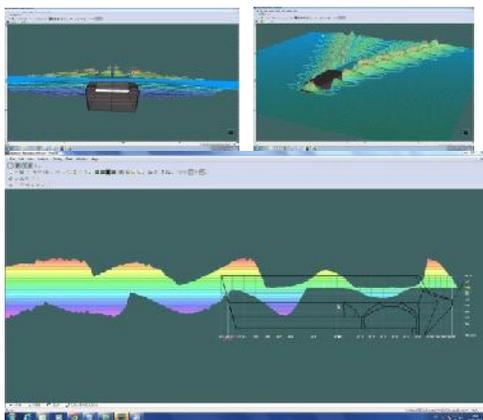
Tabel 5.
Wave Making pada Panser
Kecepatan 3 Knot

Panser	Tinggi Gelombang	Keterangan
Non WD	0,80 m	Perairan tenang
WD 1	0,31 m	Kecepatan 3 Knt
WD 2	0,29m	
WD 3	0,10 m	

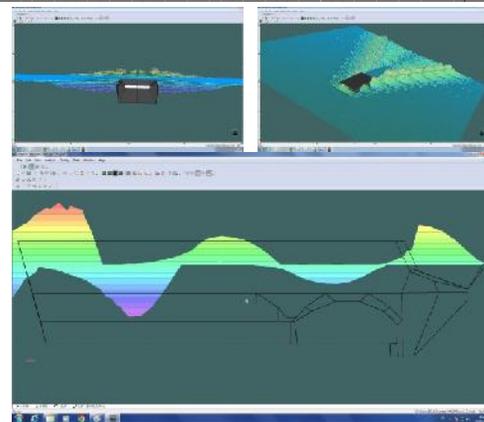
Dari hasil analisis simulasi *wave making* yang terjadi pada kendaraan Panser ANOA-2 terlihat bahwa dengan pemasangan *Wave Deflector* 3 pada kecepatan 3 Knot di perairan tenang, akan menimbulkan gelombang setinggi sekitar 0,1 m



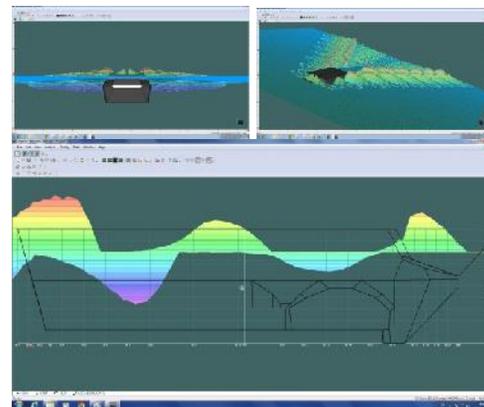
Gambar 12.
Efek Gelombang Tanpa *Wave Deflector*
pada kecepatan 4 knot



Gambar 13.
Efek Gelombang dengan *Wave Deflector* 1
pada Kecepatan 4 knot



Gambar 14.
Efek Gelombang dengan *Wave Deflector* 2
pada Kecepatan 4 knot



Gambar 15.
Efek Gelombang dengan *Wave Deflector* 3
pada Kecepatan 4 knot

Sedangkan dari hasil analisis *wave making* yang ditimbulkan pada panser ANOA-2 setelah dilakukan perhitungan dengan *software* Maxsurf resistance didapatkan hasil tinggi gelombang maksimum yang mengenai bagian badan panser pada kecepatan 4 knot, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6.
Wave Making pada Panser
Kecepatan 4 Knot

Panser	Tinggi Gelombang	Keterangan
Non WD	0,80 m	Perairan tenang
WD 1	0,74 m	Kecepatan 4 Knot
WD 2	0,51 m	
WD 3	0,54 m	

Dari hasil analisis simulasi *wave making* yang terjadi pada kendaraan Panser ANOA-2, terlihat bahwa dengan pemasangan *Wave Deflector* 3 pada kecepatan panser 4 Knot, akan mengakibatkan timbulnya

gelombang setinggi sekitar 0,56 m. Dengan pemasangan Wave deflector model WD3 pada kendaraan Panser ANOA-2 dalam kondisi operasi penyeberangan basah kercepatan 3-4 Knot, dapat menurunkan efek tinggi gelombang yang terjadi berkisar 35 – 80 %.

SIMPULAN

Basis perhitungan data kendaraan Panser ANOA-2 untuk analisis hidrodinamika : tahanan total (*resistance*) dan *wave making* digunakan asumsi berat total kendaraan Panser seberat 11 ton dengan ketinggian sarat air 1.241 m dari garis dasar (*baseline*) tapak ban.

Dari 3 (tiga) model konfigurasi Wave Deflector yang dirancang, konfigurasi Wave Deflector 3 yang dinilai paling optimal, memiliki tahanan total yang dihasilkan paling kecil sebesar 6,3 kN. Sedang dari hasil analisis simulasi wave making pada kendaraan Panser ANOA-2 menunjukkan bahwa dengan pemasangan konfigurasi Wave Deflector 3, menghasilkan parameter tinggi gelombang maksimum mencapai 0,10 m pada kecepatan kendaraan 3 Knot dan ketinggian gelombang 0,54 m pada kecepatan kendaraan 4 Knot.

Dengan penggunaan Wave Deflector pada kendaraan Panser amfibi, pada kecepatan operasi penyeberangan basah 3 – 4 Knot, maka akan menurunkan ketinggian wave making sekitar 35 – 80 %, sehingga hal ini akan meningkatkan keselamatan dalam pengendaraan panser dilapangan.

Dari hasil simulasi numerik tersebut dapat disimpulkan dengan penggunaan konfigurasi Wave Deflector yang tepat, maka akan mengurangi efek tinggi gelombang pada badan kendaraan amfibi dan akan meningkatkan keselamatan pengendaraan kendaraan panser amfibi yang ada Wave Deflector-nya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis dan para perekayasa yang terlibat dalam kegiatan penelitian dan pengembangan Wave Deflector pada Kendaraan Tempur Amfibi beroda ban menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kemenristekdikti yang telah mensupport pendanaan pada kegiatan tersebut. Ucapan terima kasih juga disampaikan pada semua rekan-rekan PTIPK baik langsung maupun tidak langsung yang telah mendukung kegiatan desain dan simulasi numerik *Wave Deflector*. Dan ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh Pengelola Majalah Pengkajian Industri yang telah bersedia memberikan masukan atau koreksi serta menerbitkan jurnal tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Mision requirement, Armour Personal Carrier, JANE'S Armour and Artillery 1993-1994, 14th ed. Edited by Christopher F. Foss, JANES Information Group, USA
2. Operasi Amphibi, Ed. Koleksi Angkasa XXVIII, PT Gramedia, Jakarta, p.14.
3. Prof. Dr. Sugiyono, Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D, Alfabeta CV, Bandung, (2011),
4. Iskendar, Komponen Gaya Hambatan Kapal Cepat, Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia Vol. 8, No.2, BPPT, Jakarta, (2006)
5. Santoso Dede, Spesifikasi VAB 4X4 Amfibi, Lap.TN002/1.2/WDSINAS/IV/2014, PTIPK, BPPT, Tangerang Selatan (2014),
6. Paripurna Abid, Landasan Teori Water Resistance Lap TN002/3.1/WDSINAS/VI/ 2014, PTIPK, BPPT Tangerang Selatan, (2014),
7. Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson, Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power, Cambridge University , (2011)

KEMAMPUAN STRATEGIS PESAWAT UDARA NIR AWAK BPPT UNTUK DIOPERASIKAN DARI KAPAL PERANG

THE STRATEGIC FLIGHT PERFORMANCE OF BPPT UAV FOR SUPPORTING THE NAVAL OPERATION

Perhitungan Jangkauan, Ketahanan dan Batas Ketinggian Terbang serta Paparan Kelayakan Operasional *Flying Wing* pada Kapal Perang Indonesia

Jemie Muliadi ^a, Dewi H. Budiarti ^a, Akhmad Rifai ^a, Dyah Jatiningrum ^b

^a Pusat Teknologi Industri Pertahanan dan Keamanan (PTIPK – BPPT),
Lt.2 Gd. 256 Manajemen-Hankam, Puspiptek, Serpong 15314.

^b Pusat Teknologi Industri dan Sistem Transportasi (PTIST – BPPT),
Lt.3 Gd. Tekno 2, Puspiptek, Serpong 15314.

e-mail : jemie.muliadi@bppt.go.id, dewi.habsari@bppt.go.id , akhmad.rifai@bppt.go.id,
dyah.jatiningrum@bppt.go.id

Abstrak

Salah satu cara pemenuhan Minimum Essential Force TNI-AL adalah melalui peningkatan kemampuan Alutsista yang sudah dimiliki. Peningkatan kemampuan tersebut dapat dilakukan dengan melengkapi kapal perang (KRI) dengan PUNA BPPT. Penempatan PUNA BPPT pada kapal perang TNI-AL akan mendukung fungsi operasionalnya, antara lain patroli perbatasan, pengawasan wilayah bahkan hingga pengintaian.

Dalam naskah ini akan disajikan kemampuan jangkauan jarak, ketahanan dan ketinggian terbang PUNA BPPT yang relevan dengan pengoperasiannya dari kapal perang. Perhitungan parameter prestasi terbang PUNA BPPT akan dilakukan dengan pengolahan data uji terbang, dokumen perancangan, dan pendekatan-pendekatan perhitungan yang terkait.

Meskipun PUNA belum mampu menggantikan keseluruhan fungsi helikopter di kapal perang, tapi beberapa fungsi penting tersebut dapat dikerjakan oleh PUNA. PUNA beroperasi dengan konsumsi bahan bakar yang sangat sedikit dan dapat bertolak dan mendarat dengan lebih mudah. Dengan sifat Nir Awak-nya, penggunaan PUNA mengurangi resiko terhadap keselamatan personel yang mengoperasikannya. Hal-hal ini menjadi acuan BPPT dalam mengembangkan PUNA yang dapat beroperasi dari kapal perang.

Kata kunci : PUNA KRI, PUNA BPPT, PUNA tanpa ekor, Jangkauan Terbang, Ketahanan Terbang

Abstract

One of the method to achieve the Minimum Essential Force for the Indonesian Navy is the improvement of the current capability of the existing weapons and defense apparatus. Equipping the warship with reliable UAVs will support their main mission such as border patrol, surveillance, and reconnaissance.

In this work, the BPPT UAV range, endurance, and ceiling will be presented to emphasis its ability for operation from the warship. By processing its flight test data, together with design documents and using proper approximation method, the flight performance parameters will be derived, and its values will be calculated.

The UAV can not totally replace the role of navy's helicopter of the warship, but partially, the UAV offers better features such as lower fuel consumption, and the easiness in take off and landing process. The personnel involved in the UAV mission can operate it safely compared to the manned helicopter. These motives

encourage BPPT to develop a UAV that is portable enough to be operated from frigate class warships.

Key words : Naval purpose UAV, BPPT UAV, Flying Wing, Flight Range, Flight Endurance

Diterima (*received*) : 14 Juni 2017, Direvisi (*reviewed*) : 9 Juli 2017, Disetujui (*accepted*) : 30 Juli 2017

PENDAHULUAN

Perbatasan Wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia

Sebagian besar perbatasan Indonesia terdiri dari perbatasan laut. Hal ini adalah konsekuensi dari kondisi geografis Indonesia yang unik, yaitu negara kepulauan yang terbentang di wilayah yang cukup luas. Pengawasan garis perbatasan yang sangat panjang ini menjadi salah satu tugas TNI AL. Tugas ini bisa jadi adalah pekerjaan yang sangat berat, terutama karena kondisi sarana dan prasarana TNI yang ada sekarang.

Saat ini, garis pantai Indonesia terbentang sepanjang 97 ribu km¹). Dengan panjang garis pantai yang mencapai puluhan ribu kilometer dan garis perbatasan darat hingga ribuan kilometer, maka masih terdapat persoalan perbatasan yang belum selesai. Dalam Buku Putih Pertahanan Indonesia²), dijelaskan isu tentang pulau-pulau kecil terluar/terdepan yang sebenarnya berperan sangat menentukan dalam penentuan batas wilayah Indonesia. Pulau-pulau tersebut berfungsi sebagai titik pangkal penarikan batas wilayah NKRI. Namun terjadi masalah dalam eksistensi, status kepemilikan, konversi lingkungan, pengamanan dan pengawasannya. Di sisi lain kondisi pulau-pulau kecil terluar semakin kritis karena banyak yang tidak berpenghuni dan kondisi alamnya tidak layak untuk dihuni, antara lain tidak terdapat cukup kandungan daya air tawar dan ruang hidup yang tidak cukup.

Dalam bidang pengamanan, pulau-pulau kecil terluar berpotensi diperjualbelikan atau disewakan secara tidak sah kepada pihak atau warga negara asing. Dari beberapa kasus, ditemukan beberapa pulau kecil yang dikelola oleh perorangan, bahkan ada yang dikelola oleh pihak asing. Praktek-praktek tersebut menjadi ancaman yang dapat menyulitkan pemerintah dan bangsa Indonesia. Di sisi lain, keterbatasan pembangunan pada pulau-pulau di daerah perbatasan menjadi ancaman stabilitas politik, hukum dan keamanan²²). Dari paparan ini, dapat terlihat pentingnya kehadiran sarana pengawasan dengan

kemampuan di atas kesanggupan fisik manusia.

Dalam Buku Putih tersebut²), diidentifikasi pula beberapa jenis gangguan di wilayah perbatasan, meliputi, pencurian ikan, penyelundupan dan perompakan. Selain itu, terdapat pula ancaman nirmiliter yang bersifat lintas Negara, yaitu ancaman keamanan lintas negara yang terorganisir yang melibatkan pelaku-pelaku dari negara lain. Bentuk ancaman dimaksud antara lain aksi terorisme internasional, gangguan keamanan di wilayah laut, gangguan keamanan dirgantara, dan gangguan keamanan di sepanjang garis perbatasan darat. Bentuknya berupa penyelundupan manusia, senjata dan bahan peledak, serta perompakan dan pembajakan, pembalakan liar, penangkapan ikan secara tidak sah, dan lain-lain.

Peningkatan *Minimum Essential Force* TNI-AL

Minimum Essential Force (MEF) adalah kekuatan minimal pokok yang diperlukan oleh TNI untuk dapat menjaga kedaulatan Negara Kesatuan Republik Indonesia secara optimum. Untuk memenuhi MEF ini maka sarana dan prasarana TNI perlu ditingkatkan. Salah satunya adalah dengan meningkatkan kemampuan sarana TNI-AL yang telah ada. Peningkatan kemampuan kapal patroli perbatasan kelas fregat dapat diwujudkan melalui pengoperasian Pesawat Udara Nir Awak (PUNA). PUNA dapat digunakan untuk melakukan pengawasan terhadap pulau-pulau terpencil di perbatasan. Penerapan hal ini akan meningkatkan luasan area pengawasan, sehingga dapat mencegah 'hilangnya' pulau-pulau tersebut ke negara tetangga.

Pesawat Udara Nir Awak Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (PUNA BPPT)

Konfigurasi PUNA yang dikembangkan oleh BPPT untuk operasi dari atas kapal kelas fregat adalah pesawat udara nir awak dengan konfigurasi *flying wing*. Pesawat ini dapat lepas landas dengan menggunakan *launcher* (pelontar) dan mendarat dengan menggunakan *landing net* (jaring pendarat).



Gambar 1.
PUNA BPPT jenis *Flying Wing*

Dari kapal perang TNI-AL, PUNA dirancang untuk melaksanakan misi pengawasan pulau-pulau terluar Indonesia dengan *real-time* video baik dengan kamera konvensional maupun inframerah. Hal ini adalah salah satu aplikasi PUNA yang dapat dioperasikan pada kapal perang, di samping banyak kegunaan lain yang masih bisa dieksplorasi¹⁶⁾.

Kapal Perang TNI-AL Kelas Fregat

Sebagai salah satu kekuatan armada TNI AL, kapal perang dilengkapi dengan berbagai peralatan pendukung operasi misinya. Salah satu peralatan yang sangat sensitif adalah antena radar yang berada di geladak bagian tengah kapal¹⁷⁾. Berbagai peralatan operasional tersebut secara langsung maupun tidak langsung akan menjadi faktor yang menentukan prosedur penggunaan PUNA di atas kapal perang baik dari segi lokasi maupun prosedur *takeoff* dan *landing* yang akan diterapkan.



Gambar 2
Kapal Perang TNI-AL Kelas Fregat
Sumber: Wikipedia¹⁹⁾

Pada dek bagian belakang kapal perang kelas fregat terdapat *helipad* yang mampu memfasilitasi operasi *light helicopter* seperti jenis NBO 105 Bolkow. Panjang *helipad* ini adalah 24,6 meter, sedangkan lebarnya adalah 12 meter. Dari segi dimensi dan lokasi, area *helipad* ini dapat digunakan dalam pengoperasian PUNA.

Konsepsi *take-off* dan *landing* di atas kapal, bukanlah hal baru. Banyak pesawat berkemampuan *Short Take-Off and Landing* (STOL) dan *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) juga mampu lepas landas dan mendarat di atas kapal laut²¹⁾. Gambar 3 memperlihatkan lokasi pendaratan di atas KRI.



Gambar 3
Helipad Lokasi Peluncuran dan Pendaratan PUNA di Kapal Perang

TAKE-OFF LANDING PUNA BPPT DI ATAS KAPAL PERANG

Peluncuran PUNA dari Kapal Perang

Seperti halnya operasi di darat, peluncuran PUNA dari atas kapal perang, akan menggunakan *launcher* yang sama dengan panjang 4,77 meter. *Launcher* yang digunakan PUNA BPPT ini dapat dipasang di atas *helipad* yang berukuran 24,6 meter x 12 meter. *Launcher* dapat dipasang sejajar panjang ataupun lebar *helipad*. Arah angin dan kecepatan kapal perlu diperhatikan untuk performa *takeoff* yang optimal. Selain itu, pesawat harus diluncurkan menjauh dari badan kapal agar tidak membahayakan peralatan maupun personel. Terdapat tiga kemungkinan peluncuran yaitu arah belakang, kanan atau kiri kapal, yang dapat diatur dengan mudah karena *launcher* yang digunakan cukup portabel. Gambar 4 memperlihatkan pelontar yang digunakan.



Gambar 4
Launcher PUNA BPPT



Gambar 5
Ilustrasi Persiapan Peluncuran PUNA BPPT dari *Helipad* Kapal Perang

Pendaratan PUNA



Gambar 6
Jaring Pendarat PUNA BPPT

Pesawat PUNA BPPT ini memiliki bentang sayap sepanjang 2,988 meter. Untuk mendarat, PUNA menggunakan jaring yang berukuran 8 meter x 5 meter dengan tinggi tiang 6 meter. Lebar area yang dibutuhkan untuk mendarat adalah minimal 10 meter. Oleh karena itu, jaring ini dapat dipasang di atas *helipad* kapal perang (baik melintang maupun memanjang). Gambar 6 memperlihatkan jaring pendarat yang digunakan.

