



Hak cipta© 2021, Divisi Publikasi, Center of Technology (CoT)
Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

p-ISSN 1411-6243

e-ISSN 2685-4104

Penggandaan atau penerjemahan sebagian/seluruh bagian dari jurnal ilmiah ini harus seijin Divisi Publikasi, Center of Technology (CoT), Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Alamat Sekretariat:

Redaksi Jurnal Penelitian Enjiniring (JPE)
Lantai 1, Gedung Center of Technology (CoT)
Kampus Fakultas Teknik Gowa, Universitas Hasanuddin (UNHAS)
Jl. Poros Malino, km. 6, Bontomarannu
Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia
E-mail : jpe@unhas.ac.id
Website : www.cot.unhas.ac.id/journals/index.php/jpe

Staf Redaksi

- Penanggungjawab : **Dekan Fakultas Teknik, UNHAS**
Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT
- Pengarah : **Wakil Dekan Bidang Perencanaan, Keuangan, dan Sumber Daya**
Dr.Eng. Muhammad Rusman, ST., MT
- Wakil Dekan Bidang Kemahasiswaan dan Alumni**
Dr.Eng. Mukti Ali, ST., MT
- Pemimpin Umum : **Wakil Dekan Bidang Akademik dan Pengembangan**
Prof. Dr. Baharuddin Hamzah, ST., M.Arch
- Pemimpin Redaksi : Dr.Eng. Faisal Mahmuddin, ST., M.Inf.Tech., M.Eng
- Dewan Redaksi : Prof. Dr.rer.nat. Ir. Imran Umar
Prof. Dr. Ir. M. Ramli Rahim, M.Eng
Prof. Dr.-Ing. Ir. Herman Parung
Dr.-Ing.Ir. Wahyu Haryadi Piarah, MSME
Dr. Ir. Rhiza S. Sadjad, MS.EE
Dr. Ir. Dipl.-Ing. Ganding Sitepu
- Redaktur Pelaksana : Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT
Ir. Zaenab Muslimin, MT
Dr.Ir. Rosmalina Hanafi, M.Eng
Wahyuddin, ST., MT
Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D
Dr.Ir. Muhammad Ramli, MT
Abdul Mufti Radja, ST., MT., Ph.D
- Staf Kesekretariatan : Nur Fitriani Seilah, ST.



Dewan Penilai Karya Ilmiah

Prof. David Victor Thiel	CWMA, Griffith University, Australia
Prof. Dr. Eko Tj. Rahardjo	UI, Indonesia
Prof. Dr. Adit Kurniawan	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Januarsyah Haroen	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Moch. Ashari	ITS, Indonesia
Prof. Dr. Mauridhi H Purnomo	ITS, Indonesia
Prof. Dr. Muhammad Asvial	UI, Indonesia
Dr. Amin Abbosh, M.Sc	University of Queensland, Australia
Dr. Fitri Yuli Zulkifli, M.Sc	UI, Indonesia
Dr. Ir. Purwanto, M.Eng	UI, Indonesia
Dr. Ir. Edi Lukito, M.Sc	UGM, Indonesia
Prof. Mazlina Esa	UTM, Malaysia
Ass. Prof. Anton S Prabuwono	UKM, Malaysia
Prof. Josaphat T. S. Sumantyo	Chiba University, Japan
Prof. Dr. Deo Prasad	UNSW, Australia
Prof. Stephen SY Lau	Univ. of Hong Kong, Hong Kong
Ass. Prof. Stephen K Wittkopf	NUS, Singapore
Ass. Prof. Dr-Ing. Eka Sediadi	UTM, Malaysia
Dr. Feng Yang	Tongji University, PR China
Dr. Agung Murti Nugroho	University of Brawidjaya, Indonesia
Dr. Rahmi Andarini	ITS, Indonesia
Prof. Dr. Abraham L. Kitaro	UPN, Indonesia
Dr. Arifudin Idrus	UGM, Indonesia
Prof. Akirai Imai, Ph.D	Akita University, Japan
Dr. Bambang Priadi	ITB, Indonesia
Prof. Prio Suprobo	ITS, Indonesia
Ir. Ekaputra, M.Eng., Ph.D	UGM, Indonesia
Prof. Gunawan Tjahyono, Ph.D	UI, Indonesia
Dr. Jumain Appe, M.Sc	BPPT, Indonesia
Prof. Sofia W. Alisyahbana	Universitas Bakrie, Indonesia
Prof. Dr. Daniel M. Rosyid	ITS, Indonesia
Prof. Dr. I Ketut B. Aryana	ITS, Indonesia
Prof. Dr. Adi Maimun	UTM, Malaysia
Prof. Dr. Soenaryo	UI, Indonesia
Prof. Dr.-Ing. Nandy S.J. Putra	UI, Indonesia
Prof. Dr. Imam Reksowardoyo	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Keigo Watanabe	Okayama University, Japan
Prof. Dr. Okamura Mitsu	Ehime University, Japan
Prof. Satrio S. Brodjonegoro	ITB, Indonesia



Kata Pengantar Redaksi

Assalamu Alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh
Salam Hormat,

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, Jurnal Penelitian Enjiniring (JPE) Volume 25 Nomor 1 bulan Mei tahun 2021 telah dapat diterbitkan. Mulai edisi kali ini, tim redaksi memutuskan untuk mengurangi jumlah makalah yang diterbitkan agar proses penerbitan dapat lebih fokus sehingga kualitas makalah yang diterbitkan akan dapat juga meningkat. Selain meningkatkan kualitas proses penerbitan, tim redaksi juga tetap mempertahankan tahapan dan proses pengeditan makalah yang telah dilakukan sebelumnya seperti penggunaan software pengelolaan referensi Mendeley sehingga referensi dalam setiap makalah dapat ditampilkan sesuai standar/aturan penulisan dan memudahkan untuk dikenali oleh pengindeks.