Pemasangan jaring pendarat (*landing net*) dapat dilakukan dengan mengikat tali jaring pada lubang-lubang khusus di geladak kapal perang.



Gambar 7
Lubang Penambatan di Geladak Kapal Perang

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam *landing* adalah sebagai berikut:

-) Arah landing dan penempatan jaring. Berbagai peralatan operasional di bagian tengah geladak kapal mempengaruhi implementasi operasi PUNA. Ketika *takeoff*, arah terbang pesawat dapat diarahkan dengan relatif mudah, namun pada saat *landing* hal ini akan menjadi lebih sulit. Dimensi pesawat yang cukup kecil menyebabkan sensitifitas reaksi terhadap kecepatan angin, sehingga pilot harus ekstra hati-hati dalam menjaga lintasan *approach* menuju titik pendaratan. Untuk meminimalkan resiko, *approach* dilakukan dari sisi kanan atau kiri kapal sehingga lintasan terbang tidak mengarah ke tengah geladak.
-) Terdapat dua kemungkinan penempatan jaring, yaitu pada sisi luar atau bagian tengah geladak belakang.

Apabila jaring ditempatkan pada bagian sisi luar, maka harus disiapkan pula jaring penadah *horizontal* di bagian bawah agar pesawat tidak jatuh ke laut. Apabila jaring ditempatkan di bagian tengah geladak belakang, perlu disiapkan alas agar badan pesawat tidak rusak ketika terpental dari jaring ke lantai geladak.



Gambar 8
Ilustrasi Pemasangan Jaring Pendarat di Kapal Perang

-) Arah dan kecepatan kapal. Agar proses pendaratan PUNA berjalan dengan lancar, sebaiknya kapal berada dalam posisi diam (turun jangkar) sehingga lintasan *approach* dapat dijaga tetap. Kemungkinan lain adalah kapal diam tanpa dijangkar, tetapi sebaiknya dilakukan simulasi terlebih dahulu agar pilot dan juru mudi dapat mensinkronkan tahapan operasional yang diperlukan.
-) Pengamanan peralatan kapal dan personil. Meskipun arah lintasan *approach* dan penempatan jaring telah ditentukan sedemikian rupa untuk menghindari bahaya terhadap peralatan operasional dan personil kapal, satu langkah tambahan perlu dilakukan. Sebuah jaring tambahan dapat dipasang diantara peralatan kapal dan area operasi PUNA. Selain itu, hanya personil yang berkaitan langsung dengan operasi PUNA yang boleh berada di area terkait, dengan memperhatikan batasan yang telah ditentukan. Semua personil lainnya harus berada di belakang garis jaring pengaman.

JANGKAUAN TERBANG PUNA BPPT

Persamaan Jangkauan Terbang Maksimum

Jangkauan Terbang (*Range*) adalah jarak yang ditempuh oleh pesawat udara dengan sejumlah bahan bakar yang dibawa dan sehimpunan parameter terbang tertentu³.

Asselin³, merumuskan persamaan Jangkauan Terbang Pesawat Udara dalam ekspresi berikut:

$$X_{BR} = X \frac{Y_p E_m}{SFC_p} \ln \frac{1}{1 Zg} \quad (1)$$

Dengan notasi:

- X_{BR} : Jangkauan Terbang
- SFC_p : Konsumsi Bahan Bakar Tiap Satuan Waktu (*Piston-Prop Engine Specific Fuel Consumption*)
- P : Faktor Efisiensi Baling-Baling
- E_m : Nilai Maksimum Efisiensi Aerodinamika (Perbandingan C_L dan C_D).
- Z : Nisbah Perbandingan Berat Bahan Bakar terhadap Berat Awal Pesawat (*Take Off Weight*)

Nilai-nilai dari parameter SFC_p , E_m , P , dan akan dihitung dengan pengolahan *Raw Data* dari *Mission Report* Uji Terbang PUNA dan Analisa Teknis PUNA. *Raw Data* tersebut ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 1.
Raw Data Perhitungan Jangkauan Terbang Maksimum PUNA di Atas Kapal Perang

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
<i>MTOW</i>	10,5	Kg	Budiarti et al. ⁴⁾ pp.8
<i>Fuel Volume Rate</i>	1	Liter/jam	Budiarti et al. ⁵⁾ pp.12
<i>Fuel Tank Capacity</i>	1500	Cc	Budiarti et al. ⁴⁾ pp.8
<i>Propeller Diameter</i>	14	Inch	Budiarti et al. ⁴⁾ pp.8
<i>Propeller Pitch</i>	6	Inch	Budiarti et al. ⁴⁾ pp.8
<i>Fuel Density</i>	0,723	g/cm ³	Sururi & Waluyo ⁶⁾

Sedangkan perhitungan parameter-parameter, E_m , SFC_p , dan P , akan disajikan pada tahapan-tahapan berikut:

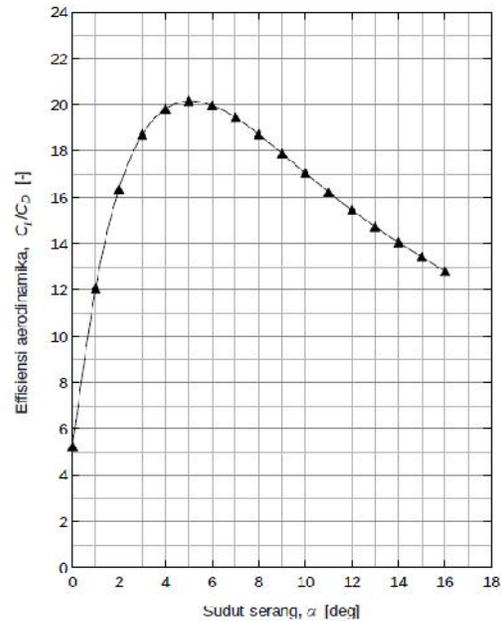
Rasio Berat Bahan Bakar (*Fuel Ratio*,)

Rasio Berat Bahan Bakar Pesawat menyatakan perbandingan antara berat bahan bakar, W_{Fuel} yang dibawa dengan berat lepas landasnya. Parameter ini dinyatakan secara matematis dalam persamaan³⁾:

$$g \times \frac{W_{Fuel}}{MTOW} \times \frac{Vol_{Fuel} \dots Fuel}{MTOW} \frac{g}{g} \quad (2)$$

Untuk maksimalisasi jangkauan terbang, maka akan digunakan berat lepas landas sebesar *Maximum Take-Off Weight*, *MTOW* dan Volume Tangki Bahan Bakar dari Budiarti

et al.⁵⁾. Untuk 1,5 liter bahan bakar, maka dengan persamaan (2) akan diperoleh nilai sebesar 0,1033.



Gambar 9

Distribusi Efisiensi Aerodinamika terhadap Sudut Serang (Sumber: Hasim & Madhapi⁷⁾)

Efisiensi Aerodinamika Maksimum (E_m), serta C_L dan C_D pada Kondisi Tersebut

Nilai Efisiensi Aerodinamika, E adalah properti aerodinamika yang menyatakan perbandingan gaya angkat PUNA terhadap gaya hambatnya (*Lift to Drag Ratio*). Secara matematis, nilai E dihitung dengan persamaan³⁾:

$$E = \frac{L}{D} \quad (3)$$

Maka parameter E , juga menghubungkan koefisien gaya angkat pesawat, C_L , dan koefisien gaya hambatnya, C_D . Definisi C_L dan C_D dinyatakan dengan hubungan berikut ini³⁾:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (5)$$

Dengan:

- M : Massa Jenis Udara
- V : Kecepatan Terbang
- S : Luas Sayap

Maka, substitusi (4) dan (5) ke (3), akan menghasilkan:

$$E \times \frac{C_L}{C_D} \tag{6}$$

Hasim dan Madhapi dalam⁷⁾ menghitung nilai koefisien gaya angkat dan koefisien gaya hambat PUNA BPPT, serta Efisiensi Aerodinamika, E . Nilai Efisiensi Aerodinamika, E , disajikan dengan kurva pada Gambar 9 sebagai fungsi dari sudut serang, α .

Dari kurva Distribusi Efisiensi Aerodinamika PUNA BPPT pada Gambar 9, terlihat bahwa Efisiensi Aerodinamika mencapai nilai maksimum bila PUNA diterbangkan pada Sudut Serang, α , sebesar 5° . Nilai Efisiensi Aerodinamika maksimum, E_m , Koefisien Gaya Angkat, C_L , dan Koefisien Gaya Hambat, C_D , pada kondisi tersebut, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.
Efisiensi Aerodinamika Maksimum, serta Koefisien Gaya Angkat dan Koefisien Gaya Hambatnya

Parameter	Notasi	Nilai	Sumber
Efisiensi Aerodinamika maksimum	E_m	20	Hasim & Madhapi ⁷⁾
Koefisien Gaya Angkat	C_L	0,4	Hasim & Madhapi ⁷⁾
Koefisien Gaya Hambat	C_D	0,02	Hasim & Madhapi ⁷⁾

Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (Specific Fuel Consumption, SFC_p)

Konsumsi Spesifik Bahan Bakar, SFC_p , menyatakan massa bahan bakar yang digunakan dalam setiap satuan daya per satuan waktu. Untuk mendapatkan nilai ini maka perlu dilakukan tahapan perhitungan berikut ini:

-) Menghitung luasan referensi sayap, A_{Ref} .
-) Menghitung kecepatan jelajah (*cruise speed*), V_c .
-) Menghitung Gaya Hambat (*drag*), D .
-) Menghitung Daya Terbang yang dibutuhkan (*Power Required*), P_r .

Perhitungan luasan referensi sayap, S . Dalam pengembangannya, PUNA BPPT telah mengalami modifikasi desain. Dari data dokumentasi teknis di tahun 2012⁷⁾, tercantum luasan referensi sayap PUNA adalah $0,6 \text{ m}^2$, dengan ukuran bentang sayap sepanjang 2.358 mm. Pada pengembangan

terbaru, desain PUNA BPPT diperbesar dimensi-dimensinya hingga bentang sayapnya mencapai $2.988,81 \text{ mm}^5$.

Maka, dengan menggunakan kuadrat perbandingan bentang sayap sebagai faktor skala perbesaran, luas referensi sayap pada *prototipe* saat ini dihitung sebagai berikut³⁾ :

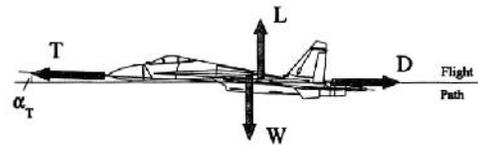
$$S \times \left(\frac{b_N}{b_{Pre}} \right)^2 \times A_{Pre} \tag{7}$$

Dengan variabel:

- S : Luas Referensi Sayap yang Baru (*New Wing Reference Area*)
- A_{Pre} : Luas Referensi Sayap Purwarupa sebelumnya (*Previous Wing Reference Area*), yaitu $0,6 \text{ m}^2$.
- b_N : Panjang bentang sayap pada Purwarupa yang baru (*New Span*), yaitu $2.988,81 \text{ mm}$.
- b_{Pre} : Panjang bentang sayap pada Purwarupa sebelumnya (*Previous Length of Span*), yaitu 2.358 mm .

Sehingga diperoleh nilai S seluas $0,9641 \text{ m}^2$.

Perhitungan kecepatan jelajah, V_c . Ketika Pesawat Udara terbang menjelajah (*Cruise Flight*), maka terjadi kesetimbangan gaya-gaya yang diilustrasikan pada Gambar 10.



Gambar 10
Keseimbangan Gaya Pada Pesawat Udara
Sumber: Asselin³⁾

Dari diagram Keseimbangan Gaya pada Pesawat Udara (diilustrasikan pada Gambar 10) ketika terbang dalam keadaan mantap (*steady state*), berlaku³⁾ :

$$T = D \tag{8}$$

$$L = W \tag{9}$$

Dengan notasi:

- T : Gaya Dorong (*Thrust*)
- D : Gaya Hambat (*Drag*)
- L : Gaya Angkat (*Lift*)
- W : Berat Pesawat (*Weight*)

Bila Persamaan (9) dimodifikasi menjadi:

$$L = W \tag{10}$$

Kemudian disubstitusikan ke persamaan (4) menjadi:

$$W \times \frac{1}{2} \dots V^2 S C_L \quad (11)$$

Maka kecepatan jelajah, V_c , dapat dihitung dari persamaan (11) yang bentuknya dimodifikasi sebagai berikut:

$$V_c \times \sqrt{\frac{MTOW \ g}{\frac{1}{2} \dots S C_L}} \quad (12)$$

Substitusi nilai-nilai berikut:

- J) $MTOW$, massa PUNA saat diluncurkan sebesar, 10,5 kg
- J) g , percepatan gravitasi sebesar 9,81 m/s².
- J) ρ , massa jenis udara di permukaan laut sebesar 1,225 kg/m³.
- J) S , luas sayap, sebesar 0,9641 m².
- J) C_L , koefisien gaya angkat pada kondisi Efisiensi Aerodinamika maksimum sebesar 0,4.

Ke persamaan (12) akan menghasilkan kecepatan jelajah, V_c , sebesar 40 knots atau 20,577 m/s.

Perhitungan gaya hambat, D , dapat dilakukan dengan persamaan (5).

$$D \times \frac{1}{2} \dots V^2 S C_D$$

Substitusi nilai-nilai berikut:

- J) g , percepatan gravitasi sebesar 9,81 m/s².
- J) ρ , massa jenis udara di permukaan laut sebesar 1,225 kg/m³.
- J) V , kecepatan terbang PUNA sama dengan V_c , sebesar, 20,577 m/s
- J) S , luas sayap, sebesar 0,9641 m².
- J) C_D , koefisien gaya hambat pada kondisi Efisiensi Aerodinamika maksimum sebesar 0,02.

Menghasilkan gaya hambat, D , sebesar 5 N.

Perhitungan kebutuhan Daya Terbang, P_r , dilakukan pada kondisi jelajah. Dengan memodifikasi persamaan (8) menjadi

$$T \times D \quad (13)$$

Maka persamaan kebutuhan daya dari semula,

$$P_r \times T \times V_c \quad (14)$$

Menjadi

$$P_r \times D \times V_c \quad (15)$$

Maka, dengan gaya hambat (D) sebesar 5 N, dan kecepatan jelajah (V_c) sebesar 20,577 m/s, diperoleh Kebutuhan Daya Terbang, P_r , sebesar 102,889 Watt.

Perhitungan konsumsi spesifik bahan bakar, SFC_p , dilakukan dengan menggunakan informasi *Fuel Volume Rate*⁵⁾, dan perhitungan kebutuhan daya terbang di atas. Dengan persamaan pembagian berikut³⁾:

$$SFC_p \times \frac{\text{Fuel Volume Rate}}{P_r} \dots \text{Fuel} \quad (16)$$

Maka diperoleh nilai SFC_p sebesar 9,759787 x 10⁻⁰⁶ kg/Watt.s.

Efisiensi Baling-Baling (*Propeller Efficiency, η_p*)

Efisiensi Baling-Baling adalah sebuah besaran yang menunjukkan perbandingan daya mesin (*power*) yang dapat diubah menjadi gaya dorong (*thrust*)⁸⁾. Nilai parameter ini tergantung dari harga frekuensi putaran baling-baling (*RPM* atau n), diameter baling-baling (d), sudut *pitch* baling-baling (ϕ), dan massa jenis udara (ρ). Tahapan untuk menghitung nilai efisiensi ini meliputi:

- J) Menghitung frekuensi putaran baling-baling ketika PUNA terbang jelajah, *RPM*.
- J) Menghitung Koefisien Gaya Dorong (*Thrust*) Tak-Berdimensi, C_T .
- J) Menghitung Koefisien Daya (*Power*) Tak-Berdimensi, C_P .
- J) Menghitung Rasio Advans (*Advance Ratio*), J .

Perhitungan frekuensi putaran baling-baling, *RPM*. G. Staples⁹⁾, mempublikasikan regresi empirik yang dilakukannya terhadap 149 data pengukuran *thrust*. Staples melakukan regresi mulai dari baling-baling 5" x 5" hingga baling-baling 17" x 8", baik pada kondisi statik dan juga kondisi dinamik. Regresi tersebut diterapkan untuk memodelkan hubungan empirik antara diameter, sudut *pitch*, *RPM* dan *thrust* yang dihasilkan baling-baling tersebut.

Dalam bentuk yang disederhanakannya, hasil regresi Staples dinyatakan dalam pemodelan berikut⁹⁾:

$$T \times 4.392399 \mid 10^{28} \text{ BRPM } B \frac{d^{3.5}}{\sqrt{\xi}}$$

$$B \times 4.23333 \mid 10^{24} \text{ BRPM } B(\cdot) ZV^*$$

(17)

Dengan notasi:

- T : Thrust (Gaya Dorong) yang dihasilkan, dalam satuan Newton.
- RPM : Putaran Baling-Baling Per Menit
- d : Diameter Baling-Baling dalam satuan inci.
- φ : Sudut Pitch Baling-baling dalam satuan inci.
- V : Kecepatan Arah Depan ketika Baling-Baling bergerak maju dalam satuan m/s.

Substitusi nilai-nilai berikut:

-) T , sama dengan Gaya Hambat saat PUNA terbang jelajah sebesar 5 N.
-) d , diameter baling-baling sebesar 14 inci.
-) φ , sudut *pitch* baling-baling sebesar 6 inci.
-) V , sama dengan kecepatan jelajah, sebesar 20,577 m/s.

Ke persamaan (17) akan menghasilkan persamaan kuadrat dengan RPM sebagai variabelnya. Dari 2 solusi yang diperoleh, maka dipilih harga RPM sebesar 6442.

Perhitungan koefisien Gaya Dorong Tak Berdimensi, C_T , dilakukan sesuai definisi parameter tersebut menurut McCormick⁽¹⁰⁾, yaitu:

$$C_T \times \frac{T}{n^2 d^4}$$

(18)

Dengan notasi:

- T : Thrust (Gaya Dorong) dalam kondisi jelajah, sebesar 5 N.
- n : Putaran Baling-Baling Per Detik, maka 6.442 RPM sama dengan 108,88 putaran per detik
- d : Diameter Baling-Baling dalam meter, maka 14 inci sama dengan 0,3556 m.

Sehingga diperoleh harga Koefisien Gaya Dorong (*Thrust*) Tak-Berdimensi, C_T sebesar $2,7503 \times 10^{-03}$.

Perhitungan koefisien Daya Tak Berdimensi, C_P , dilakukan sesuai definisi parameter tersebut⁽¹¹⁾, yaitu:

$$C_P \times \frac{P_r}{n^3 d^5}$$

(19)

Dengan P_r adalah *Required Power* (Kebutuhan Daya) dalam kondisi jelajah, sebesar 102,889 Watt. Sehingga diperoleh harga Koefisien Daya (*Power*) Tak-Berdimensi, C_P sebesar $1,1618 \times 10^{-02}$.

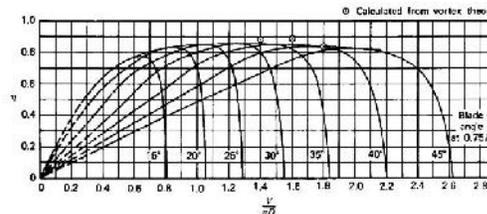
Perhitungan Rasio Advans, J , dilakukan sesuai definisi parameter tersebut⁽¹¹⁾, yaitu:

$$J \times \frac{V}{n d}$$

(20)

Dengan V , Kecepatan jelajah, sebesar 20,577 m/s. Sehingga diperoleh harga Rasio Advans, J sebesar 0,5342.

Penentuan efisiensi baling-baling, η_p , dilakukan dengan menggunakan kurva-kurva yang mengplot nilai-nilai efisiensi baling-baling, η_p , sebagai fungsi Rasio Advans, J . Grafik tersebut diperoleh dari⁽¹²⁾, sebagai berikut :



Gambar 11
Plot Efisiensi Baling-Baling terhadap Rasio Advans pada Berbagai Sudut Pitch (Sumber: Bondline⁽¹²⁾)

Untuk menggunakan plot pada Gambar 11 maka perlu dihitung sudut *pitch* baling-baling dari 6 inci menjadi besaran dalam satuan derajat. Dalam satuan inci, sudut *pitch* menyatakan pergeseran maju aliran udara pada $\frac{3}{4}$ panjang bilah dari pusat, ketika baling-baling berputar satu kali. Kondisi ini dimodelkan dengan relasi trigonometri⁽¹²⁾:

$$\tan\{(\text{degree})\} \times \frac{\{(\text{inch})\}}{\frac{3}{4} (f d)}$$

$$\times \frac{6}{\frac{3}{4} (f 14)}$$

(21)

Sehingga diperoleh konversi sudut *pitch*, φ , menjadi 10 derajat.

Karena sudut *pitch* 10° tidak terdapat dalam plot pada Gambar 11, maka, nilai efisiensi baling-baling η_p akan diekstrapolasi

dari kurva untuk sudut *pitch* 15° dan kurva untuk sudut *pitch* 20°. Ekstrapolasi dilaksanakan menurut hubungan berikut ini:

$$y_p(10) \times y_p(15) \left[\frac{10}{20} \left| \frac{Z_{15}}{Z_{15}} \right| \sum_p(20) \right] z_{y_p}(15) \quad (22)$$

Dengan metoda grafis, maka dari plot efisiensi baling-baling, y_p , untuk Rasio Advans, $J = 0,5$ di Gambar 11, didapatkan harga $y_p(15^\circ) = 0,74$ dan harga $y_p(20^\circ) = 0,68$. Substitusi harga-harga tersebut ke persamaan (22) akan menghasilkan nilai efisiensi baling-baling, y_p , sebesar 0,80.

Perhitungan Jangkauan Terbang Maksimum

Substitusi nilai-nilai dari parameter SFC_p , E_m , y_p , dan ke persamaan (1) menghasilkan jangkauan terbang sejauh 178,7 km atau 96,5 *nautical mile*. Jarak maksimum sebesar 178 km ini menggambarkan kemampuan PUNA untuk menjangkau suatu lokasi berjarak kira-kira 85 km atau 45 *nautical mile* dari lokasi *take-off*-nya, lalu melakukan pengambilan gambar atau misi lainnya, kemudian terbang kembali untuk mendarat.

KETAHANAN TERBANG PUNA BPPT

Persamaan Ketahanan Terbang Maksimum

Ketahanan Terbang (*Endurance*) adalah lamanya waktu penerbangan sebuah pesawat udara dengan sejumlah bahan bakar yang dibawa dalam sehimpunan kondisi terbang tertentu menurut Asselin³⁾.

Asselin, merumuskan persamaan Ketahanan Terbang Pesawat Udara dalam ekspresi berikut³⁾:

$$t_{Max} \times \frac{y_p E_{MP}}{SFC_p V_{MP}} \ln \frac{1}{1 - Zg} \quad (23)$$

Dengan notasi:

- t_{Max} : Ketahanan Terbang Maksimum
- E_{MP} : Rasio perbandingan C_L dan C_D ketika C_L^3/C_D^2 mencapai nilai maksimum.

Aproksimasi Praktis Perhitungan Ketahanan Terbang Maksimum

Untuk memanfaatkan Perhitungan Jangkauan Maksimum (*Range*), maka

Asselin melakukan aproksimasi sebagai berikut³⁾:

$$\frac{t_{max}}{t_{XBR}} \times \frac{E_{MP}}{E_{BR}} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{4}}} \approx 1.155 \quad (24)$$

Dengan notasi:

- t_{XBR} : Lama Terbang untuk kondisi Jangkauan Terbang Maksimum
- E_{BR} : sama dengan E_M , nilai maksimum perbandingan C_L dan C_D .

Maka ketahanan terbang diaproksimasi dengan hubungan³⁾:

$$t_{max} \approx 1.155 t_{XBR} \quad (25)$$

Sehingga dapat dijabarkan menjadi³⁾:

$$t_{max} \approx 1.155 \left| \frac{y_p E_{BR}}{SFC_p V_{BR}} \ln \frac{1}{1 - Zg} \right| \quad (26)$$

Dengan notasi:

- V_{BR} : sama dengan V_C , kecepatan jelajah PUNA BPPT untuk mencapai *maximum range*.

Substitusi nilai-nilai berikut:

- y_p , Koefisien efisiensi baling-baling sebesar, 0,8.
- E_{BR} , sama dengan E_M , sebesar 20.
- SFC_p , Konsumsi Bahan Bakar Tiap Satuan Waktu sebesar $9,759787 \times 10^{-06}$ kg/Watt.s.
- V_{BR} , sama dengan V_C , sebesar 20,577 m/s.
- Zg , Rasio berat bahan bakar sebesar 0,1033.

Ke persamaan (26) akan menghasilkan ketahanan terbang maksimum PUNA selama 2 jam 45 menit atau 2,75 jam.

KETINGGIAN TERBANG PUNA BPPT

Ketinggian Terbang Maksimum

Untuk memberi gambaran tentang ketinggian terbang maksimum PUNA BPPT, maka akan dihitung parameter *service ceiling*. *Service ceiling* adalah sebuah ukuran praktikal tentang batas atas ketinggian terbang yang menggambarkan kemampuan menanjak PUNA BPPT. *Service ceiling* didefinisikan sebagai ketinggian terbang ketika nilai *Rate of Climb* (Laju Pendakian

Terbang) berkurang menjadi 0,5 m/s atau 100 feet/minute¹¹⁾.

Harga *service ceiling* PUNA diperoleh dengan plot *Rate of Climb* pada beberapa ketinggian terbang, kemudian dilakukan ekstrapolasi untuk mendapatkan ketinggian terbang pada kondisi *Rate of Climb* bernilai 100 feet/minute¹¹⁾. Dengan demikian perlu dilakukan beberapa perhitungan berikut ini terlebih dahulu:

-) Menghitung *Rate of Climb* (*RC*) pada ketinggian terbang (*Altitude*) 0 ft, 1.000 ft dan 2.000 ft dari permukaan laut.
-) Melakukan regresi linear pada plot *RC* vs *Altitude*.
-) Menghitung ketinggian terbang ketika *Rate of Climb* bernilai 100 feet/minute.

Perhitungan Maximum Rate of Climb

Ruijgrok¹¹⁾ menghitung *Rate of Climb* dari *excess power* (kelebihan daya) yang dialami Pesawat Udara :

$$RC \times \frac{P_a - Z P_r}{W} \tag{27}$$

Dengan notasi:

- RC* : Laju Pendakian Terbang (*Rate of Climb*).
- P_a* : Daya Mesin Tersedia (*Available Power*).

Sehingga persamaan *Maximum Rate of Climb* menjadi:

$$RC_{Max} \times \frac{P_{aAlt}}{W} \times Z \sqrt{\frac{W}{S} \times \frac{2}{\rho_{Alt}} \times \frac{1}{\frac{C_L^3}{C_D^2}_{Max}}} \tag{28}$$

Dengan notasi:

- RC_{Max}* : *Maximum Rate of Climb*).
- P_{aAlt}* : Daya Mesin Tersedia (*Available Power*) pada ketinggian lokal.
- ρ_{Alt}* : Massa jenis udara lokal di ketinggian yang dihitung.

Seiring dengan bertambahnya ketinggian terbang maka daya mesin lokal, *P_{aAlt}*, dan masa jenis udara lokal, *ρ_{Alt}*, akan mengalami penurunan sehingga nilai *Maximum Rate of Climb* akan ikut menurun. Maka, dalam langkah-langkah berikut akan disajikan perhitungan daya mesin lokal, *P_{aAlt}*, masa jenis udara lokal, *ρ_{Alt}*, serta nilai maksimum

besaran tak berdimensi $\frac{C_L^3}{C_D^2}$.

Perhitungan daya mesin terhadap perubahan ketinggian, *P_a*. Rogers¹³⁾, mengaproksimasi pengaruh perubahan ketinggian terhadap daya mesin tersedia (*Power Available*) dengan asumsi hubungan linear sebagai berikut:

$$P_{aAlt} \times U \times P_{aSL} \tag{29}$$

Dengan notasi:

- : Perbandingan tekanan udara di ketinggian lokal dengan tekanan udara di permukaan laut.

- P_{aSL}* : Daya Mesin Tersedia (*Available Power*) terukur di ketinggian permukaan laut.

Nilai dapat diperoleh dari Tabel International Standard Atmosphere (ISA) dari Cavcar¹⁴⁾. Sedangkan *P_{aSL}* disamakan dengan Daya Maksimum Mesin di permukaan laut sebesar 1.250 Watt.

Perhitungan massa jenis udara lokal terhadap perubahan ketinggian, *ρ_{Alt}*. Massa jenis udara dapat diukur dari persamaan gas ideal:

$$\rho_{Alt} \times \frac{P_{Alt}}{T_{Alt}} \tag{30}$$

Dengan notasi:

- p_{Alt}* : Tekanan udara lokal.
- : Konstanta gas.
- T_{Alt}* : Temperatur Absolut Lokal.

Untuk aplikasi praktis, massa jenis udara lokal dapat dihitung dari *density ratio*:

$$\rho_{Alt} \times \rho \tag{31}$$

Dengan notasi *density ratio*, ρ_{Alt} / ρ , menyatakan perbandingan massa jenis udara di ketinggian lokal terhadap massa jenis udara di permukaan laut. Nilai *density ratio*, ρ_{Alt} / ρ , dapat diperoleh dari Ruijgrok¹¹⁾.

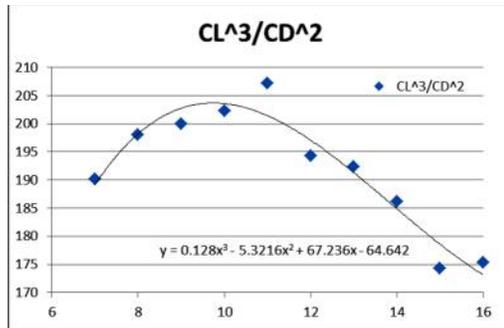
Perhitungan nilai maksimum besaran tak

berdimensi, $\frac{C_L^3}{C_D^2}$. Dari persamaan (28) terlihat bahwa upaya memaksimumkan nilai *RC_{Max}* dilakukan dengan meminimumkan suku di dalam tanda akar pada ruas kanan. Minimalisasi suku tersebut terwujud bila

besaran $\frac{C_L^3}{C_D^2}$ yang menjadi penyebut pecahan, dibuat menjadi maksimal.

Dari kurva koefisien gaya angkat PUNA BPPT, *C_L*, dan koefisien gaya hambatnya, *C_D*,

(Hasim & Madhapi⁷⁾) dapat dihitung $\frac{C_L^3}{C_D^2}$ yang ditampilkan pada grafik di Gambar 12:



Gambar 12
Kurva CL^3/CD^2 PUNA BPPT

Sehingga nilai maksimal $\frac{C_L^3}{C_D^2}$ dapat diperoleh dari regresi pada *scatter* di Gambar 12 yaitu sebesar 202.

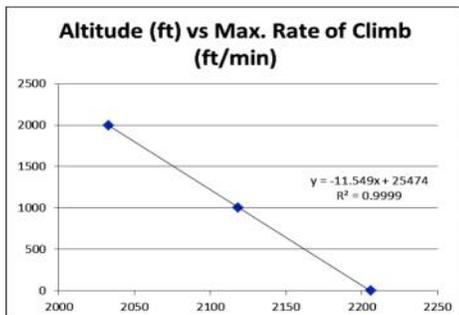
Harga Service Ceiling

Nilai *Service Ceiling* akan ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung *Maximum Rate of Climb* pada beberapa titik. Setelah diperoleh plot titik-titik tersebut, lalu dilakukan regresi untuk menentukan ketinggian dengan *Rate of Climb* maksimum sebesar 100 ft/min.

Tabel 3.
Input Perhitungan *Maximum Rate of Climb*

Altitude	PaAlt	Alt
Sea Level	1	1.225
1000 ft	0.9644	1.189
2000 ft	0.9298	1.154

Untuk mendapatkan *Maximum Rate of Climb* pada *Sea Level*, ketinggian 1000 ft dan 2000 ft, maka besaran pada Tabel 3 disubstitusikan ke persamaan (28). Hasil-hasil *Maximum Rate of Climb* tersebut ditampilkan dalam *scatter* pada Gambar 13.



Gambar 13
Grafik *Maximum Rate of Climb* PUNA BPPT

Selanjutnya, *scatter* pada Gambar 13 diregresi sehingga diperoleh persamaan yang

menghubungkan ketinggian dengan *Maximum Rate of Climb* sebagai berikut:

$$h = XZ11.549 RC_{Max} \Gamma 25474 \quad (32)$$

Dengan notasi h , menyatakan ketinggian terbang PUNA dari permukaan laut. Maka, substitusi RC_{Max} sebesar 100 ft/min menghasilkan ketinggian terbang sebesar 24.319 ft. Oleh karena itu diperoleh kesimpulan sementara bahwa ketinggian *Service Ceiling* PUNA BPPT adalah 24.000 ft. Dengan kata lain, PUNA BPPT mampu terbang hingga ketinggian 24.000 ft akibat daya maksimum mesinnya.

Tabel 4.
Waktu Mendaki dengan *Maximum Rate of Climb*

Ketinggian terbang	RoC Max (m/s)	Jam	Menit	Detik
5.000 ft	9.09	0	7	36
9.000 ft	7.60	0	25	39
10.000 ft	7.26	0	32	19
15.000 ft	5.67	1	22	53
19.000 ft	4.56	2	31	08
20.000 ft	4.30	2	53	24
24.000 ft	3.33	4	50	37

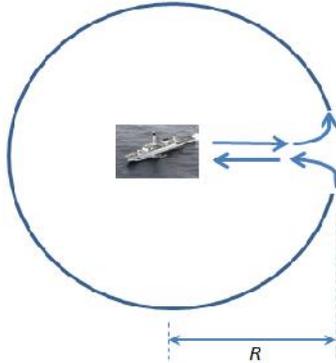
Walaupun performa pendakian PUNA BPPT mencapai ketinggian terbang hingga 24.000 ft, namun dari hasil perhitungan pada Tabel 4, ketinggian ini mampu dicapai dalam 4 jam 50 menit. Sedangkan hasil perhitungan ketahanan terbang PUNA di persamaan (26) menunjukkan ketahanan terbang maksimum PUNA adalah 2 jam 45 menit atau 2,75 jam. Dengan demikian, sekalipun PUNA BPPT diterbangkan mendaki selama 2 jam 45 menit tersebut, maka ketinggian terbang yang dapat dicapai hanyalah sebatas 19.000 ft.

Dengan batasan ketahanan terbang selama 2 jam 45 menit, dan lamanya misi setidaknya 30 menit, dan 30 menit tambahan adalah waktu jelajah PUNA dari kapal menuju lokasi misinya, maka sangat logis untuk menganggap bahwa waktu menanjak yang paling mungkin adalah separuh dari 1 jam, yaitu selama 30 menit. Dari Tabel 4, PUNA BPPT mencapai ketinggian terbang 9.000 ft dalam 25 menit, dan ketinggian 10.000 ft dicapai dalam 32 menit. Dengan demikian, diasumsikan ketinggian terbang maksimum PUNA BPPT akan dibatasi oleh bahan bakar yang dibawanya, yaitu setinggi 10.000 ft.

DISKUSI

Keunggulan penggunaan PUNA dalam misi patroli perbatasan, adalah kemampuan operasionalnya dalam misi-misi 3D yaitu *dull*,

dirty, dan *dangerous* menurut Stenger et al¹⁵⁾. *Dull* adalah sifat misi yang berlangsung lama dan juga terus-menerus, contohnya misi pengawasan. *Dirty* adalah sifat misi yang berlangsung pada daerah yang tercemar, seperti misalnya pada daerah paparan radiasi akibat penggunaan senjata nuklir atau kimia. *Dangerous* adalah sifat misi yang berlangsung pada daerah yang berbahaya bagi keselamatan awak, seperti pengintaian di garis depan peperangan.



Gambar 14
Sketsa Lintasan PUNA BPPT dalam Monitoring Sekeliling Kapal Perang

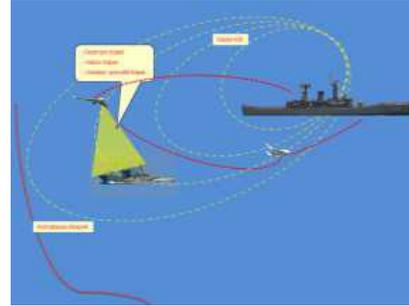
Operasi PUNA di atas kapal perang dapat mendukung pelaksanaan misi rutin dan misi khusus kapal perang tersebut. Misi rutin di sini adalah berupa patroli perbatasan dan patroli garis pantai di samping berbagai misi strategis PUNA seperti yang diuraikan oleh Austin¹⁸⁾. Untuk memberi gambaran kemampuan PUNA dalam mendukung misi kapal perang, maka diilustrasikan sebuah misi *monitoring* di sekeliling kapal seperti pada Gambar 14. Dalam misi *monitoring* ini, PUNA terbang sejauh Radius area *monitoring*, R , untuk kemudian memutar area tersebut, lalu kembali ke titik asalnya. Maka jarak yang ditempuh, X , adalah:

$$X = 2\pi R \quad (33)$$

Dengan nilai X sebesar Jarak Jangkauan Maksimum 178 km, maka diperoleh *monitoring area radius*, R , sejauh 21 km atau 11 *nautical mile*.