Edisi pertama di tahun 2021 ini berisi 9 (sembilan) makalah yang membahas berbagai macam topik yang menarik dan mutakhir dalam bidang ilmu. Makalah pertama melakukan analisa potensi penyebab kerusakan tongkat kemudi kapal Sabuk Nusantara. Makalah kedua melakukan studi eksperimental dari tekanan pada jaringan perpipaan. Selanjutnya makalah ketiga mempunyai topik yang agak berbeda yakni tentang waktu dengung Masjid Besar Al-abrar, Makassar. Makalah berikutnya melakukan optimasi layanan air baku dan irigasi embung Kawari yang berada di kabupaten Jeneponto.

Makalah kelima menyelidiki tentang pengaruh kemiringan stuktur pelat segitiga terhadap kecepatan gesek dasar pada saluran terbuka. Dilanjutkan dengan makalah yang melakukan studi eksperimental kecepatan aliran *slurry* pada saluran tertutup. Makalah selanjutnya masih membahas tentang keairan yakni tentang analisa kehilangan air irigasi saluran sekunder pada daerah irigasi Dakaino. 2 (dua) makalah terakhir membahas tentang biaya disposal PET 97 menggunakan metode *High and Low* di PT. Vale Indonesia, Tbk. dan kajian kebutuhan material pada konstruksi lambung kapal Phinisi.

Tim redaksi berharap agar makalah-makalah yang terbit di edisi kali ini dapat memberikan manfaat yang lebih baik lagi dalam pengembangan dan penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada para penulis yang telah berkontribusi dan juga semua pihak yang telah membantu dalam penerbitan jurnal edisi ini.

Salam Hangat

TIM REDAKSI



DAFTAR ISI

Staf Redaksi	ii
Dewan Penilai Karya Ilmiah	iii
Kata Pengantar Redaksi	iv
Daftar Isi	v
Analisis Potensi Penyebab Kerusakan Tongkat Kemudi Kapal Sabuk Nusantara <i>Andi Ahmad Zafwan Abubakar, Ganding Sitepu, Suandar Baso</i>	1-7
Studi Eksperimental Tekanan Jaringan Perpipaan <i>Siti Hardiyanti Rahma, Mukhsan Putra Hatta, Bambang Bakri, Sulhairi Sulhairi</i>	8-20
Waktu Dengung Ruang Ibadah Masjid Besar Al-Abrar Makassar <i>Siti Amaliyah Mustafa Kamal, Asniawaty Asniawaty, Muhammad Taufik Ishak</i>	21-29
Optimasi Layanan Air Baku dan Irigasi Embung Kawari Kabupaten Jeneponto <i>Muh Nur Asri Amin, Farouk Maricar, Mukhsan Putra Hatta</i>	30-36
Pengaruh Kemiringan Struktur Plat Segitiga terhadap Kecepatan Gesek Dasar pada Saluran Terbuka <i>Yunarto Rombebunga, Rita Tahir Lopa, Bambang Bakri</i>	37-47
Studi Eksperimental Kecepatan Aliran Slurry pada Saluran Tertutup <i>Muhammad Taufiq Akbar, Sulhairi Sulhairi, Muhammad Arsyad Thaha, Bambang Bakri</i>	48-58
Analisis Kehilangan Air Irigasi Saluran Sekunder pada Daerah Irigasi Dakaino <i>Irvan Hamid, Muhammad Saleh Pallu, Mukhsan Putra Hatta</i>	59-70
Estimasi Biaya Disposal PET 97 DP Menggunakan Metode <i>High and Low</i> di PT Vale Indonesia Tbk, Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan <i>Muhammad Abdi Dzil Ikram, Aryanti Virtanti Anas, Rizki Amalia</i>	71-76
Kajian Kebutuhan Material pada Konstruksi Lambung Kapal Phinisi <i>Alamsyah Alamsyah, Muhammad Uswah Pawarah, Anggoronadhi Dianiswara</i>	77-84



Analisis Potensi Penyebab Kerusakan Tongkat Kemudi Kapal Sabuk Nusantara

Andi Ahmad Zafwan Abubakar*¹, Ganding Sitepu¹, Suandar Baso¹

¹Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: ahmad.zafwan@yahoo.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.01

Abstrak

Kapal Sabuk Nusantara adalah jenis Kapal Perintis yang merupakan kapal pengangkut barang dan penumpang yang diklaskan menurut BKI ini mengalami masalah pada sistem kemudinya terutama pada bagian tongkat kemudi beberapa kapal yang ditemukan mengalami kerusakan bahkan terlepas dan hilang dari porosnya selama proses pelayarannya sehingga perlu dianalisis. Metode analisis yang digunakan adalah simulasi kuantitatif untuk mendeskripsikan perbandingan kekuatan struktur, material dan analisis kekuatan, cacat produksi serta beban insidental yang terjadi pada tongkat kemudi kapal Perintis Sabuk Nusantara di mana proses identifikasi masalah menggunakan Fishbone Diagram. Hasil yang didapatkan adalah kerusakan tongkat kemudi yang terjadi dikarenakan beberapa potensi kerusakan pada tongkat kemudi seperti material tidak standar, temuan cacat pada material karena kegagalan produksi dan beban insidental berupa kapal kandas, hantaman kayu serta terlilit tali pada saat proses mooring rope.