Oleh karena itu, PUNA BPPT dapat melakukan terbang jelajah hingga ketinggian 10.000 ft untuk mengawasi daerah di dalam radius 21 km dari titik peluncuran. Pengawasan dilakukan dengan *payload* yang dipasang pada PUNA BPPT, antara lain dapat berupa kamera beresolusi tinggi, ataupun *night vision camera*. Hasil penginderaan ini dikirimkan ke *Ground Control Station* (GCS) untuk ditampilkan dan

ditafsirkan. Setelah melakukan tugasnya, PUNA BPPT terbang kembali ke kapal, kemudian mendarat pada jaring pendarat yang telah disiapkan.



Gambar 15
Ilustrasi Operasi Rutin PUNA BPPT

Untuk misi khusus, PUNA dapat melakukan pengintaian, pengumpulan informasi baru, dan juga dilibatkan dalam operasi gabungan. Dalam melakukan misi pengintaian, PUNA diterbangkan ke arah kapal musuh atau pulau yang akan diintai. Sebagai contoh, bila terjadi perompakan dan penyanderaan, maka *payload* PUNA akan mengirimkan informasi grafis dari obyek yang diintainya. Kemudian di GCS, citra grafis ini akan ditafsirkan untuk menentukan jumlah penyandera, persenjataannya dan keadaan sandera. Sehingga hasil penafsiran ini akan menjadi informasi yang mendukung operasi pembebasan.

Pelaksanaan misi khusus semacam ini membutuhkan PUNA yang mampu terbang dalam durasi terbang yang cukup lama untuk melakukan pengumpulan informasi. Dari kemampuan PUNA BPPT untuk terbang selama 2,75 jam, sudah memadai dalam misi *reconnaissance*.



Gambar 16
Ilustrasi Operasi Khusus PUNA

Dalam melakukan misi pengumpulan informasi baru PUNA dioperasikan sebagai "mata" bagi kapal perang. Dengan *payload* berupa kamera, maka PUNA diterbangkan

hingga melewati horison. Dari informasi grafis yang dikirimkan, maka kapal perang dapat mengetahui kondisi kapal yang berada di dekatnya dengan lebih akurat.

Bila PUNA diterbangkan ke suatu titik yang telah ditetapkan, lalu kembali pulang, maka titik terjauh yang dapat dijangkau adalah 89km dari posisi awal, atau 48 *nautical mile*. Sehingga PUNA dapat diterapkan untuk mendukung operasi gabungan, terutama dalam melakukan verifikasi dari obyek yang diindera oleh radar.

SIMPULAN

Pesawat PUNA BPPT dapat dengan mudah dioperasikan dari atas kapal perang RI khususnya kapal perang berkelas fregat karena PUNA BPPT mempunyai kemampuan dapat melakukan *monitoring mission* hingga radius 21 km dari kapal perang, PUNA BPPT juga dapat menjangkau titik terjauh hingga jarak 89 km dari kapal perang tempat ia diluncurkan, PUNA BPPT mampu terbang hingga ketinggian maksimum operasional setinggi 10.000 ft.

Maka pesawat PUNA BPPT dapat digunakan untuk membantu misi rutin dan misi khusus kapal perang TNI AL, termasuk mengawasi pulau-pulau terluar Indonesia. Hal ini akan memupuk kepedulian seluruh komponen bangsa terhadap pulau-pulau kecil yang menjadi batas terluar wilayah NKRI²⁰.

SARAN

Penelitian ini dapat diteruskan dengan menambahkan pengaruh cuaca dalam simulasi pengoperasian PUNA BPPT. Dengan bervariasinya kecepatan angin, serta arahnya, dan juga gelombang, maka faktor cuaca perlu diperhitungkan dalam analisa lanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dislitbang TNI-AL atas dukungannya dalam penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pregiwati, L. A., *Potensi Sektor Kelautan Indonesia Menjanjikan*, Siaran Pers KKP, <http://kkp.go.id/index.php/pers/potensi-sektor-kelautanindonesia-menjanjikan/>, Jakarta, 2015

2. Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, *Buku Putih Pertahanan Indonesia 2015*, Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, Jakarta, <https://www.kemhan.go.id/wp-content/uploads/2016/04/BPPI-INDO-2015.pdf>, 2015
3. Asselin, M., *An Introduction to Aircraft Performance*, AIAA Education Series, AIAA Inc., Vancouver USA, 1997.
4. Budiarti, D.H., Djatmiko dan Dahsyat, M., *Technical Report No. 012/FT/6.1/PUNA/XI/2013, Laporan Pengujian PUNA BPPT-04C Sriti Eksperimental Flight No. 02 Test Subject: "Parameter Identification"*, Tertanggal 01 November, Dok. Intern. PTIPK-BPPT, Jakarta, 2013.
5. Budiarti, D.H., Djatmiko dan Dahsyat, M., *Technical Report No. 001/FT/6.1/PUNA/IV/2013, Laporan Pengujian PUNA BPPT-04C Sriti Eksperimental Flight No. 04-05 Test Subject: "New Engine Assessment"*, Tertanggal 25-26 April, Dok. Intern. PTIPK-BPPT, Jakarta, 2013.
6. Sururi, E dan Waluyo, B., *Kaji Eksperimen: Perbandingan Penggunaan Bahan Bakar Premium dan Pertamina terhadap Unjuk Kerja Mesin pada Sepeda Motor Suzuki Thunder Tipe EN-125*, <http://oto.teknik.ummgl.ac.id/wp-content/uploads/2013/06/KAJI-Eksperimen-Perbandingan-Penggunaan-Bahan-Bakar-Premium-Dan-Pertamax-Terhadap-Unjuk-Kerja-Mesin.pdf>, diakses 2015.
7. Hasim, F., dan Madhapi, *Program Document No. 021.2.F1.133, Laporan Akhir Kegiatan Program Riset Insentif PKPP .Pengembangan Konfigurasi Aerodinamika Pesawat udara Nir-Awak (PUNA-BPPT) Prototipe Sriti untuk Peningkatan Jarak Jelajah dan Daya Tahan Terbang*, Dok. Intern. LAGG-BPPT, Banten, 2012.
8. http://www.epi-eng.com/propeller_technology/selecting_a_propeller.htm, *Propeller Performance Factors: Basic Information to Help Selecting the Correct Propeller*, diakses Agustus 2015.
9. Staples, G., *Propeller Static & Dynamic Thrust Calculation*, <http://electricaircraftguy.blogspot.com/2013/09/propeller-static-dynamic-thrust-equation.html>, diakses Agustus 2015.
10. McCormick, B. W., *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics*, John-Wiley and Sons, New York, 1979.

11. Ruijgrok, G. J. J., *Elements of Airplane Performance*, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1994.
12. http://bondline.org/wiki/Basic_Engine_and_Propeller_Performance, 2008, diakses Agustus 2015.
13. Rogers, D. F., *Altitude Effects (Part 1)*, http://www.nar-associates.com/technical-flying/altitude/part1/altitude_part1_wide_screen.pdf, diakses Agustus 2015.
14. Cavcar, M., *The International Standard Atmosphere (ISA)*, <http://home.anadolu.edu.tr/~mcavcar/ISAweb.pdf>, diakses Agustus 2015.
15. Stenger, A., Fernando, B., & Heni, M., 2012, *Autonomous Mission Planning for UAVs: A Cognitive Approach*, SILVER ATENA Electronic Systems Engineering GmbH, Munich, Germany.
16. US National Research Council, *Autonomous Vehcles in Support of Naval Operations*, US National Academy of Sciences, 2005. Washington D.C., USA.
17. Jane, F. T. & Sharpe, Capt. R. OBE RN (editor). 1997. *Jane's Fighting Ships 1997-98*, 100th ed., Thomson Publishing.
18. Austin, R. *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*, John Wiley & Sons, London, UK, 2010
19. [http://id.wikipedia.org/wiki/KRI_Ahmad_Yani_\(351\)](http://id.wikipedia.org/wiki/KRI_Ahmad_Yani_(351)), diakses Oktober 2017
20. Sondakh, B.K., Peran TNI AL dalam Pengamanan dan Pemberdayaan Pulau Terluar RI, *Jurnal Hukum dan Pembangunan*, Vol.33, No.1, 2003.
21. Franklin, J. A., *Dynamics, Control, and Flying Qualities of V/STOL Aircraft*, AIAA Inc., Reston Virginia, USA, 2002.
22. DSF World Bank. *Rencana Strategis Pulau Sulawesi: Pembangunan Kapasitas untuk Perumusan Kebijakan Pembangunan Daerah (Tahap II)*, Decentralization Support Facility, Jakarta, Indonesia, 2011.

ANALISIS PEMBEBANAN STATIK PADA RANGKA BOGIE AUTOMATIC PEOPLE MOVER SYSTEM (APMS) MENGGUNAKAN STANDAR UIC-615 DENGAN FINITE ELEMENT

ANALYSIS OF STATIC LOADING ON BOGIE FRAME AUTOMATIC PEOPLE MOVER SYSTEM (APMS) USING UIC-615 STANDARD WITH FINITE ELEMENT

Setyo Margo Utomo, Jean Mario Valentino, Beny Halfina, Hendrato

Pusat Teknologi Sistem dan Prasarana Transportasi, Badan Pengkajian dan Penerapan
Teknologi, Gedung Teknologi II, Lt.3, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Banten.
Telp: 021-75875943 ext 1122, fax: 021-75875946

setyo.margo@bppt.go.id, jean.mario@bppt.go.id, beny.halfina@bppt.go.id, hendrato@bppt.go.id

Abstrak

Bogie merupakan suatu kesatuan konstruksi yang mendukung sarana kereta api monorel saat berjalan diatas track. Rangka bogie merupakan konstruksi untuk mendukung carbody terhadap pembebanan. Tujuan dari analisis ini adalah menentukan dan memastikan batas kekuatan statik rangka bogie secara numerik sebelum prototype rangka bogie melalui proses pengujian statik atau tahap verifikasi desain. Tahapan dalam penelitian ini adalah pengumpulan data dan gambar bogie APMS dari PT.INKA Madiun, kemudian dilakukan identifikasi struktur model 3D CAD bogie, dilanjutkan penentuan boundary conditions untuk pembebanan statik dan simulasi pembebanannya. Berdasarkan standar UIC-615 hanya ada dua jenis beban yaitu vertikal dan transversal, dengan nilai maksimumnya adalah 53.234 N dan 48.619 N. Hasil simulasi pengujian statik untuk beban luar biasa (Static test with exceptional load), terjadi deformasi terbesar 0,5 mm pada bagian balanced wheel, dan tegangan maksimal sebesar 175,97 MPa yang terletak pada tumpuan anti roll bar, dikarenakan transverse load yang terjadi pada tumpuan anti roll bar tersebut cukup besar. Nilai safety factor yang terjadi pada area anti roll bar tersebut cukup rendah, yaitu 1,39. Hasil simulasi pengujian statik untuk beban kerja (Static test to simulate the main in-service load) didapat nilai safety factor terendah 2,39 dengan nilai tegangan maksimal sebesar 102,26 MPa dan deformasi sebesar 0,339 mm pada saat load case 8.

Kata kunci : Rangka bogie, standar UIC-615, beban statik

Abstract

Bogie is a unity that supports the construction of railway facilities monorail when running on the track. Bogie frame is a construction to support the carbody against imposition. The purpose of this analysis is to determine and ascertain the limits static strength numerical order before the prototype bogie frame through static testing or verification stage design. Stages in this research is the collection of data and bogie drawing APMS of PT.INKA Madiun, and then to identify the 3D CAD model of the structure of the bogie frame, then conducted to determine the boundary conditions for the imposition of simulated static load. Base on standard UIC-615 there are only two types of load that is vertical and transversal, the maximum value is 53 234 and 48 619 N. Result of static testing for static tests with exceptional load, the greatest deformation of 0.5 mm occurs on the balanced wheel, and a maximum stress of 175,97 MPa which lies in the foundation of anti-roll bar, due to transverse load occurring on the pedestal of the anti-roll bar is

quite large. Safety factor value that occurs in the area of anti-roll bar is quite low, 1,39. The simulation results for the static testing workload (Static test to Simulate the main in-service load) obtained value of the lowest safety factor of 2.39 with a maximum stress value of 102.26 MPa and deformation of 0,339 mm at the time of load case 8.

Key word: Bogie Frame, UIC-615 Standard, Static Load

Diterima (received) : 15 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 10 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 1 Agustus 2017

LATAR BELAKANG

Menurut *American Society of Civil Engineer (ASCE)*, definisi APMS adalah sebuah *guided transit mode* dengan pengoperasian otomatis penuh yang dioperasikan pada jalur yang eksklusif (tidak bercampur dengan moda yang lain)¹. Pada umumnya APMS ini digunakan di bandara sebagai sarana transportasi penumpang di bandara yang menghubungkan antar terminal. Tipe-tipe dari APMS adalah *Cable*, *Monorel*, *Automated Guideway Transit (AGT)*, *Maglev* dan *Personal Rapid Transit (PRT)*.

APMS produksi PT.INKA pada dasarnya berbasis kereta monorel, yang dikembangkan dengan mengadopsi teknologi dan desain terbaru, namun desain *bogie* APMS tersebut masih perlu diverifikasi, untuk memastikan keamanan *bogie* dan kemampuan menahan beban kerja standar maupun beban *crush load*.

Tujuan dari analisis struktur menggunakan *finite element* adalah untuk menentukan dan memastikan batas kekuatan rangka *bogie*, agar memenuhi syarat sebelum melalui proses pengujian, atau yang umum disebut dengan tahap verifikasi desain. Analisis secara statik merepresentasikan perilaku struktur rangka *bogie* ketika dalam beberapa kondisi, yaitu *cruise*, *side wind*, *braking* dan *manuver*, dimana terjadi pembebanan maksimal dalam waktu cepat pada struktur rangka *bogie* dari beban arah vertikal, beban arah lateral maupun beban arah longitudinal, sehingga dapat diketahui area kritis akibat regangan/tegangan maksimum dan defleksi yang terjadi pada struktur *bogie*. Hasil dari analisis statik ini dapat dipergunakan sebagai referensi peletakan *strain gauge* ketika dilakukan pengujian statik prototipe *bogie* APMS.

TINJAUAN PUSTAKA

Monorel

Definisi monorel menurut Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor: PM. 37 Tahun 2014 Tentang Standar Spesifikasi Teknis Sarana Kereta Api Monorel², adalah kereta dengan penggerak sendiri yang berjalan pada 1 (satu) rel dengan menggunakan sumber tenaga listrik dari luar dan/atau dari dalam sebagai penggerak dan dapat dioperasikan dengan/atau tanpa awak sarana perkeretaapian.

Sarana kereta monorel dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *straddle* monorel, merupakan sarana kereta api monorel yang berjalan diatas jalan rel dan *suspended* monorel, merupakan sarana kereta api monorel yang berjalan menggantung pada jalan rel. Sarana kereta api monorel terdiri dari badan kereta dan *bogie*. *Bogie* merupakan suatu kesatuan konstruksi yang mendukung sarana kereta api monorel saat berjalan diatas rel lengkung atau lurus untuk kestabilan dan kenyamanan. Rangka *bogie* merupakan konstruksi yang dirancang untuk mendukung badan terhadap pembebanan.

Rangka harus memenuhi persyaratan yaitu memiliki kekuatan serta kekakuan tinggi terhadap pembebanan vertikal, lateral dan longitudinal tanpa terjadi deformasi tetap dan tidak terjadi cacat (retak) pada titik kritis akibat pembebanan.

Analisis Statik

Hal yang terpenting dalam tahapan disain suatu komponen mekanik adalah pengetahuan tentang beban yang bekerja pada komponen mekanik tersebut. Syarat utama untuk melakukan analisis gaya adalah benda pada bidang atau ruang yang akan dianalisis harus dalam keadaan setimbang statik, sehingga resultan gaya dan momen yang bekerja pada benda tegar itu adalah nol [3]. Persamaan umum untuk kesetimbangan statik benda tegar dapat dinyatakan dengan:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

Jika $\sum F = 0$ diuraikan dalam arah sumbu x, y dan z diperoleh:

$$\sum F_x = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (5)$$

F_x adalah komponen gaya dalam arah sumbu x, F_y adalah komponen gaya dalam arah sumbu y dan F_z adalah komponen gaya dalam arah sumbu z.

Finite Element Analysis

Konsep dasar finite element analysis adalah mendiskretisasi atau membagi suatu struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang jumlahnya berhingga, kemudian melakukan analisis gabungan terhadap elemen-elemen kecil tersebut. Nilai pendekatan numerik diperoleh melalui bantuan komputer, sehingga finite element analysis bersifat computer oriented⁴⁾.

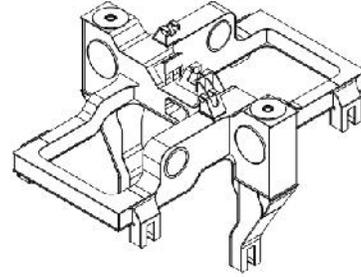
Tahap-tahap dasar dalam finite element analysis adalah pre-processing, yaitu melakukan diskretisasi model menjadi elemen-elemen hingga, dalam bentuk nodal-nodal dan elemen-elemen. Selanjutnya menggabungkan elemen-elemen lokal menjadi solusi global, dan membentuk matriks kekakuan global sekaligus mengaplikasikan kondisi batas, kondisi awal, dan beban-beban yang terjadi.

Tahap kedua adalah processing atau solving, dimana komputer menyelesaikan sejumlah perhitungan aljabar linier atau non linier sesuai kondisi yang diterapkan pada tahap pre-processing. Kemudian tahap terakhir adalah post processing, yaitu mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil perhitungan yang berupa gambar, kurva atau animasi.

METODOLOGI

Tahap pertama untuk melakukan analisa beban statik pada rangka bogie, mempersiapkan model solid 3D CAD bogie beserta assembly dan melakukan validasi terhadap model struktur bogie. Kualitas sebuah model dianggap valid jika tidak ada tumpang tindih komponen (*zero interference*) dan sambungan-sambungannya terdefinisi secara sempurna (*fully defined*).

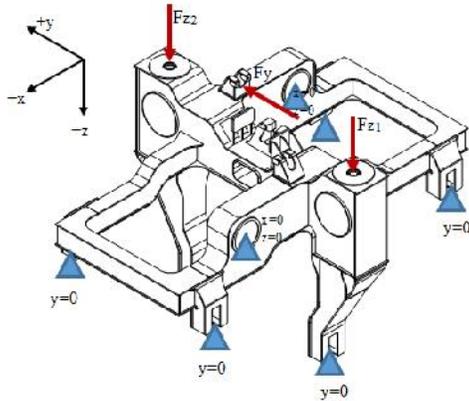
Apabila validasi kualitas model belum terpenuhi, maka dilakukan editing terlebih dahulu terhadap model CAD agar supaya tidak terjadi interference dan assembly terdefinisi dengan sempurna. Model CAD yang digunakan untuk analisis hanya berupa struktur rangka utama, tanpa dilengkapi sistem roda, propulsi dan suspensi⁵⁾.



Gambar 1.
Model Rangka Utama Bogie yang Sudah Disederhanakan

Selain melakukan validasi model, dilakukan pula penyederhanaan model CAD (Gambar 1) agar model kompatibel untuk perhitungan elemen hingga dan agar supaya proses komputasi tidak terlalu berat. Efek dari penyederhanaan model adalah terjadi perbedaan hasil perhitungan bila dibandingkan dengan model aslinya, karena itu sebelum penyederhanaan model dilakukan, perlu dipastikan bahwa tidak ada area kritis pada model. Apabila dijumpai adanya area kritis, maka model perlu dianalisa ulang tanpa dilakukan penyederhanaan. Penyederhanaan yang dilakukan adalah penghilangan lubang-lubang baut untuk menghilangkan konsentrasi tegangan ketika dilakukan mesh.

Tahap selanjutnya adalah menentukan definisi kondisi batas (*boundary condition*) pada model CAD (Gambar 2), yaitu jenis tumpuan yang digunakan dan menentukan degree of freedom berupa translasi atau rotasi pada arah sumbu simetri sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Bogie ditumpu pada kedua roda utama yaitu roda yang berfungsi sebagai penahan beban arah vertikal (fix sumbu z) dan penggerak kereta arah longitudinal (fix sumbu x), dan enam roda samping yang berfungsi sebagai tumpuan arah lateral (fix sumbu y).



Gambar 2.
Beban Pada Rangka Bogie

Metode perhitungan pembebanan statik berdasarkan standar internasional UIC 615-4 tentang *Motive Power Unit – Bogies and Running Gear – Bogie Frame Structure Strength Test*. Standar ini menjelaskan tentang technical approval untuk motor bogie, yaitu performa rig test untuk verifikasi kemampuan bogie untuk menahan beban kerja⁶⁾. Standar ini dibedakan menjadi:

- 1) *Static test with exceptional load* (Pengujian statik untuk beban yg luar biasa). Pengujian ini untuk melakukan verifikasi bahwa tidak ada resiko deformasi permanen pada bogie ketika dikenakan beban kerja maksimum.
- 2) *Static test to simulate the main in-service load* (Pengujian statik untuk beban kerja). Pengujian ini untuk melakukan verifikasi bahwa tidak ada resiko crack akibat beban kerja, seperti beban vertikal dan beban lateral; dan efek track twist.
- 3) *Static test to simulate particular in-service load* (Pengujian statik untuk beban tertentu). Simulasi ini untuk memastikan bahwa tidak ada resiko lokal crack akibat stress yang berulang-ulang pada komponen bogie seperti motor, rem, suspensi, anti-roll bar, termasuk dari beban akibat melewati radius track yang kecil.

Berdasarkan data dari PT.INKA, material yang digunakan untuk seluruh rangka bogie adalah SM490A (JIS G3106)7). Baja SM 490 A adalah baja rol yang bisa digunakan dalam struktur-struktur engineering, khususnya pada struktur yang dilas. SM 490A memiliki kesetaraan dalam klasifikasi JIS G3106 standard dan ASTM A 572. Ketebalan pelat SM 490A dari pabrik bervariasi mulai dari 6 mm sampai dengan 300 mm dengan sifat mekanis material sebagai berikut :

Modulus young	: 210 GPa
Elongation	: 17%
Yield strength	: 325 MPa
Ultimate tensile strength:	490 MPa
Poisson Ratio	: 0,3
Density	: 7800 kg/m ³

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi statik untuk bogie APMS ini mengikuti metode pengujian sesuai UIC 615-4, namun dilakukan secara numerik menggunakan *finite element analysis*. Berikut adalah notasi dan definisi beban pada UIC 615:

n_b	= number of bogies
n_e	= number of wheelset per bogie
m^+ (kg)	= bogie weight
mv (kg)	= empty weight of vehicle

Pengujian ini ditujukan untuk *passanger carrying vehicles*, yang dihitung berdasarkan UIC 566.

- C_1 : 1 passanger of 80 kg per seat
4 passanger per m² in the corridors
300 kg per m² in the luggage compartement
- C_2 : 1 passanger of 80 kg per seat
2 passanger per m² in the corridors
300 kg per m² in the luggage compartement

Static test with exceptional load

Definisi beban menurut UIC 615-4 untuk *Static Tes with Exceptional Load*(Pengujian statik untuk beban yg luar biasa):

- *Vertical test load per bogie:*

$$F_{z1max}(N) = F_{z2max}(N) - \frac{L_4g}{2n_b} (m_v + C_1 - n_b m^+) \quad (6)$$

- *Transverse test load per bogie:*

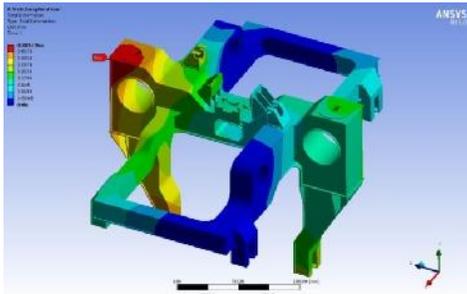
$$F_{ymax} = 2 \left[10^4 + \frac{(m_v - C_1)g}{3n_e n_b} \right] \quad (7)$$

Tabel 1
Perhitungan *Static test with exceptional load*

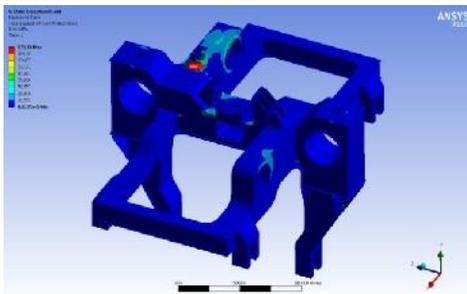
Notasi	Definisi	Value
nb	number of bogies	4
ne	num. of wheelset per bogie	2
m+	bogie weight (kg)	1000
mv	empty weight vehicle (kg)	12000
c1	80 kg per seat	3200
	4 pax per m2	10224
	300 kg per m2	9585
c2	total C1	23009
	80 kg per seat	3200
	2 pax per m2	5112
c2	300 kg per m2	9585
	Total C2	17897
Fz1	Vertical load 1 (N)	53234.7
Fz2	Vertical load 2 (N)	53234.7
Fy max	Transverse load (N)	48619.86

Sumber Data : Hasil Olahan Data Penelitian

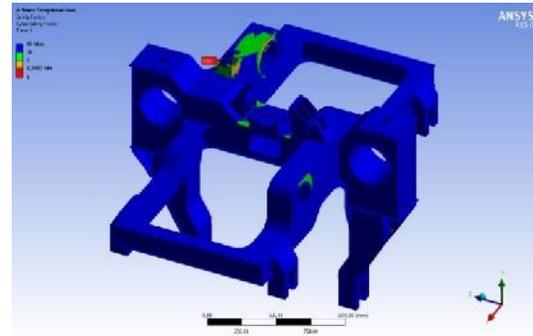
Dari tabel 1 diatas, didapatkan nilai F_{z1} , F_{z2} dan F_y max untuk digunakan sebagai nilai beban yang terjadi pada bogie. Beban F_{z1} dan F_{z2} (vertical load) terletak pada *air suspension plate* dan F_y max (transverse load) terletak pada *anti roll bar*. Berikut adalah hasil simulasi menggunakan ANSYS:



Gambar 3.
Hasil Solusi Deformasi with Exceptional Load.



Gambar 4.
Hasil Solusi von Mises Stress with Exceptional Load



Gambar 5.
Hasil Solusi Safety Factor with Exceptional Load

Gambar 3 adalah deformasi sebesar 0,5 mm pada *static test with exceptional load*, yaitu ketika dikenakan beban kerja maksimum. Deformasi yang terjadi pada bagian *balanced wheel*. Dari pembebanan diatas, didapatkan hasil simulasi von *mises stress* maksimal sebesar 175,97 MPa yang terletak pada tumpuan anti *roll bar* seperti pada gambar 4, hal ini dikarenakan karena *transverse load* yang terjadi pada tumpuan anti *roll bar* tersebut cukup besar. Dikarenakan *stress* yang terjadi cukup tinggi, maka nilai *safety factor* yang terjadi pada area *anti roll bar* tersebut cukup rendah, yaitu 1,39 (gambar 5).

Static test to simulate the main in-service load

Definisi beban kerja menurut UIC 615-4 untuk *Static test to simulate the main in-service load*(Penguji statik untuk beban kerja):

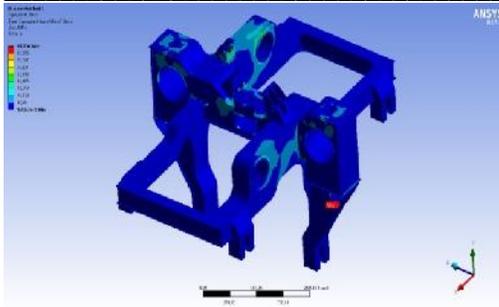
- Vertical test load per bogie:

$$F_z(N) = \frac{g}{2150} (m_v + 1,2C_2 - n_2 m^+)$$
 (8)

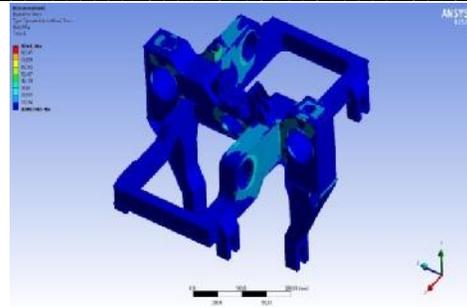
- Transverse test load per bogie:

$$F_y(N) = 0,5(F_z + 0,5m^+ g)$$
 (9)

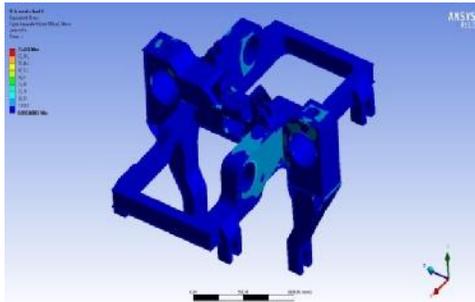
Pada penguji statik ini, terdapat 9 variasi penguji (load case). Variasi dinamis gaya vertikal karena gerakan vertikal (*bouncing*) pada badan kereta, direpresentasikan oleh persentase pada gaya vertikal F_z . Sedangkan variasi dinamis gaya vertikal karena gerakan *rolling* pada badan kereta, direpresentasikan oleh persentase pada gaya vertikal F_z . Untuk pengoperasian pada kondisi normal di *European Railways*, didapatkan:



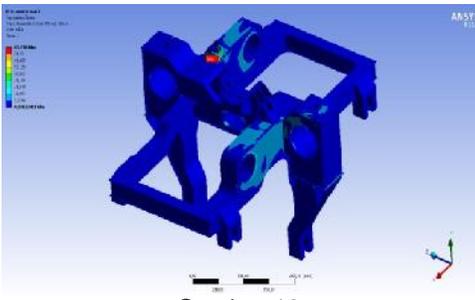
Gambar 10.
Hasil Solusi von Mises Stress with Main in-service Load Case 5



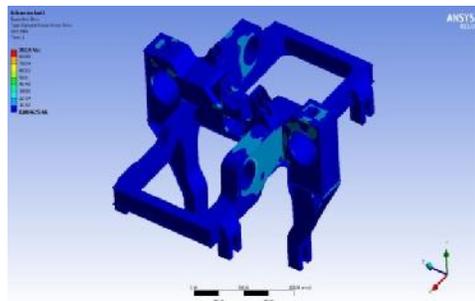
Gambar 14.
Hasil Solusi von Mises Stress with Main in-service Load Case 9



Gambar 11.
Hasil Solusi von Mises Stress with Main in-service Load Case 6



Gambar 12.
Hasil Solusi von Mises Stress with Main in-service Load Case 7



Gambar 13.
Hasil Solusi von Mises Stress with Main in-service Load Case 8

Tabel berikut adalah rangkuman 9 load case, yaitu deformasi, von mises stress dan safety factor.

Tabel 4.
Rangkuman Hasil Simulasi Main in-service Load.

Load Case	Deformation (mm)	von Mises Stress (MPa)	Safety Factor
1	0,256	77,438	3,16
2	0,237	63,456	3,86
3	0,283	88,193	2,77
4	0,339	91,047	2,69
5	0,37	93,236	2,62
6	0,236	71,281	3,43
7	0,262	85,738	2,85
8	0,338	102,26	2,39
9	0,364	92,641	2,64

Dari tabel 4 diatas, bisa dicari nilai tegangan rata-rata, amplitudo tegangan, range tegangan dan rasio tegangan menggunakan formula dibawah ini:

$$\text{Stress range : } \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (10)$$

$$\text{Stress amplitude: } \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (11)$$

$$\text{Mean stress: } \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (12)$$

$$\text{Stress ratio: } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (13)$$

Hasil dari perhitungan diatas ditampilkan seperti pada tabel 5 berikut:

Tabel 5.
Hasil Perhitungan Tegangan rata-rata

Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Mean Stress (MPa)	Stress Ratio R (MPa)
38,804	19,402	82,858	0,620

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (14)$$

SIMPULAN

Berdasarkan analisis pembebanan pada standar UIC 615, terdapat dua beban utama yang diterima rangka *bogie*, yaitu beban vertikal dan transversal, dengan masing-masing nilai maksimumnya sebesar 53.234 N dan 48.619 N.

Hasil simulasi pengujian statik untuk beban yang luar biasa (*Static test with exceptional load*), terjadi deformasi terbesar 0,5 mm yang terjadi pada bagian *balanced wheel*, dan tegangan maksimum sebesar 175,97 MPa yang terletak pada tumpuan *anti roll bar*, dikarenakan *transverse load* yang terjadi pada tumpuan *anti roll bar* tersebut cukup besar. Nilai *safety factor* yang terjadi pada area *anti roll bar* tersebut cukup rendah, yaitu sebesar 1,39.

Hasil simulasi pengujian statik untuk beban kerja (*Static test to simulate the main in-service load*) didapat nilai *safety factor* terendah 2,39 dengan nilai tegangan maksimum sebesar 102,26 MPa dan deformasi sebesar 0,339 mm pada saat *load case 8*.

Secara umum rangka *bogie* APMS dinyatakan aman menggunakan perhitungan *finite element*, karena *stress* yang terjadi masih dibawah nilai *yield* material, namun masih perlu divalidasi lebih lanjut dengan menggunakan pengujian statik pada *prototipe* yang sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. *Automated People Mover Standards-Part 1*, 2006, American Society of Civil Engineers (ASCE).
2. Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor: PM. 37 Tahun 2014 Tentang Standar Spesifikasi Teknis Sarana Kereta Api Monorel.
3. Budynas, Richard G., *Shigley's Mechanical Engineering Design (9th ed.)*. McGraw Hill: USA, 2011.
4. Moaveni, Saeed., *Finite Element Analysis : Theory and Application with ANSYS*. Pearson Prentice Hall: USA, 2008.
5. Dokumen Resmi Gambar Teknik dan Spesifikasi Teknis *Automatic People Mover* PT.INKA.
6. UIC Code 615, *Motive Power Units-Bogie and Running Gear-Bogie Frame Structure Strength Test, 2nd Edition*, Februari 2003.
7. Krauss, George., *Steels: Processing, Structure, and Performance*. ASM International: USA, 2005.
8. *ANSYS Workbench User's Guide Release 15*, 2013.
9. Liliana, Rusu-Casandra, et.al, *Stresses in a Bogie Frame of a Rail Carriage*. *Procedia Engineering*, Volume 100, 2015, pp 482-487.
10. Kassner, M., *Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods*. *International Journal of Fatigue*, Volume 34, Issue 1, 2012

ANODA Pb DAN GEL ELEKTROLIT UNTUK PROPULSI KAPAL SELAM

Pb ANODE AND GEL ELECTROLYTE FOR SUB MARINE PROPULSION

Hens Saputra, Murbantan T., Abdul Ghofar, M. Rosjidi, M. Ismail, Dorit B. Islami
Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Jl. M.H. Thamrin 8 Jakarta Indonesia 10340
e-mail: hens.saputra@bppt.go.id

Abstrak

Baterai merupakan komponen paling penting dalam sistem energi kapal selam. Hingga saat ini mayoritas kapal selam masih mengandalkan baterai jenis lead acid sebagai sumber energinya termasuk untuk propulsi karena pertimbangan faktor keamanan yang lebih baik untuk jenis baterai dengan kapasitas sangat besar, yaitu sekitar 10.000-15.000 Ah. Kendala yang terjadi untuk baterai yang menggunakan elektrolit berupa cairan antara lain timbulnya gas hidrogen pada waktu charging. Hal ini dapat mengakibatkan baterai menjadi kering dan performanya menurun. Selain itu gas hidrogen yang berlebihan dapat membahayakan kapal selam itu sendiri. Pada penelitian ini dilakukan proses pembuatan anoda dan elektrolit berupa gel yang dapat mengurangi terjadinya penguapan elektrolit sertaantisipasi terjadinya tumpahan elektrolit pada waktu kapal selam melakukan manuver. Sebagai elektrolit digunakan bahan berupa nanoporus anorganik MCM-41 yang dibuat dengan cara hidrotermal menggunakan Tetraethylortosilicate (TEOS) sebagai sumber silika, template organik Cethyltrimethylammonium bromide (CTAB) dan katalis H_2SO_4 . Baterai gel lead acid MCM-41 dapat menghasilkan OCV sekitar 2,1 V.