Abstract

Investigation of Potential Causes of the Rudder Stock Damage on Sabuk Nusantara Vessel. Sabuk Nusantara Vessel is a Pioneer Ship type which is a freighter and passenger ship classified by BKI. Several ships experienced problems with their rudder system, especially on the rudder stock, some of them were found to be damaged and even detached and lost during their voyage. Therefore, the cause of the damage should be investigated. Here, the potential sources of the damage are investigated using an analytical method. It used a quantitative simulation to describe the comparison of structural strength, material and strength analysis, manufacturing defects, and incidental loads that occur on the rudder stock of the ships. A cause-effect diagram which is often called Fishbone has been applied as the tool of the problem identification process. The results obtained is that the damage to the rudder stock occurred due to several potential sources on the rudder stock such as non-standard materials, defects in the material due to production failures, and incidental loads including a ship running aground, hitting wood, and being entangled in the rope during the mooring process.

Kata Kunci: Fishbone diagram, kapal perintis, potensi kerusakan, Sabuk Nusantara, tongkat kemudi

1. Pendahuluan

Angkutan laut merupakan salah satu sarana yang memiliki peran penting dalam sistem transportasi laut dalam mendukung pembangunan nasional di bidang perekonomian, sosial budaya, politik dan pertahanan keamanan. Salah satu jenis pelayanan transportasi laut yang dapat menghubungkan daerah tertinggal atau wilayah terpencil adalah pelayaran perintis [1].

Pemerintah RI dalam meningkatkan konektivitas nusantara mulai mengembangkan konsep Tol laut dimana konsep tersebut bertujuan memperbaiki proses pengangkutan logistik. Sehingga diharapkan proses distribusi barang (terutama bahan pangan) di Indonesia menjadi semakin mudah. Kemudian, berdampak pada harga bahan pokok yang semakin merata di seluruh wilayah Indonesia [2]. Tentunya kapal

yang digunakan untuk melintasi tol laut adalah kapal yang mampu melintasi laut dengan jarak yang cukup jauh. Salah satu jenis kapal yang dibangun dalam rangka mewujudkan program tersebut adalah kapal jenis Perintis [3].

Pembangunan Kapal Sabuk Nusantara yang merupakan jenis kapal perintis menjadi salah satu bagian dari program tol laut mulai dibangun untuk memenuhi dan menggantikan kapal swasta yang beroperasi di trayek keperintisan di Indonesia, guna memenuhi kebutuhan masyarakat terhadap pelayanan angkutan laut. Kapal-kapal perintis ini prioritasnya akan ditempatkan di pulau terluar dan daerah tertinggal [4].

Perkembangan teknologi maritim saat ini, khususnya di bidang perkapalan dituntut untuk meningkatkan kemampuan manuver kapal agar meminimalkan resiko kecelakaan dan



meningkatkan kemampuan kapal, terutama jenis kapal yang mengutamakan kecepatan dan kelincihan saat adanya gaya tambahan dari daun kemudi [5]. Ketika *rudder* (kemudi) berputar membentuk sudut tertentu maka ada perubahan tekanan, kecepatan dan arah aliran fluida, hal inilah yang menyebabkan perubahan arah kapal [6].

Kapal Perintis yang merupakan kapal pengangkut barang dan penumpang yang diklasikan menurut BKI ini mengalami masalah pada sistem kemudinya. Beberapa kapal perintis ditemukan mengalami kerusakan kemudi bahkan terlepas/hilang dari porosnya selama proses pelayarannya. Gambar 1 didapatkan informasi bahwa Kapal Perintis Sabuk Nusantara mengalami masalah kerusakan pada kemudinya. Kondisi ini dirasa perlu untuk mengkaji lebih dalam masalah sistem kemudi pada kapal perintis Sabuk Nusantara ini yang akan dianalisis potensi penyebab kerusakannya.



Gambar 1. Kemudi terlepas / hilang selama pelayaran (Dok. PT. IKI)

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Sistem Kemudi Kapal

Daun kemudi pada awalnya dibuat dari pelat tunggal dan penegar-penegar yang dikeliling pada bagian sisi pelat. Jenis kemudi ini sekarang sudah diganti dengan bentuk kemudi pelat ganda, terutama pada kapal-kapal yang berukuran relatif besar. Kemudi pelat ganda terdiri atas lembaran pelat ganda dan di dalamnya berongga, sehingga membentuk suatu garis aliran yang baik (*streamline*), yang bentuk penampangnya seperti sayap (*foil*) [7].

2.2. Tongkat Kemudi Kapal

Poros kemudi atau sumbu kemudi pada umumnya dibuat dari bahan baja tuang atau baja tempa. Garis tengah poros ditentukan berdasarkan hasil perhitungan, agar mampu menahan beban puntiran atau beban lenturan yang terjadi pada kemudi. Tongkat kemudi dipasang menembus lambung dalam selubung tongkat. Hal ini untuk menjamin kekedapan dari air laut.

Pada bagian atas, poros kemudi dihubungkan dengan instalasi penggerak kemudi dan bagian bawah dihubungkan dengan daun kemudi melalui kopling mendatar atau kopling tegak. Tongkat kemudi ada yang direncanakan memiliki satu bantalan atau dua bantalan, bergantung pada panjang tongkat dan sistem peletakan daun kemudi. Bantalan tongkat kemudi hanya ada pada bagian atas baja atau pada keduanya, atas dan bawah. Sebagian bahan bantalan, dapat dipakai bahan baja anti karat, bahan logam, kayu pok, atau bahan sintesis [8].