Kata kunci : anoda, lead acid, baterai kapal selam, gel MCM-41, Hexagonally-ordered nanopores

Abstract

Battery is the most important component in the sub marine energy system. Up to now, majority of the sub marine are still using lead acid battery as the power source or propulsion, due to moresafe in application as very high capacity of single cell (i.e. 10.000 – 15.000 Ah). The drawbacks of aqueous based battery, which utilize liquid electrolyte, are because of having produced the hydrogen gas during charging process, in which it caused the electrolyte solution to become dry and reduced the performance of battery. In addition, that the hydrogen gas generated in the sub marine was dangerous. Therefore, the aim of this research is how to reduce or eliminate of those drawbacks by modifying kind of the liquid electrolyte by using gel electrolyte. The gel electrolyte was synthesized to reduce the evaporation of electrolyte and to avoid the leaking when submarine maneuver. The gel electrolyte was made by using inorganic nanoporous MCM-41. It was synthesized by hydrothermal method, using Tetraethylortosilicate (TEOS) as silica sources, Cethyltrimethylammonium bromide (CTAB) as organic template and H_2SO_4 as catalyst. The MCM-41 lead acid battery gave a result of OCV ca. 2,1 V.

Keywords : anode, lead acid, submarine battery, MCM-41gel, Hexagonally-ordered nanopores

Diterima (*received*) : 13 Juni 2017, Direvisi (*reviewed*) : 8 Juli 2017, Disetujui (*accepted*) : 30 Juli 2017

PENDAHULUAN

Salah satu komponen yang sangat vital dalam kapal selam adalah baterai¹⁾. Dalam perkembangannya ada jenis kapal selam canggih yang menggunakan nuklir walaupun menimbulkan kontroversi tentang keamanan dan faktor keselamatan lingkungan terhadap limbah nuklir.

Baterai secara umum terdiri dari 3 komponen utama yang harus ada, yaitu anoda, katoda dan elektrolit. Anoda merupakan elektroda negatif atau sebagai donor elektron pada proses oksidasi melalui reaksi elektrokimia. Katoda merupakan elektroda positif yang mengalami reaksi reduksi pada reaksi elektrokimia. Komponen ketiga yang sangat penting adalah elektrolit yang bersifat konduktor ionik²⁾.

Jenis baterai dan material anoda dapat mempengaruhi kapasitas dan karakteristik baterai yang dihasilkan. Energy density baterai lead acid paling rendah yaitu sekitar 0,115 MJ/Kg dibandingkan dengan jenis baterai lainnya seperti NiCd 0,134 MJ/Kg, NiMH 0, 171 MJ/Kg, Li-ion 0,292 MJ/Kg.²⁻³⁾ Walaupun baterai lead acid memiliki energy density yang rendah, tetapi masih dapat diterima oleh konsumen karena adanya beberapa keunggulan lain, yaitu lebih aman untuk diproduksi sebagai baterai dengan kapasitas yang sangat besar seperti baterai kapal selam yang membutuhkan baterai 10.000 hingga 15.000 Ah/sel.¹⁾ Selain itu relatif lebih aman terhadap resiko over charging dan temperatur. Energi density yang rendah tersebut dapat dijadikan sebagai nilai tambah apabila diaplikasikan pada kapal selam yang membutuhkan pemberat untuk menyelam dan stabil berada pada kedalaman tertentu.

Sejak ditemukannya struktur heksagonal MCM-41 yang sangat fantastik pada tahun 1992 oleh peneliti dari Mobil Oil Amerika Serikat⁴⁻⁵⁾, perkembangan aplikasinya sangat banyak. Karakteristik material tersebut sangat unik, antara lain memiliki luas permukaan sekitar 1000 m²/g dan volume pori sekitar 1 cm³/g dengan distribusi ukuran pori yang sempit⁴⁻⁷⁾ yang menunjukkan sangat homogen. Berdasarkan penelitian sebelumnya diketahui bahwa dalam kondisi alkalin, material MCM-41 berubah menjadi gel⁵⁾. Begitu juga pada kondisi asam.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan dan karakterisasi anoda Pb dan elektrolit gel MCM-41 serta pengujian sebagai sel elektrokimia. Karakterisasi material menggunakan XRD untuk mempelajari struktur gel MCM-41 dan anoda Pb. Dilakukan pula analisis porositas gel MCM-41 serta karakteristik mekanik yang merupakan informasi penting apabila diaplikasikan pada baterai kapal selam. Dilakukan pula uji open circuit voltage (OCV).

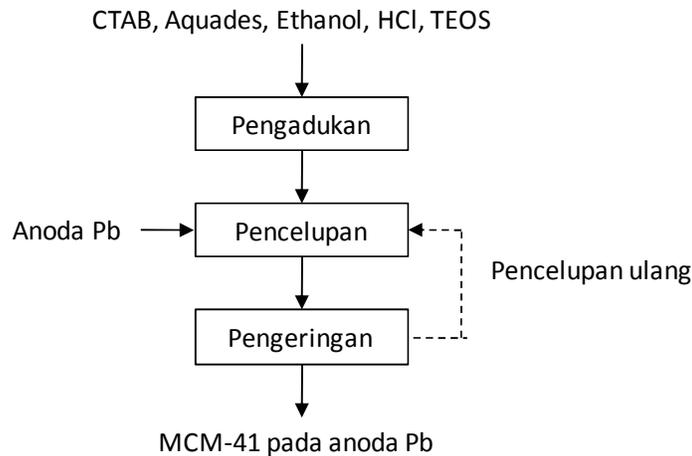
BAHAN DAN METODE

Pembuatan Anoda Pb

Anoda Pb dapat dibuat dengan menggunakan metode elektrodeposisi⁸⁻⁹⁾ untuk mendapatkan kemurnian yang tinggi dan luas permukaan yang lebih baik. Salah satu kekurangan dari pelat Pb biasa adalah densitas dan luas permukaan. Larutan elektrolit yang digunakan adalah asam sulfat. Sebagai substrat digunakan pelat tembaga dengan luas¹⁰⁾. Arus yang digunakan pada proses elektrodeposisi adalah sekitar 100 mA/cm². Elektrodeposisi dilakukan selama 3 jam.

Pembuatan Elektrolit Gel MCM-41

Membran MCM-41 yang digunakan sebagai separator sekaligus menjadi elektrolit berbentuk gel yang memisahkan antara anoda dan katoda. Nanoporus MCM-41 bersifat hidrofilik, sehingga dapat berperan sebagai elektrolit karena kemampuannya menyerap larutan elektrolit. Membran MCM-41 pada anoda Pb dibuat dengan cara dip coating^{5,11)}. Larutan induk yang digunakan untuk membuat membran MCM-41 adalah terdiri dari surfaktan cethyltrimethyl-ammonium bromide C₁₆H₃₃(CH₃)₃NBr (C16TAB) yang berperan sebagai template organic, HCl sebagai katalisator dan pelarut aquades serta ethanol. Sumber silica yang digunakan adalah tetraethylortosilicate (TEOS). Adapun komposisi larutan induk tersebut adalah perbandingan molar sebagai berikut: 0.05 CTAB, 1.0 TEOS, 0.5 HCl, 25 C₂H₅OH dan 75 H₂O. Semua bahan dicampur dan diaduk dengan kecepatan 200 rpm pada temperatur 30°C selama 1 jam. Selanjutnya dilakukan dip coating pada pelat anoda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1.
Blok diagram proses pembuatan membrane MCM-41 pada anoda Pb

Analisis dan Karakterisasi

Anoda Pb dianalisis komposisinya dan grain boundary menggunakan mikroskop optik. Observasi struktur mikro dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope JED-2100, JEOL Co. Ltd. Adapun identifikasi struktur MCM-41 dilakukan menggunakan X-ray diffraction (XRD, Cu K radiation). Karakteristik pori dipelajari menggunakan metode physisorption (Adsorpsi-desorpsi isothermal) Quantachrome AUTOSORB-1. Nitrogen divariasikan tekanan uap relatifnya dari 0 hingga 1. Berdasarkan data yang dihasilkan, dapat digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran pori. Lebih lanjut membran MCM-41 yang berubah menjadi gel dianalisis sifat mekaniknya. Dilakukan pula uji open circuit voltage (OCV) selama 24 jam menggunakan Eco Chemie (The Netherland) Autolab Galvanostat Potentiostat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

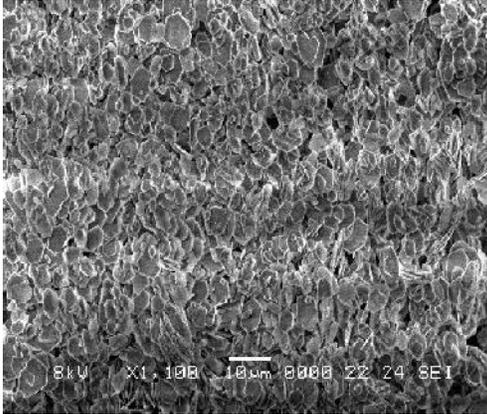
Berdasarkan pengamatan mikroskopik anoda Pb yang dihasilkan dapat diketahui bahwa butir Pb yang relatif seragam dengan ukuran rata-rata 5 μm (Gambar 2).



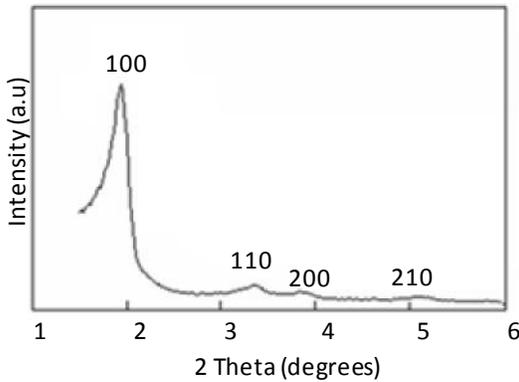
Gambar 2.
Foto mikroskopik anoda Pb

Hasil pengamatan mikroskopik ini diperkuat dengan data observasi Scanning Electron Microscope (SEM) seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Struktur heksagonal MCM-41 dapat diidentifikasi menggunakan XRD sebagaimana terlihat pada Gambar 4, menunjukkan adanya struktur heksagonal. Yang menjadi ciri khas struktur MCM-41 adalah adanya 4 puncak pada grafik XRD tersebut, secara lebih detail dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3.
Foto SEM anoda yang dihasilkan

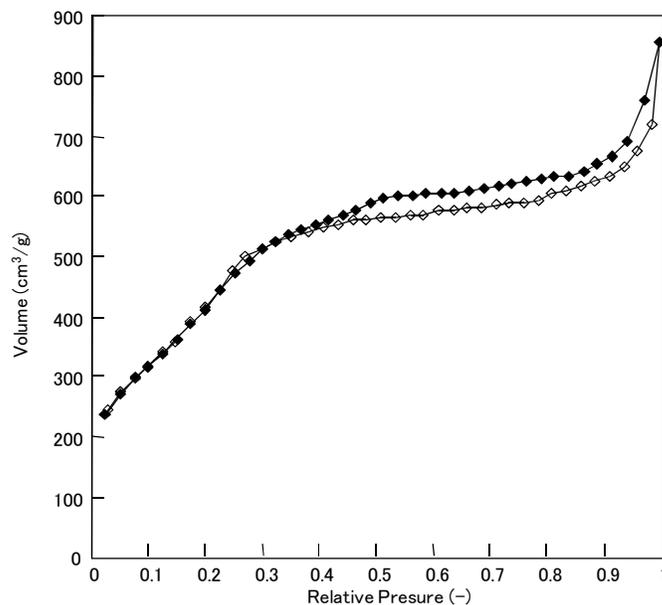


Gambar 4.
Grafik XRD membran MCM-41

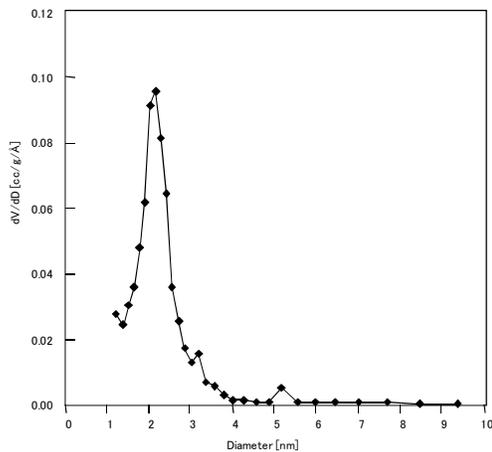
Tabel 1.
Ciri khas struktur MCM-41 pada grafik XRD

hkl	d(Å)
100	39.8
110	22.9
200	19.8
210	14.9

Hasil analisis adsorpsi-desorpsi isothermal menggunakan nitrogen pada 44 K dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa kenaikan tekanan uap relatif (P/P_0) menyebabkan peningkatan volume nitrogen yang terserap oleh MCM-41. Kenaikan yang signifikan terjadi pada daerah tekanan uap relatif 0,4 hingga 0,6 mengindikasikan adanya pori yang berukuran meso¹²). Terlihat pula adanya kenaikan grafik adsorpsi nitrogen pada daerah tekanan uap relatif 0,9 – 1 menunjukkan adanya pori yang berukuran makro. Terlihat jelas adanya histeresis adalah menggambarkan ukuran pori yang tidak sama antara pada bagian luar dan bagian dalamnya. Sehingga proses desorpsi menjadi lebih lambat, karena masih ada nitrogen yang terjebak di dalam pori yang berbentuk seperti gua. Berdasarkan data physisorption maka dapat dihitung luas permukaan spesifik (BET) material MCM-41 yang dihasilkan adalah $1300 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori $1,08 \text{ cm}^3/\text{g}$. Distribusi ukuran pori dihitung menggunakan metode BJH, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 6.



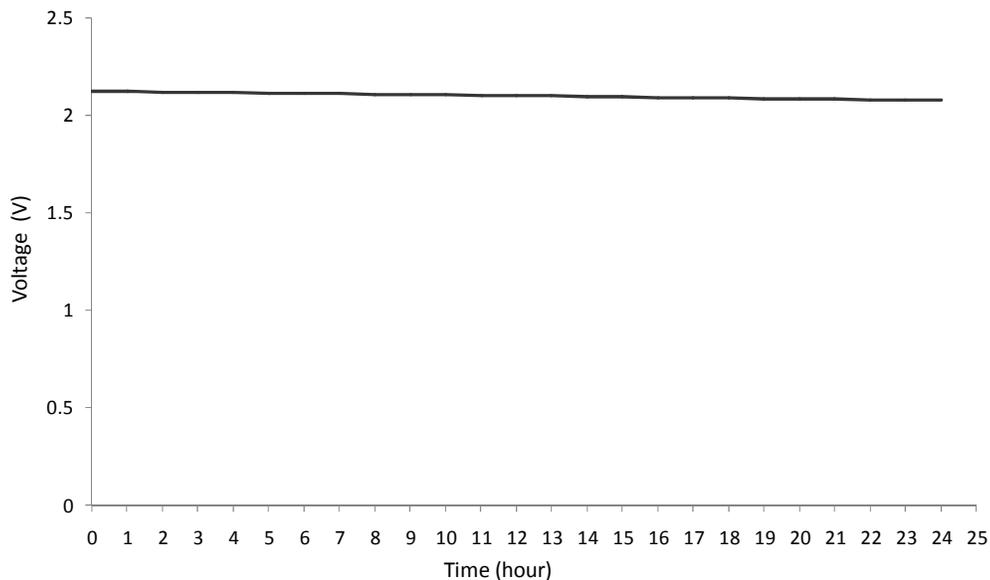
Gambar 5.
Adsorpsi-desorpsi isothermal pada MCM-41



Gambar 6. Distribusi ukuran pori material MCM-41 yang dihasilkan

Berdasarkan Gambar 6. Terlihat bahwa ukuran pori dari material MCM-41 yang dihasilkan cukup homogen. Kondisi ini didukung oleh distribusi ukuran pori yang sempit dengan ukuran pori rata-rata sekitar 2,1 nm. Ukuran ini mendukung fungsinya sebagai elektrolit yang dapat dilalui oleh ion SO_4^{2-} .

Sel Pb-MCM-41 dengan elektrolit asam sulfat (H_2SO_4) dengan konsentrasi 37% atau SPGR 1,28 menghasilkan open circuit voltage (OCV) yang relatif stabil dalam pengamatan selama 24 jam, yaitu sebesar 2,1 Volt seperti ditampilkan pada Gambar 7. Hasil analisis tersebut membuktikan bahwa sel sel Pb-MCM-41 dapat bekerja dengan baik. Apabila separator MCM-41 terlalu tipis maka terjadi hubungan singkat yang mengakibatkan voltage menjadi nol.



Gambar 7. OCV sel Pb-MCM-41

SIMPULAN

Elektroda Pb dapat dibuat menggunakan elektrodeposisi dengan arus 100 mA/cm², selama 3 jam, menghasilkan tebal sekitar 200 μ m. Material MCM-41 dapat berfungsi sebagai gel elektrolit baterai lead acid. Sistem sel Pb-MCM-41 dapat menghasilkan OCV sekitar 2,1 Volt. Merupakan potensi untuk diaplikasikan sebagai baterai untuk propulsi kapal selam. Karakteristik gel elektrolit MCM-41 yang menggunakan asam sulfat dengan konsentrasi sekitar 37%

UCAPAN TERIMA KASIH

Riset ini terlaksana dengan menggunakan dana Insinas 2016 dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. McGuinness, M. and B. Benjamin, Submarine Lead-Acid Battery Performance, Australian Submarine Corp., 2003
2. Linden, D., Handbook of Batteries, 3rd edition, Mc Graw Hill, New York, 2001
3. Deveau, J., C. White and Lukas G. Swan, Lead-acid battery response to various formation levels for off-grid solar and conventional applications,

- Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol 11, September 2015m 1-10
4. Kresge, C.T., M.E. Leonowicz, W.J. Roth, J.C. Vartuli and J.S. Beck, *Nature*, 359 (1992) 710.
 5. Hens, S., R. Othman, A.G.E. Sutijpto and R. Muhida, MCM-41 as a new separator material for electrochemical cell: Application in zinc-air system, *J. Mem. Sci.*, 367, 2011 152-157
 6. Fei Qi, Wei Chu and Bingbing Xu, Catalytic degradation of caffeine in aqueous solutions by cobalt-MCM-41 activation of peroxymonosulfate, *Applied Catalysis B. Environmental*, Volumes 134-135, 2013, 324-332
 7. Vernal, C., M. Mesa, M. Jaber, J. Louis Guth, L. Sierra, Contribution to the understanding of the formation mechanism of bimodal mesoporous MCM-41 type silica with large defect, *Microporous and Mesoporous Materials*, volume 153, 2012, 217-226
 8. Yongping L., C. Dong, Xiaogang Li and Yang Tian, A photoelectrochemical sensor for lead ion through electrodeposition of PbS nanoparticles onto TiO₂ nanotubes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, V. 759 Part 1, 2015, 51-54
 9. Mashkouri, N. N., M. Eidizadeh, S. Seidi, E. Ghasemi and R. Alzadeh, Developing electrodeposition techniques for preconcentration of ultra-traces of Ni, Cr and Pb prior to arc-atomic emission, *Microchemical Journal* Vol 93, Issue 2, 2009, 159-163
 10. Wang, L., Hao Zhang, Gaoping Cao, Wenfeng Zhang, H. Zhao and Y. Yang, Effect of activated carbon surface functional groups on nano-lead electrodeposition and hydrogen evolution and its application in lead-carbon batteries, *Electrochimica Acta*, V. 186, 2015, 262-271
 11. Wang, B., Tao Zhu, Lizhen Huang, Teck Lip Dexter Tam, Zequn Cui, Jinggang Ding and Lifeng Chi Addressable growth of oriented organic semiconductor ultra-thin films on hydrophobic surface by direct dip-coating, *Organic Electronics*, V. 24, 2015, 170-175
 12. Zhang, Z., and Zhenghong Yang, Theoretical and practical discussion of measurement accuracy for physisorption with micro- and mesoporous materials, *Chinese Journal of Catalysis*, V.34 Issue 10, 2013, 1797-1810

KAJIAN HIDRODINAMIKA KAPAL SEMI KATAMARAN UNTUK TRANSPORTASI SUNGAI

STUDY OF SEMIKATAMARAN SHIP HYDRODYNAMICS FOR RIVER TRANSPORTATION

Luhut Tumpal Parulian Sinaga
Laboratorium Hidrodinamika Indonesia, Surabaya
luhuttps@yahoo.com.sg

Abstrak-

Bentuk rekayasa lambung yang digunakan adalah mengurangi tegangan permukaan air dengan cara membuat body ganda (semacam Tunnel) di bawah permukaan air. Untuk selanjutnya body ganda di bawah permukaan air ini dinamakan dengan Kapal Hull Semi Catamaran (HSC). Rekayasa lambung kapal HSC dilaksanakan dengan pembuatan beberapa buah model kapal dengan variasi bentuk dan ukuran Tunnel. Gelombang timbul akibat pergerakan Kapal HSC diobservasi di kolam uji yang dapat dikontrol kedalaman perairannya. Dari observasi percobaan model kapal yang dilakukan , Body kapal bentuk HSC lebih unggul bila dibandingkan dengan penggunaan bentuk body kapal konvensional , beberapa keunggulan yang diberikan bentuk kapal HSC diantaranya adalah pola dan tinggi gelombang timbul akibat pergerakan kapal lebih baik. Kapal semikatamaran di perairan dangkal memiliki perbedaan 6,61% lebih kecil bila dibandingkan dengan kapal monohull pada displasmen yang sama. Penggunaan kapal HSC sangatlah efektif digunakan sebagai sarana transportasi sungai maupun laut (Sea River Ship). Pengembangan, rekayasa dan inovasi bentuk HSC dilaksanakan di Laboratorium Hidrodinamika (UPT-BPPH, BPP Teknologi).

Kata kunci : *perairan dangkal, wake wash, lambungkapal, tunnel body, efisien*

Abstract

The form of hull engineering used is to reduce the surface tension of the water by making a double hull (a kind of tunnel) below the water surface. Subsequently the double hull beneath the water surface is called the Hull Semi Catamaran (HSC). HSC hull engineering is carried out by making several models of ships with variations of tunnel shapes and sizes. Waves arising from the movement of HSC Ships are observed in the test tank that can be controlled by the depth of the waters. From the experimental observations of ship models performed. Hull of ships HSC shape is superior when compared with the use of conventional ship body shape, some of the advantages given the shape of the ship HSC of which is the pattern and wave height arising due to the movement of the ship better. Ship semi catamaran in shallow waters have a difference of 6.61% smaller when compared with monohull ship on the same displacement. It is expected that the use of HSC vessels is very effective to be used as a means of river and sea transportation (Sea River Ship). The development, engineering and innovation of HSC forms are implemented in the Hydrodynamics Laboratory (UPT-BPPH, BPP Technology).

Keywords: *shallow water, wake wash, semi catamaran , tunnel body, efficient*

Diterima (received) : 14 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 9 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 30 Juli 2017

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Sebagai konsekuensi yang sangat penting dengan meningkatnya integritas ekonomi dan era globalisasi antar negara ditunjukkan dengan adanya peningkatan transportasi logistik. Transportasi air secara prinsipal masih lebih banyak menguntungkan dibandingkan dengan jasa transportasi lainnya, diantaranya : kapasitas muat lebih besar, biaya transportasi lebih murah dan dampak lingkungan bisa ditekan.

Patut dicatat bahwa salah satu faktor keterbatasan pengembangan alat transport perairan terbatas (dangkal) untuk menanggulangi adanya kenaikan kebutuhan, adalah ketidak hadirannya kapal modern sungai-laut yang memadai. Pulau Kalimantan, salah satu pulau terbesar di Indonesia dan lebih dikenal dengan sebutan Pulau dengan seribu sungai, mempunyai masalah yang cukup rumit terhadap lalu lintas/transportasi sungai. Sejumlah kecelakaan sering terjadi pada daerah ini, seperti tenggelamnya kapal dan tubrukan antar kapal. Faktor utama yang menjadikan seringnya terjadi kecelakaan, tidak hanya dikarenakan banyaknya alat transportasi yang beroperasi, melainkan juga dipengaruhi oleh kondisi alam, seperti pendangkalan dan pengaruh pasang surut air laut. Laju pendangkalan/sedimentasi sungai dan pantai di daerah Kalimantan sangatlah tinggi. Salah satu faktor yang menunjang proses sedimentasi perairan adalah gelombang timbul (*wake-wash*) yang diakibatkan oleh pergerakan kapal.

Untuk mendapatkan improvisasi efisiensi transportasi lewat perairan (sungai dan laut), langkah konkret yang perlu dilakukan dalam perancangan alat transportasinya adalah mendesain sedemikian rupa sehingga alat transportasi tersebut mampu berlayar di sungai maupun di laut dengan segala keterbatasan alam yang ada serta meniadakan jeda bongkar muat. Dengan demikian alat transportasi sungai dan laut harus mampu mempunyai daya muat besar dan daya rusak terhadap lingkungan yang sangat kecil (*low detrimental effect*) serta mempunyai *high safety margin*.

Dengan batasan-batasan yang sebegitu banyak, dalam perancangan alat transportasi sungai sangatlah penting mendefinisikan karakteristiknya sehingga didapatkan ukuran yang optimal.

Ciri khas alat transportasi sungai dan laut diantaranya adalah adanya keterbatasan sarat kapal, harus mampu mengubah sarat

kapal pada saat di laut untuk menambah stabilitas kapal, tinggi kapal sangat terbatas karena harus melewati halangan berupa jembatan-jembatan.

Untuk meningkatkan kapasitas muat, kapal biasanya dibuat lebar, membuat kapal lebih tegar di gelombang laut dan panjang. Dengan demikian, batasan panjang per tinggi dan lebar per tinggi mempunyai rasio sebesar :

$$\frac{L}{H} \leq 17 \text{ and } \frac{B}{H} \leq 3 \quad (1)$$

Harga maksimum untuk parameter-parameter pada persamaan (1) untuk kapal-kapal Non-Rusia mempunyai panjang antara 80 sampai 90 meter, lebar antara 11 dan 13 meter , tinggi kapal di atas permukaan air berkisar 5 sampai 8 meter.

Disamping itu, salah satu parameter yang sangat mempengaruhi karakteristik pergerakan kapal di perairan terbatas, adalah kecepatan. Pendefinisian baru untuk menentukan kecepatan kritis kapal pada perairan dangkal adalah sebagai berikut :

$$V_m > \sqrt{gh} \quad (2)$$

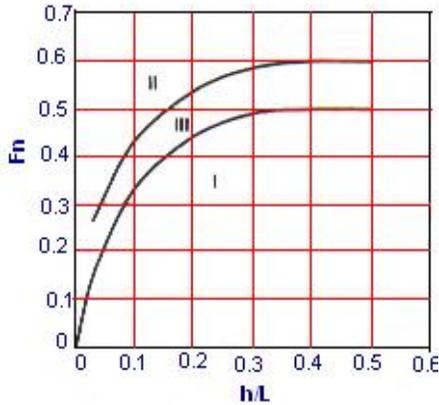
dimana h adalah kedalaman perairan.

Kebutuhan akan transportasi sungai dan laut yang cepat, membawa ke suatu pengembangan kapal penumpang yang mampu menjaga kecepatan kapal dalam beberapa kedalaman termasuk perairan dangkal. Untuk alasan penghematan bahan bakar dan memperkecil pengaruh lingkungan, disarankan untuk mengoperasikan kapal pada daerah di atas ataupun di bawah kecepatan kritis¹⁾, mengkatagorikan daerah kecepatan sub dan super kritis. Konsep baru ini tidak berhubungan dengan kedalaman, melainkan kecepatan, dimana pada kecepatan tersebut harga koefisien hambatan gelombang timbul mencapai nilai maksimum²⁾. Definisi baru ini dapat diekspresikan seperti pada Gambar 1. Menurut diagram pada gambar 1, daerah II merupakan daerah super kritis, atau daerah "*super-hump*" yang berada di atas zona I. Gambar 1 juga bisa dipakai membantu menentukan pemilihan daerah kecepatan untuk kapal yang dioperasikan pada daerah super-kritis. Kapal-kapal yang dioperasikan baik di perairan dalam maupun dangkal seharusnya didesain pada Fn ³⁾ :

$$Fn > 0.60 \quad (3)$$

Rekomendasi ini telah terbukti dengan pengalaman-pengalaman praktik bahwa di

perairan dalam, kapal sebaiknya tidak dioperasikan pada daerah gelombang⁴⁾ yang tidak diharapkan, yakni pada $F_n=0.5$. Bila kapal dioperasikan pada daerah yang tidak ada batasan kedalaman, maka sebaiknya didesain pada kecepatan di Zona II pada Gambar 1, yakni kapal dioperasikan pada kecepatan “*super critical*”.



Gambar 1.
Speed zones :

- I. Subcritical
- II. Supercritical
- III. Unfavorable supercritical

Dengan menggunakan definisi kecepatan super-kritis seperti di atas, desainer dapat menentukan F_n yang direkomendasikan ($F_n > 0.6$), kapal akan beroperasi pada daerah transisi ($1 < F_n < 3$). Implementasi dari pendekatan ini ditujukan untuk kebutuhan navigasi pada perairan pedalaman, dapat dilakukan dengan dua jalan. Pertama : L/B dibuat besar dengan tujuan untuk mengurangi hambatan kedua: bentuk lambung kapal dibuat semi planning. Dengan L yang lebih besar akan membawa ke kestabilan kapal yang kurang bagus, tetapi hal ini bisa ditanggulangi dengan menambah lebar kapal, sesuai dengan konsep multi hull. Disamping itu kapal multi hull dengan kecepatan pada super-kritis akan mempunyai efek lingkungan yang kecil.

Sedangkan istilah “perairan terbatas” dipakai untuk menyatakan perairan yang pembatasnya cukup dekat dengan kapal sehingga dapat mempengaruhi Hambatan, kecepatan, perilaku, olah gerak dan karakteristik kapal lainnya. Sedangkan “perairan dangkal” dipakai untuk menyatakan perairan yang pembatasnya dekat dari kapal tetapi hanya dalam arah vertikal⁵⁾.

Jika kedalaman perairan berubah menjadi dangkal, maka hambatan kapal yang melaluinya akan menjadi lebih besar.

Sifat gerakan air mendekati sifat gerakan dua dimensi (biasanya untuk perairan dalam sifat gerakan airnya berbentuk tiga dimensi). Tekanan yang diakibatkan oleh gerakan, akan menjadi lebih besar dan tekanan ekstra di perairan dangkal ini akan menimbulkan gelombang yang lebih besar daripada gelombang yang ditimbulkan di perairan dalam. Di perairan dangkal, gelombang yang mengikuti kapal akan mempunyai panjang gelombang yang lebih besar daripada panjang gelombang di perairan dalam pada kecepatan kapal yang sama. Selain itu, perubahan kecepatan aliran yang melalui permukaan kapal ketika kapal berada di air dangkal juga akan sedikit memperbesar Hambatan.

Kecepatan gelombang di perairan dalam, c_w dapat dinyatakan sebagai:

$$c_w = \sqrt{\frac{gL_w}{2f}} \dots\dots\dots(4)$$

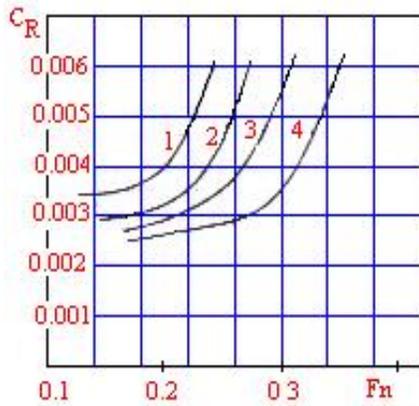
Untuk perairan dangkal, hubungan antara kedalaman perairan (h) dengan kecepatan penjalaran gelombang dapat dinyatakan sebagai :

$$c_{ws} = \sqrt{\frac{gL_w}{2f}} \tanh \frac{2fh}{L_w} \dots\dots\dots(5)$$

2. Konsep Multi Lambung (Multi-Hull)

Salah satu dasar/alasan membuat konsep multi-lambung, salah satunya yang lebih dikenal dengan sebutan *Catamaran*, adalah meningkatnya kecepatan kapal untuk kebutuhan transportasi baik penumpang maupun barang. Masalah utama yang timbul dengan meningkatnya kecepatan tersebut adalah stabilitas kapal. Catamaran dengan konstruksi lambung ganda membuat kapal tipe ini mempunyai lebar yang lebih besar bila dibandingkan dengan kapal lambung tunggal. Catamaran mempunyai Hambatan gelombang (*wave-making Resistance*) yang lebih rendah baik di perairan dalam maupun dangkal, hal ini dikarenakan “pengaruh bentuk catamaran”, juga hambatan akibat bentuk lambungnya lebih rendah. Kelebihan lain Catamaran adalah kemudahan bongkar muat serta lebih ramah lingkungan karena gelombang timbul (*coastal wash out*) pada kanal dan sungai bisa dieliminir.

Berdasar model Test di Towing Tank⁶⁾, Gambar 2, mempresentasikan Kurva Koefisien Hambatan untuk berbagai jenis kapal-sungai.



Gambar 2.
Resistance coefficient for different types of ships: 1. pushed barge; 2. cargo ship; 3. passenger ship ; 4. cargo catamaran

Direkomendasikan, bahwa kecepatan operasional transportasi air berkisar antara 8-10 km/jam untuk kapal yang dioperasikan di perairan dangkal. Beberapa criteria telah dibuat untuk mengkaji/mengklasifikasikan daerah kecepatan (*speed regimes*). Pavlenko mendefinisikan Froude number yang didasarkan pada displacement kapal, F_{n_v} ,:

$$F_{n_v} = \frac{V_m}{\sqrt[3]{gV^{1/3}}} \dots\dots (6)$$

dimana,

- V_m : kecepatan kapal
- G : percepatan gravitasi bumi
- V : Volume displacement.

Ada tiga tipe daerah operasional kapal : terapung, transisi dan planning (mengangkat). Pengelompokan kecepatan untuk ketiga katagori ,dapat ditunjukkan sebagai berikut :

- $0 < F_{n_v} < 1$ *floating*
- $1 < F_{n_v} < 3$ *transition*
- $3 < F_{n_v}$ *planning*

Kategori transisi merupakan bagian yang sangat sulit. Bentuk lambung kapal yang dioperasikan pada daerah transisi, jenisnya sangat banyak.

Rekomendasi sejenis untuk daerah transisi : $1.0 < F_{n_v} < 3.0$

$$\frac{1}{\sqrt{l}} < F_n = V_m / \sqrt{gL} < \frac{3}{\sqrt{l}} \dots\dots (7)$$

dimana F_n adalah Bilangan Froude yang berdasarkan pada panjang kapal dan $l=L/V^{1/3}$.

Sedangkan menurut Y.I Voytkunsky (1988), daerah transisi terjadi pada :

$$0.6 < F_n < 1.3$$

Peningkatan dalam perbandingan L/B sangat diharapkan untuk mengurangi hambatan gelombang timbul (*wave making resistance*). Untuk kapal lambung tunggal (*mono hull*), kenaikan L/B dibatasi dengan batasan-batasan stabilitas. Batasan ini tidak berlaku bagi kapal dengan bentuk lambung Catamaran. Sebagai tambahan dari yang disebut tadi, Catamaran mempunyai ruangan yang lebih besar sehingga mempunyai ruangan akomodasi yang lebih nyaman. Dikarenakan Catamaran mempunyai stabilitas yang baik, tidak menutup kemungkinan untuk memperpanjang kapal. Naikan panjang kapal yang begitu signifikan akan mengurangi besarnya komponen Hambatan gelombang timbul (*wave-making resistance*) 49% dari total Hambatan, sehingga kebutuhan akan daya mesin juga bisa dikurangi.