2.3. Beban yang Bekerja pada Rudder

Aliran fluida pada lambung kapal yang tercelup air sebelum mengenai daun kemudi pada dasarnya adalah simetris. Arah kapal tidak berubah karena aliran yang dihasilkan saling menyeimbangkan satu sama lain. Oleh karena itu untuk merubah arah kapal dibutuhkan gaya tambahan, yaitu gaya pada daun kemudi. Dengan adanya daun kemudi yang membentuk arah fluida dengan sudut α pada kecepatan yang konstan maka muncullah gaya pada daun kemudi yang tidak simetris. Gaya ini disebut gaya kemudi, gaya inilah yang menyebabkan perubahan arah haluan kapal.

Gaya kemudi merupakan resultan dari *drag force* dan *lift force*. Istilah *lift* digunakan pada analisa gaya ke atas suatu *foil aerodynamic*, maka dari itu dinamakan gaya *lift* (angkat) sebab umumnya *foil aerodynamic* digunakan untuk mengangkat pesawat. Namun istilah *lift force* juga digunakan pada menganalisa gaya suatu foil kemudi untuk membelokkan kapal ke arah samping. Sedangkan *drag force* merupakan gaya pada kemudi yang arahnya berlawanan dengan arah laju kapal [9].

2.4. Fishbone Diagram

Fishbone Diagrams (Diagram Tulang Ikan) merupakan konsep analisis sebab akibat yang dikembangkan oleh Dr. Kaoru Ishikawa untuk mendeskripsikan suatu permasalahan dan penyebabnya dalam sebuah kerangka tulang ikan. *Fishbone Diagrams* juga dikenal dengan istilah diagram Ishikawa, yang diadopsi dari nama seorang ahli pengendali statistik dari Jepang, yang menemukan dan mengembangkan diagram ini pada tahun 1960-an.

Diagram *Fishbone* didefinisikan sebagai alat yang menggambarkan sebuah cara yang sistematis dalam memandang berbagai dampak atau akibat dan penyebab yang membuat atau berkontribusi dalam berbagai dampak tersebut. Oleh karena fungsinya tersebut, diagram ini biasa disebut dengan diagram sebab-akibat [10].

3. Metode Penelitian

Jenis penelitian ini adalah simulasi kuantitatif untuk mendeskripsikan perbandingan kekuatan struktur, material dan analisis kekuatan pada kemudi (rudder) kapal Perintis Sabuk Nusantara di mana data yang digunakan adalah jenis data yang dirancang berdasarkan aturan yang berlaku pada prinsip pembangunan struktur kemudi (*Rudder*). selain itu data pada penelitian ini berupa data pendekatan dari fenomena data yang ada dilapangan.

Langkah – langkah yang akan dilakukan pada proses analisis ini adalah sebagai berikut:

1) Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan publikasi ilmiah dari literatur yang relevan untuk dijadikan acuan dalam penelitian ini. Literatur berupa buku dan jurnal penelitian yang berhubungan dengan penelitian ini.

2) Identifikasi Masalah dan Analisis

Identifikasi masalah merupakan langkah awal dalam menangkap fenomena yang berpotensi untuk diteliti. Langkah selanjutnya yang mendesak adalah mengidentifikasi masalah dari fenomena yang diamati tersebut. Identifikasi masalah yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Fishbone Diagram [11].

Identifikasi Masalah dilakukan dengan metode brainstorming. Penyebab permasalahan dapat dikelompokkan dalam enam kelompok yaitu materials (bahan baku), machines and equipment (mesin dan peralatan), manpower (sumber daya manusia), methods (metode),

mother nature/environment (lingkungan), dan measurement (pengukuran) [12]. Pengelompokkan penyebab masalah menjadi tujuh yaitu manpower (SDM), machines (mesin dan peralatan), methods (metode), materials (bahan baku), media, motivation (motivasi), dan money (keuangan). Kelompok penyebab masalah ini ditempatkan di Diagram Fishbone pada sirip ikan [13].

3) Studi Regulasi dan Literatur

Hasil analisis dari identifikasi masalah kemudian dikaji berdasarkan regulasi dan literatur yang ada. Regulasi dan literatur yang dikumpulkan ini dijadikan dasar dalam penentuan persentasi potensi penyebab kerusakan.

4. Pembahasan

4.1. Material Tidak Standar

Kinerja rantai pasok diindikasikan dengan kualitas, harga dan performa pengiriman material. Kinerja rantai pasok dikatakan baik dari segi pengiriman apabila mampu mendatangkan material dalam waktu, jumlah dan kualitas yang tepat sesuai dengan kebutuhan dan jadwal produksi.

Hambatan akibat tidak tersedianya material menyebabkan tertundanya pekerjaan - pekerjaan yang telah dijadwalkan. Jika kedatangan material yang diperlukan tidak sesuai jadwal pengadaan material, akan menyebabkan tenaga kerja tersebut menganggur sehingga biaya pengeluaran akan membengkak serta terlambatnya waktu penyelesaian pembangunan kapal. Pada umumnya setiap pembangunan kapal baru meliputi kegiatan – kegiatan yang kompleks, yang mana melibatkan berbagi aktivitas dan operasi. Kegiatan pengadaan material memerlukan perencanaan dan pengendalian yang baik mengingat besarnya persentasi biaya material terhadap total biaya proyek. Sehingga bila penanganan material yang kurang efektif akan mengakibatkan kerugian waktu, biaya maupun mutu.

Material yang dipesan terkadang tidak sesuai dengan spesifikasi yang diminta oleh tim produksi, hal ini disebabkan karena adanya miskomunikasi antara tim produksi dengan tim purchasing order (tim gudang). Pemesanan Rudder Stock Kapal Sabuk nusantara dalam rangka pembangunan kapal baru harus disesuaikan dengan standar material yang



dipersyaratkan oleh BKI. Dalam pembuktian sebuah material yang sesuai standar harus memiliki sertifikat material yang dibuktikan dengan stamp langsung dari BKI.



Gambar 2. Stamp BKI pada rudder stock

4.2. Kekuatan Struktur

Kekuatan struktur kemudi dipengaruhi oleh beban yang bekerja pada poros kemudi. Adapun beban yg bekerja pada poros kemudi adalah gaya kemudi (gaya akibat aliran fluida), berat rudder, momen torsi mesin. Mengacu pada hasil penelitian skripsi “Analisis Kerusakan Sistem Kemudi Kapal Perintis Sabuk Nusantara” telah disimpulkan hasil pengujian beban yang bekerja pada tongkat kemudi kapal sabuk Nusantara dengan menggunakan metode Ansys dimana penelitian ini menggunakan penambahan variasi beban pada gaya kemudi 20% - 100% berdasarkan rumus BKI Vol. II, Chapter 14 [14].

Data dalam penelitian ini diperoleh dari data sekunder yang berasal dari galangan PT. Dok Bahari Nusantara (DBN). Data ukuran utama dan lainnya dapat dilihat pada Tabel 1 - 2.

Tabel 1. Data umum kapal

Nama Kapal	Sabuk Nusantara 40
DWT	500 ton
Kecepatan	12 knot

Tabel 2. Data ukuran utama kapal

Panjang	51,80 m
Lebar	10,40 m
Sarat	2,85 m
Tinggi	4,20 m

Tabel 3. Data poros kemudi

Diameter atas	213 mm
Diameter bawah	175 mm
Panjang	2640 mm
Tinggi	4,20 m

4.2.1. Gaya Kemudi

Gaya kemudi ditentukan menurut rumus berikut (BKI Vol II, Chapter 14) [15].

$$CR = 132 \cdot A \cdot v^2 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_t \text{ [N]} \quad (1)$$

Tabel 4. Variasi beban gaya kemudi

Kondisi	Gaya Kemudi (N)
Existing	110473,10
20%	132567,73
40%	154662,35
Variasi 60%	176756,97
80%	198851,59
100%	220946,21

Berdasarkan rumus tersebut, maka diperoleh gaya kemudi sebesar 110473,10 N yang searah dengan aliran air akibat perputaran propeller. Variasi beban dapat dilihat pada Tabel 4.

4.2.2. Berat Poros dan Daun Kemudi

Beban yang ditanggung oleh poros kemudi adalah berat daun kemudi dan berat poros itu sendiri.

Data daun kemudi :

Volume = 0,1305 m³ (berdasarkan model daun kemudi)
 Density = 7700 kg/m³ (material baja)
 Massa = Volume x Density
 = 1004,5 kg

Berat daun kemudi dapat diperoleh dengan rumus berikut:

W = Massa x g
 = 1004,5 kg x 9,8 m/s²
 = 9843,75 N

Data poros kemudi:

Volume = 0,0905 m³ (berdasarkan model daun kemudi)
 Density = 7700 kg/m³ (material baja)
 Massa = Volume x Density
 = 697,23 kg

Berat poros kemudi dapat diperoleh dengan rumus berikut:

W = Massa x g
 = 697,23 kg x 9,8 m/s²
 = 6833 N

Maka, berat total yang ditanggung oleh poros kemudi yaitu sebesar 16677,61 N



4.2.3. Momen Torsi Poros Kemudi

Momen torsi dapat diperoleh dari data General Arrangement Steering Gear AM-SG-20 KN dimana kemudi menghasilkan torsi maksimum sebesar 20 kN.m.

4.2.4. Spesifikasi Material Poros Kemudi

Material yang digunakan untuk konstruksi poros kemudi adalah baja S45C dengan properti material dapat dilihat pada Tabel 5 dan material bearing bronze menggunakan rubber bearing dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5. Material properties S45C

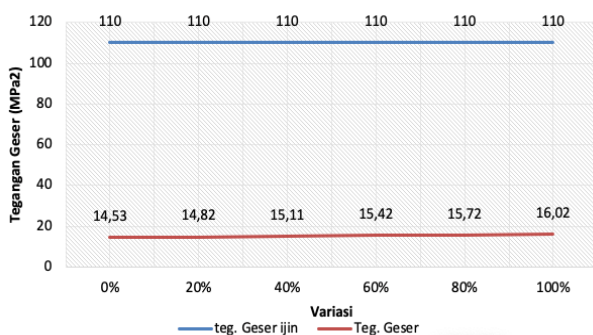
Deskripsi	Nilai
Density (kg/m ³)	7700
Young's Modulus (Gpa)	190
Tensile Strength (MPa)	569
Yield Strength (MPa)	343
Poisson's ratio	0,27

Tabel 6. Material properties bearing bronze

Deskripsi	Nilai
Young's Modulus (GPa)	100
Tensile Strength (MPa)	240
Yield Strength (MPa)	125
Poisson's ratio	0,34