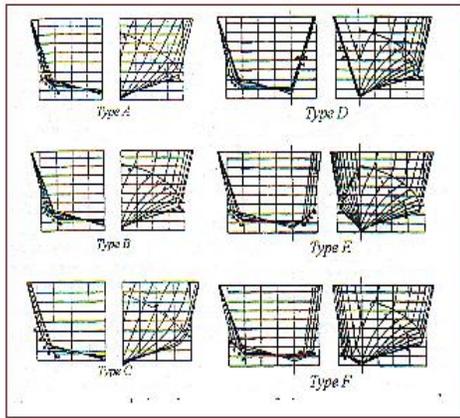
Sedangkan beberapa keuntungan yang didapatkan dengan penggunaan *Multi-hull* ship untuk perairan dangkal, adalah :

- Kecepatannya relatif lebih tinggi sehingga dapat meningkatkan kapabilitas laju lalu lintas perairan;
- Luasan dek lebih besar dan kemungkinan perpanjangan kapal lebih besar
- Kelaik-lautan lebih baik
- Mengurangi aksi gelombang pada tanggul sungai

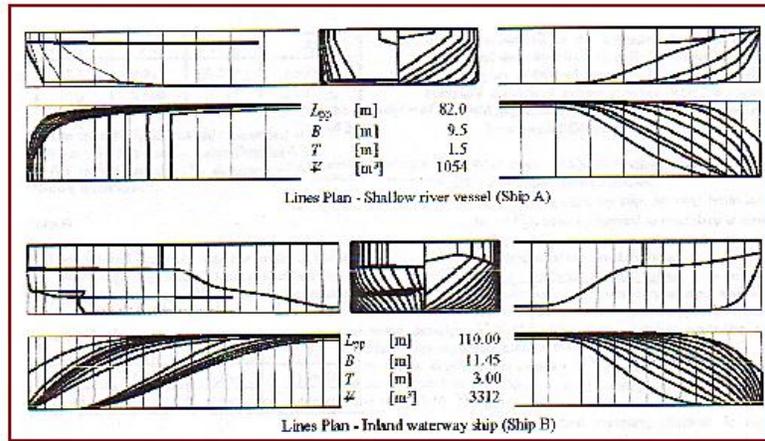
Dari analisa data-data yang telah dikumpulkan, didapatkan suatu kemungkinan-kemungkinan pendefinisian ukuran utama kapal multi-hull secara umum :

- Ratio lebar per panjang , $B_m / L = 0.3-1.0$ (vs 0.1-0.3 untuk mono-hull) ;
- Ratio Tinggi/panjang kapal, $D/L = 0.10-0.30$ (vs. 0.07-0.10 untuk mono-hull);
- Ratio lebar satu lambung per sarat kapal, $B_l / d = 0.5-2.5$ (vs 2-4 untuk *sea going monohull*)
- ratio jarak antara garis tengah satu lambung dengan panjang kapal adalah 0.1-0.5

Pada Gambar 3, terlihat beberapa konfigurasi bentuk penampang lintang kapal Catamaran



Gambar 3.
Beberapa bentuk konstruksi penampang lintang Kapal Catamaran.
METODOLOGI



Gambar.4.
Bentuk kapal monohull untuk perairan dangkal dan sungai

Solusi lain bentuk rekayasa design untuk menekan terjadinya gelombang timbul akibat pergerakan kapal pada perairan terbatas adalah bentuk kapal *multihull* (Catamaran). Sebegitu banyak telah diungkap kelebihan/keunggulan kapal Catamaran, tetapi meskipun begitu masih ada kendala yang dihadapi dengan konstruksi *body* Catamaran, diantaranya:

- masalah manoeuvring kapal pada saat berada pada perairan berarus dan bergelombang besar
- *deck slamming*, pada saat kapal catamaran terkena hantaman gelombang dari depan dan ataupun belakang (*following* ataupun *head seas*)

Berdasar pada semua permasalahan yang berkaitan dengan transportasi sungai-laut (perairan terbatas – dangkal) seperti yang disebutkan di atas, konsep baru tentang

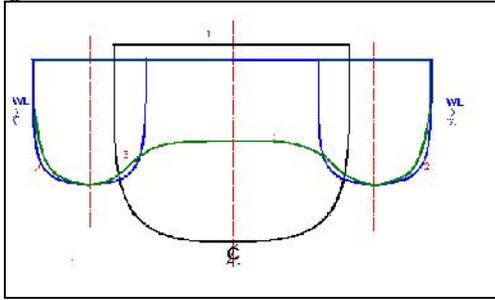
Beberapa metode rekayasa design dilakukan untuk memenuhi kebutuhan alat transportasi perairan terbatas (dangkal). Bentuk konstruksi lambung tunggal (*monohull*) untuk perairan terbatas dapat dilihat pada Gambar 4.

bentuk lambung ditawarkan untuk meningkatkan kapasitas transportasi barang-barang ataupun penumpang pada perairan terbatas (dangkal-sungai).

Bentuk lambung yang ditawarkan adalah lambung dengan konstruksi transisi dari bentuk monohull ke bentuk catamaran. Lambung mempunyai dimensi yang sama dengan Kapal Catamaran tetapi tidak ada *body* kapal yang terangkat dari permukaan air (*Deck* kapal kapal Catamaran berada di atas permukaan air), sehingga kapal seolah-olah mempunyai *Tunnel* (terowongan) di bawah air. Bentuk lambung dengan *Tunnel* di bawah *body* untuk selanjutnya dinamakan Semicatamaran.

Untuk lebih jelasnya, perbedaaan prinsip bagian tengah (*midship section*) untuk ketiga bentuk tersebut (conventional, catamaran

dan semicatamaran) dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar.5.
Penampang tengah ketiga bentuk (1) monohull (konvensional) (2) Catamaran (Twin hull) (3) Semicatamaran

Untuk mengkaji dan mengobservasi pengaruh bentuk kapal Semicatamaran pada Gelombang timbul, model kapal dibuat dengan ratio Lebar/Panjang (B/L) sebesar 4.0 . Model dibuat dari bahan fiberglass. Ukuran utama model kapal :

- Panjang (L) : 300 m/m
- Lebar (B) : 120 m/m
- Tinggi (H) : 60 m/m

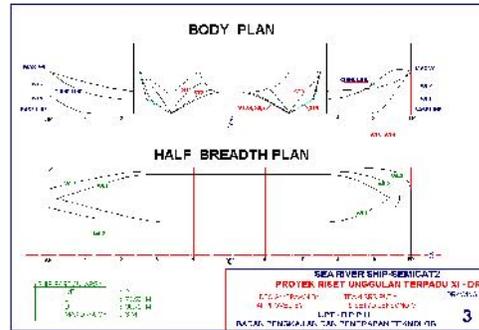
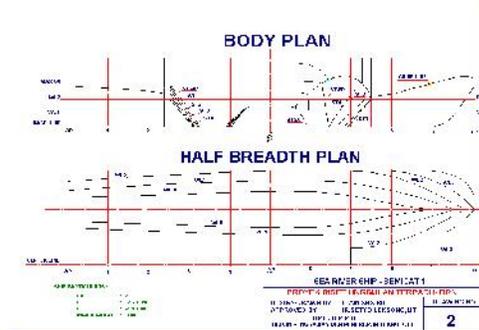


Gambar.6.
Model kapal konvensional (bawah), model kapal Semicatamaran (tengah dan atas)

Untuk tujuan observasi gelombang timbul pada kapal Semicatamaran, dibuatlah Towing Tank Mini, dimana kedalaman air Tangkisi bisa diatur ketinggiannya. Salah satu sisi Tangki dibuat dari bahan yang tembus pandang sehingga gelombang yang ditimbulkan oleh pergerakan model secara mudah diobservasi dari sisi tangki. Gelombang timbul yang terjadi direkam dengan kamera digital dan dibuat sketsa. Towing Tank tersebut dilengkapi dengan

carriage yang kecepataannya bisa divariasikan untuk mencapai tiga zona kecepatan.

Bentuk *body plan* kapal Semicatamaran dapat dilihat secara berurut-urut pada Gambar 10. Perbedaan yang cukup signifikan antara kedua model Semicatamaran adalah bentuk lambung dan bentuk Terowongannya (*tunnel*).



Gambar 7.
Body plan kapal Semicatamaran

HASIL DAN PEMBAHASAN

1 Hasil Pengujian Fisik

Dari ketiga buah model, seperti pada Gambar 8, model kapal ditarik di kolam uji (small towing tank) dengan kedalaman air 10 cm ($h/T=0.333$, dimana h adalah kedalaman perairan dan T adalah sarat kapal), hasilnya dapat diuraikan sebagai berikut:

- Semicatamaran mempunyai efek gelombang yang tidak begitu signifikan sampai $Fn=0.3$. Bila dibandingkan dengan model Konvensional, gelombang yang diakibatkan oleh model pada $Fn=0.2$ jauh lebih buruk
- Bentuk garis tengah tunnel dan bentuk lambung akan sangat berpengaruh terhadap tinggi gelombang timbul



Gambar.8.
Uji coba Model Semikatamaran pada $F_n=0.3500$, di Small TT

Tabel 1.
Nilai hambatan total kapal semikatamaran
Perairan Dangkal

V [Knots]	Perairan Dangkal		
	$h/T = 0.33$	$h/T = 0.35$	$h/T = 0.37$
	Rt [kN]	Rt [kN]	Rt [kN]
10	53.546	70.101	392.874
12	128.096	169.566	587.177
14	482.636	534.571	763.533

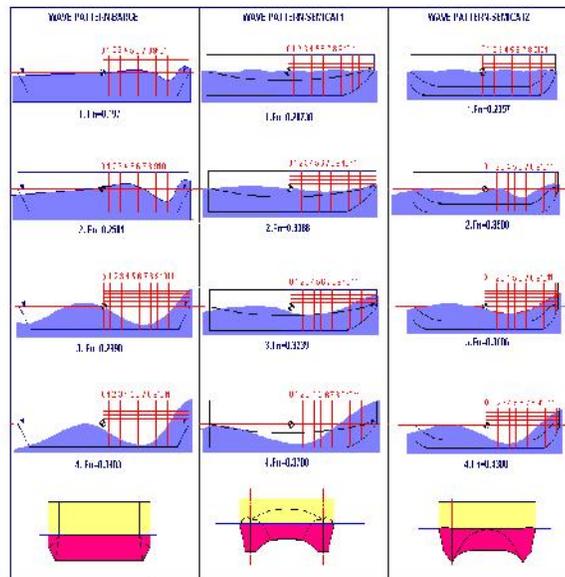
Tabel 2.
Nilai hambatan total kapal semikatamaran
Perairan Dangkal

V [Knots]	Perairan Dangkal		
	$h/T = 0.33$	$h/T = 0.35$	$h/T = 0.37$
	Rt [kN]	Rt [kN]	Rt [kN]
10	56.789	85.554	425.943
12	137.626	171.186	621.841
14	519.827	558.181	788.303



Gambar.9.
Percobaan tarik pada $F_n=0.3686$, di small TT

Efek gelombang timbul pada masing-masing model, dapat dilihat pada Gambar 10 pada beberapa Bilangan Froude.



Gambar 10.
Gelombang yang diakibatkan oleh bentuk Konvensional (kiri) dan Semikatamaran (tengah dan kanan)

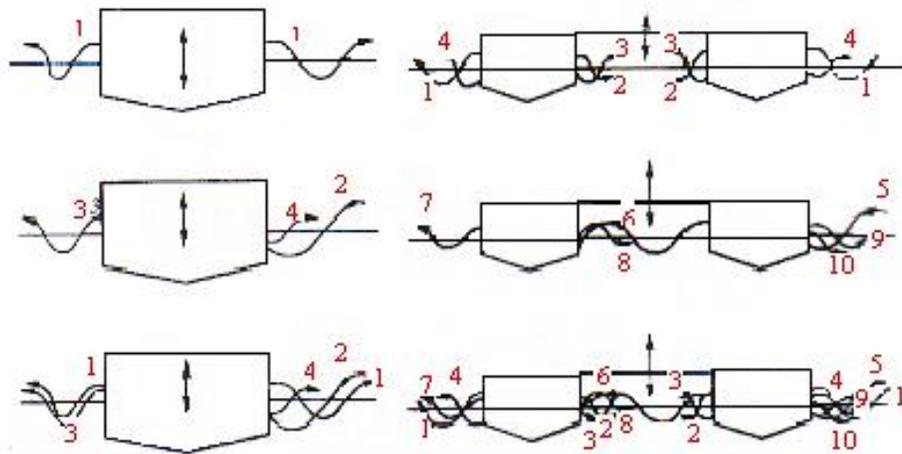
2 Interaksi Antara Badan Kapal-Gelombang

Pengurangan displacement dan peningkatan ratio L/B adalah cara yang paling efektif memendekkan tinggi gelombang timbul. Transisi dari kapal lambung tunggal ke multi hull akan membawa pengaruh yang cukup signifikan dalam menanggulangi efek gelombang terhadap lingkungan. Susunan Catamaran memungkinkan mengurangi sarat kapal lambung tunggal (*monohull*) dan memperpanjang panjang kapal, tetapi phase pola gelombang campuran tidak bisa diubah.

Gelombang timbul selama Olengan kapal untuk kapal Lambung tunggal (mono hull) dengan Lambung Ganda (Multi Hull)

adalah berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Bila gelombang datang adalah teratur (regular), semua sistem gelombang mempunyai panjang yang sama tetapi interaksi mereka dengan lambung hanya mengubah amplitudonya, sedangkan phase gelombang bergantung pada hubungan antara panjang gelombang dengan jarak antara lambung sisi dalam. Resonansi gerakan gelombang dapat terjadi antara dua lambung hal ini sebagaimana dijelaskan oleh¹²⁾

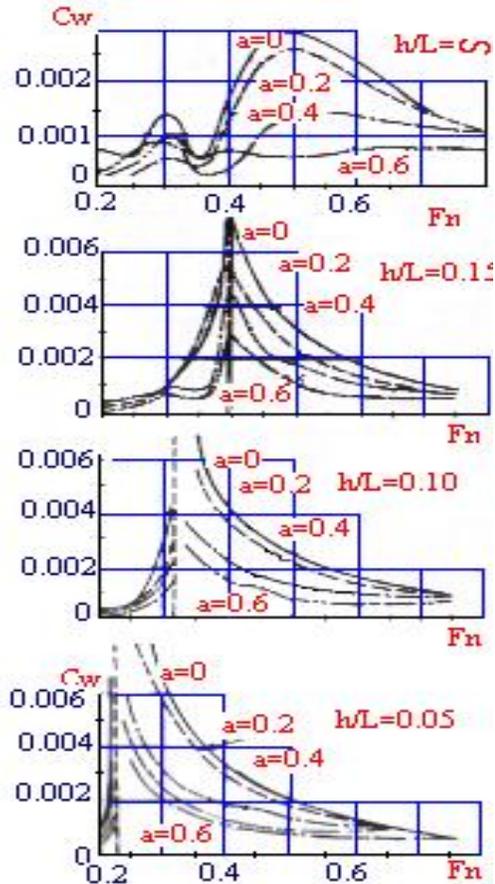


Gambar 11.

Pola gelombang monohull (kiri) dan Katamaran (kanan) di *still water* (baris atas), dengan kapal diam di laut lepas (barisan tengah), dan dengan kapal bebas di laut lepas (baris terbawah).

Pengaruh multi-hull pada Komponen Hambatan gelombang timbul dipresentasikan pada Gambar 12. Pada Gambar 12 terlihat koefisien hambatan gelombang timbul (*wave making resistance component*) untuk beberapa jarak antara body dan kedalaman perairan. Terlihat dengan jelas dari Gambar 5, pengaruh jarak antara body dan kedalaman perairan sangat mempengaruhi besarnya gelombang timbul (*wave making resistance*).

Untuk bilangan Froude yang lebih besar ($F_n > 0.75$), jarak antara body ("a"), tidak begitu signifikan mempengaruhi besarnya Hambatan gelombang¹³⁾. Patut dicatat bahwa penambahan jarak antar body akan bisa mengeleminasi puncak kurva, terutama pada $F_n \approx 0.5$.



Gambar.12. Koefisien hambatan gelombang sebagai fungsi bilangan Froude dan clearance longitudinal untuk trimaran dengan $b = 0,10$ pada perairan dalam dan dangkal.

SIMPULAN

Berdasar observasi pada model test, Lambung kapal dengan Terowongan (Semikatamaran) adalah salah satu solusi yang paling tepat sebagai alat transportasi sungai dan laut maupun pesisir. Efisiensi dengan bentuk konstruksi seperti itu dapat diterangkan sebagai berikut:

- Pendistribusian kembali air yang dipindahkan bagian body yang di bawah air, akan memberikan perubahan pada hubungan komponen Hambatan gelombang timbul dan kekentalan ; secara lebih jelas lagi pada kondisi tertentu akan mengurangi Hambatan total,
- Stabilitas lebih tinggi dalam kaitannya dengan kelaiklautan (periode oleng lebih tinggi, yang akan menyebabkan akselerasi lebih rendah)

- Displacement lebih besar daripada catamaran pada sarat yang sama
- Pengaruh lingkungan lebih rendah
- Bentuk tunnel akan sangat mempengaruhi gelombang timbul kapal
- Kapal semikatamaran di perairan dangkal memiliki perbedaan 6,61% lebih kecil bila dibandingkan dengan kapal monohull pada displasmen yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima Kasih kami sampaikan kepada semua pihak Laboratorium Hidrodinamika Indonesia yang telah membantu terlaksananya dengan baik pengujian kapal ini. Secara khusus penulis sampaikan kepada Prof. I Ketut Aria Pria Utama, yang telah memberikan pengarahan terhadap paper ini.

REFERENSI

1. Lyakhovitsky, Anatoly. 2007. Shallow Water and Supercritical Ships. USA: Backbone Publishing Company. 2007
2. Cicquini, C ; Venini P; Tiano, A ;, "Design of sea river ship by optimization", structure Multidisc Optim, 22, p 240-247
3. Chen, XN ; Gronarz, A ; List, A ;, "Flow around ships sailing in shallow water , experimental and numerical Results", Twenty third symposium on Naval Hydrodynamics, 2013
4. Larsson, Lars and Raven, C. Hoyte. Ship Resistance and Flow. Jersey City, New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
5. Anggara, Sony. Thesis. Studi Komparatif Performa Hidrodinamik Kapal Bertipe Shallow Draft Barge pada Kondisi Perairan Dangkal, Sedang, dan Dalam. Surabaya, Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.
6. Vantorre, M.; Laforce, E.; Eloit, K.; Richter, J.; Verwilligen, J.; Lataire, E. Ship motions in shallow water as the base for a probabilistic approach policy, Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2008, Estoril, 2008
7. Dubrovsky, V ;, " ships with outriggers", Backbone Pub.Co., 2004
8. Dubrovsky, V ; Lyakhovitsky, A ;, " Multihull ships", Backbone Pub. Co. 2004
9. Djatmiko, E.B., Panunggal, P.E., Achmadi, T., "Peluang Pemanfaatan

- Advanced Marine Vehicles untuk Menunjang Transportasi Nasional di Indonesia”, FT. Kelautan, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya. 2007
10. Leksono, S. ;,” A new design concept of applying barge Tunnel body as a River-sea Transportation,” JSPS-BPPT meeting, 2004
 11. Murdijanto, Utama, IKAP and Jamaludin, A, *An Investigation into the Resistance/Powering and Seakeeping Characteristics of River Catamaran and Trimaran*, *Makara Seri Teknologi*, Vol. 15, No. 1, 2011
 12. Jachowski, Jacek. Assessment of Ship Squat in Shallow Water Using CFD. Archives of Civil and Mechanical Engineering (Vol. VIII, pp. 30). Gdansk University of Technology. 2008
 13. Koh, K.K. and Yasukawa, H..Comparison study of a pusher–barge multihull system in shallow water,medium shallow water and deep water conditions. *Journal of Ocean Engineering*, 9-17.pp (2012).



MAJALAH ILMIAH PENGAJIAN INDUSTRI

Alamat Redaksi/Penerbit :

Deputi Bidang Teknologi Industri Rancang Bangun dan
Rekayasa

Gedung Teknologi II (251) Lantai 3, PUSPIPTEK Serpong,
TangSel (15314)

Telepon : (021)75875944, ext. 1112, Fax.(021)75875938

E-mail : majalah_mpi@yahoo.com

Home Page : <http://ejurnal.bppt.go.id/index.php/MIPI>