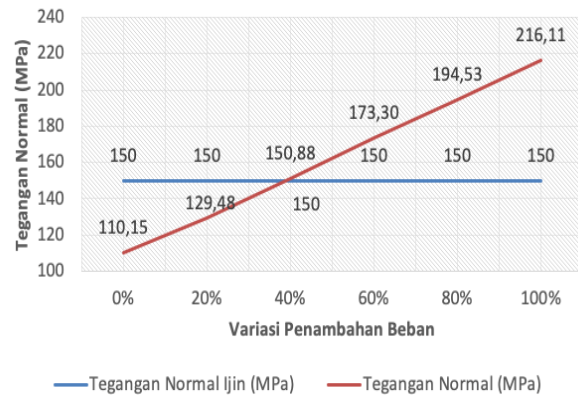
4.2.5. Hasil Analisa Software Ansys

Menurut hasil analisa Ansys yang diuji oleh Anisa dalam skripsinya, dengan menggunakan "Tegangan Geser, Tegangan Normal, dan Tegangan Von-Mises" memperlihatkan bahwa design konstruksi dan material dari rudder stock tidak ada masalah atau ketidaksesuaian antara model rudder, bahan atau torsi mesin. Dibuktikan dari perhitungan Gaya Kemudi yaitu 110,473 kN sesuai dengan uji pada Ansys berada d bawah tegangan izin.

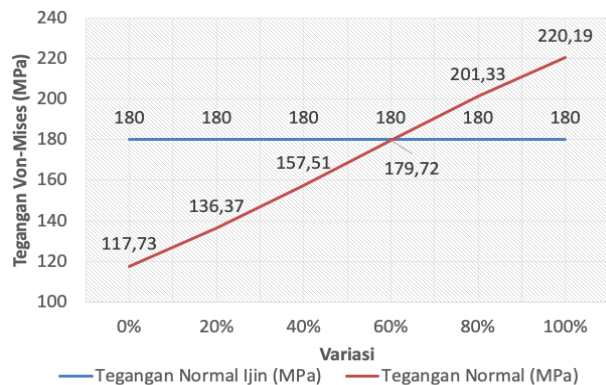


Gambar 3. Perubahan tegangan geser keadaan existing dan setiap variasi penambahan beban [14]

Baru pada saat penambahan beban yang bervariasi antara 20% - 100% dari gaya kemudi, rudder stock yang diuji melewati tegangan izin. Yaitu hanya boleh penambahan 20% beban gaya kemudi untuk Tegangan Normal, dan penambahan 60% beban gaya kemudi untuk Tegangan Von-Mises, sedangkan untuk Tegangan gesernya masih di bawah tegangan izin sekalipun penambahan 100% beban gaya kemudi.



Gambar 4. Perubahan tegangan normal keadaan existing dan setiap variasi penambahan beban



Gambar 5. Perubahan tegangan von-Mises keadaan existing dan setiap variasi penambahan beban

4.3. Cacat Produksi

Cacat produksi pada rudder stock dipengaruhi oleh system pengelasan yang diterapkan. Penerapan teknologi las dalam konstruksi bangunan kapal selalu melibatkan pihak Klasifikasi, dimana semua hal yang berkaitan dengan gambar-gambar, ukuran las, material induk dan meterial pengisi serta juru las yang digunakan untuk pembangunan kapal diatur dalam peraturan Klasifikasi.

Untuk dapat melakukan pengelasan sesuai dengan persyaratan dan prosedur pengelasan, seorang juru las harus mengetahui gambar dan standar kerja pengelasan sesuai dengan peraturan

tentang klasifikasi dan konstruksi serta gambar kerja atau standar kerja yang berisi tentang perencanaan dan jenis sambungan las yang disetujui oleh Badan Klasifikasi sebelum pekerjaan pengelasan.

Badan klasifikasi tidak membenarkan suatu produksi pengelasan dilaksanakan sebelum prosedur pengelasan (Welding Procedure) yang akan digunakan diuji dan lulus atau sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan sesuai kapal yang akan dibangun. Juru las dan operator las yang telah diuji dan lulus sesuai peraturan / perundang-undangan dari code, standar maupun badan klasifikasi kapal yang dapat diperbolehkan melakukan pengelasan konstruksi utama kapal.

Kenyataan di lapangan PT. IKI telah memiliki aproval dalam pekerjaan pengelasan kapal namun tidak memiliki prosedur khusus terkait pengelasan Rudder Stock. Prosedur pengelasannya mengacu pada prosedur pengelasan Las Lambung Kapal.



Gambar 6. Metode pengelasan dengan perlakuan panas pada material

Dalam praktik pengelasan memberlakukan teknik perlakuan panas yang tentu akan mempengaruhi kondisi material Rudder Stock. Perlakuan panas yang dimaksud adalah penambahan penahan berupa logam untuk menahan lasan agar tetap sesuai presisi.

4.4. Beban Insidental

Kapal yang berlayar cenderung mengalami situasi yang tidak normal atau situasi darurat yang mengancam keselamatan kapal. Situasi darurat yang memiliki potensi menyebabkan kerusakan tongkat kemudi kapal seperti kandas, terlilit tali dan hantaman kayu. Situasi tersebut biasanya bersifat khusus atau insidental.

4.4.1. Kandas

Beberapa faktor yang menyebabkan kapal kandas, salah satunya kapal dalam kondisi mati

mesin dan terhempas ombak sehingga keluar jalur dan akhirnya terbawa sampai ke perairan dangkal. Ketika kapal kandas, bagian yang memijak daratan adalah body kapal, tidak secara langsung mengenai rudder. Kecuali Propeller menghantam karang dan serpihan karang atau pecahan propeller mengenai dan merusak rudder kapal. Atau kondisi kapal kandas dalam posisi trim by stern di mana kapal tidak menggunakan sepatu kemudi yang bisa terjadi tubrukan langsung pada daerah rudder yang berakibat patahnya kemudi dan poros kemudi.

Kondisi mati mesin kapal yang menyebabkan kandas dan menimbulkan adanya potensi kerusakan berupa tongkat kemudi patah biasa terjadi karena kelalaian crew kapal yang bertugas dalam mengoperasikan mesin kapal.

4.4.2. Terlilit tali

Rudder terlilit tali kasusnya saat kapal sedang menarik atau menambat dan sebagian tali atau ujung tali terjatuh ke laut di sekitar area buritan. Tali yang terjatuh kemudian terhisap masuk ke bottom kapal akibat putaran propeller dan akhirnya tersangkut dan melilit propeller dan rudder kapal.

Rudder kapal yang terlilit tali akan menyebabkan beban kerja yang diterima oleh rudder di luar dari kemampuan kekuatan struktur tongkat kemudi dan berpotensi menyebabkan kerusakan berupa patahnya tongkat kemudi dikarenakan menahan beban yang diluar dari desain konstruksinya. Tali yang terjatuh dan melilit rudder merupakan bentuk dari kelalaian crew dalam melakukan proses tambat kapal.

4.4.3. Hantaman Kayu

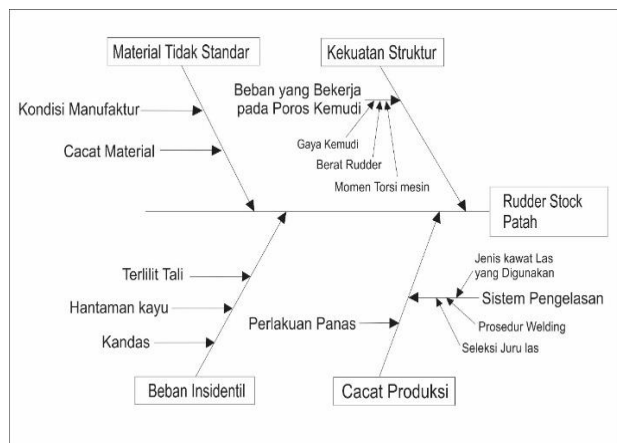
Terkena hantaman kayu atau benda eksternal (unidentification underwater object), bisa terjadi saat berlayar di rute perintis. Kondisi kedalaman sungai yang bervariasi, pasang surut air laut dan kondisi bawah air yang memungkinkan membawa benda-benda yang terus bergerak, atau sisa kapal - kapal yang karam yang kemudian terbawa arus bawah air yang menumpuk dan menjadi sampah bawah air. Bisa juga sisa betonisasi yang sdh lama dan terendam air atau hancur menjadi benda konkret yang tenggelam.

Potensi kerusakan tongkat kemudi akibat hantaman kayu dapat terjadi apabila terjadi kesalahan rute kapal. Pengenalan medan rute kapal penting dalam pelayaran.



4.5. Fishbone diagram Potensi Kerusakan

Penjabaran Fishbone diagram Potensi kerusakan tongkat kemudi berdasarkan hasil pembahasan yang telah dijelaskan tertuang dalam Gambar 7. Dengan membagi Kelompok Penyebab yang terdiri dari Material Standar, Kekuatan Struktur, Cacat Produksi dan Beban Insidental maka tiap kelompok penyebab memiliki total persentase 25%. Total persentase tersebut kemudian terbagi berdasarkan jumlah penyebab dalam tiap kelompok tersebut.



Gambar 7. Fishbone diagram hasil pengamatan

Analisis Potensi Penyebab Kerusakan Tongkat Kemudi dapat diketahui besaran persentase tiap-tiap kelompok penyebab dalam Tabel 7.

Tabel 7. Besaran persentase kelompok penyebab

No	Kelompok Penyebab	Persentase
1	Material tidak standar	25%
2	Kekuatan struktur	0
3	Cacat produksi	18.75%
4	Beban Insidental	25%

5. Kesimpulan

Analisis potensi Kerusakan tongkat kemudi yang terjadi pada kapal Sabuk Nusantara telah dilakukan dalam penelitian ini, ada beberapa faktor yang diidentifikasi menjadi penyebab kerusakan tersebut yaitu; pertama, material tongkat tongkat kemudi tidak standar dibuktikan dengan ketiadaan sertifikat kelayakan dari lembaga klasifikasi. Kemudian, temuan cacat material melalui prosedur NDT, selanjutnya terdapat cacat produksi yang diakibatkan oleh prosedur pengelasan yang tidak sesuai standar dan juru las yang tidak kompeten. Dan faktor

terakhir adalah Beban insidental berupa kandas, hantaman kayu dan terlilit tali yang terjadi karena kesalahan rute pelayaran serta kesalahan prosedur dalam operasi *mooring lines* secara langsung maupun tidak langsung juga karena adanya faktor cuaca buruk.

Referensi

- [1] E. Wahyono, Y. B. Tangkilisan, and D. Marihandono, "Pelayaran Perintis dalam Perspektif Sejarah Pembangunan Kawasan Tertinggal dan Terluar untuk Memperkuat Kedaulatan NKRI," in *Seminar Nasional Riset Inovatif II*, 2014.
- [2] D. D. Andilas and L. A. Yanggana, "Pelaksanaan Program Tol Laut Pelayaran Nasional Indonesia," *J. Manaj. Transp. Dan Logistik*, vol. 4, no. 1, p. 1, 2017.
- [3] G. Andannyo and W. D. Aryawan, "Desain Ulang Kapal Perintis 200 DWT untuk Meningkatkan Performa Kapal," *J. Tek. POMITS*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [4] R. D. J. Riyanto, Makmur Syam, Mirdin, Muh. Rifani, "Analisis Umur Ekonomis Dan Umur Teknis Kapal Penumpang Milik Pt. Pelayaran Nasional Indonesia (Persero)," *J. Venus*, vol. 07, no. 14, 2019.
- [5] B. J. Belalawe, "Analisis Variasi Posisi Rudder Terhadap Efektivitas Manuver Kapal," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [6] A. F. R. Prabowo *et al.*, "Analisa Kekuatan Poros Kemudi Kapal Penampung Ikan Tradisional 200 Gt Kabupaten Batang Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 3, pp. 538–548, 2016.
- [7] Harold Eugene Saunders, *Hydrodynamics in Ship Design. Author's Notes. Vol. III*. SNAME, 1965.
- [8] I. K. Jaya, *Teknik Konstruksi Kapal Baja jilid 2*. Jakarta: Depatemen Pendidikan nasional, 2008.
- [9] A. F. Molland and S. R. Turnock, *Windtunnel Investigation of the Influence of propeller loading on ship rudder performance. Ship Science Report No.46*. UK: University of Southampton, 1991.
- [10] G. Watson, "The Legacy Of Ishikawa," *Qual. Prog.*, vol. 37, no. 4, pp. 54–57, 2004.
- [11] G. Ilie and C. N. Ciocoiu, "Application of Fishbone Diagram to Determine The Risk Of An Event with Multiple Causes," *Manag. Res. Pract.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–20, 2010.
- [12] A. J. Scavarda, T. Bouzdine-Chameeva, S. M. Goldstein, J. M. Hays, and Arthur V. Hill., "A review of the causal mapping practice and research literature," in *Second World Conference*, 2004, pp. 612–624.
- [13] G. Vincent and A. Fontana, *Lean Six Sigma for Manufacturing and Service Industries*. Bogor: Penerbit Vinchristo Publication, 2011.
- [14] A. F. Ramadhani, "Analisis Kerusakan Sistem Kemudi Kapal Perintis Sabuk Nusantara," Universitas Hasanuddin, 2021.
- [15] Biro Klasifikasi Indonesia, "Rules For Hull Volume II," Jakarta, 2009.



Studi Eksperimental Tekanan Jaringan Perpipaan

Siti Hardiyanti Rahma^{1*}, Mukhsan Putra Hatta¹, Bambang Bakri¹, Sulhairi¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km.6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: sthardiyantirahma@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.02

Abstrak

Tekanan aliran adalah salah satu faktor penting dalam pengaliran air dalam pipa. Bila tekanan rendah, maka akan menimbulkan masalah dalam pendistribusian jaringan pipa. Namun bila tekanan terlalu besar akan menyebabkan kehilangan energi. Selain itu, dalam instalasi jaringan pipa akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti kecepatan aliran, perubahan dimensi pipa dan adanya belokan, serta perubahan kekasaran material pipa. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan. Tujuan penelitian ini yaitu menganalisis seberapa besar pengaruh parameter aliran terhadap tekanan dalam jaringan perpipaan dan mendapatkan hubungan parameter tak berdimensi pada jaringan perpipaan. Penelitian ini menggunakan penelitian eksperimen yang dilaksanakan di laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin di Gowa. Karakteristik sampel air yang digunakan adalah density (ρ) 1.000 kg/m³, viskositas kinematik 0,804 x 10⁻⁶ m²/det, viskositas dinamik (μ) 0,801 x 10⁻³ Kg/m.s, nilai viskositas (kekentalan) 8,5x10⁻⁷ m²/det, dan berat jenis (γ) 1,00355 gr/cm³, serta suhu 29,5°C untuk menunjukkan bahwa properties/karakteristik sampel air yang telah disebutkan dipengaruhi oleh suhu. Variasi debit yang digunakan ada 3 yaitu Q1= 0,004 m³/det, Q2 =0,003m³/det dan Q3 = 0.002 m³/det serta variasi tinggi jatuh (*head*) H1 = 0,5 meter, H2 = 1 meter, dan H3 = 2 meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh parameter aliran terhadap tekanan dalam jaringan perpipaan bahwa semakin tinggi debit maka tekanannya juga meningkat. Hal ini disebabkan karena kecepatan dan Bilangan Reynold juga meningkat. Sedangkan pengaruh *headloss*, semakin tinggi *headloss* maka tekanan semakin rendah karena semakin jauh titik pengamatannya sehingga terjadi kehilangan energi (*major losses* dan *minor losses*). Hubungan parameter non dimensional dari semua parameter menunjukkan hubungan yang sangat signifikan antara P dari hasil pengukuran dan P empiris.

Abstract

Experimental Study of Pipeline Network Pressure. Flow pressure is one of the important factors in the water flow in pipes. If the pressure is low, it will cause problems in the distribution of the pipeline network. However, if the pressure is too large, it will cause a loss of energy. In addition, in the installation of pipelines there will be flow resistance caused by factors of the pipeline installation itself such as flow velocity, changes in pipe dimensions and the presence of bends, as well as changes in the roughness of the pipe material. The flow resistance will cause a decrease in energy and pressure. The purpose of this study is to analyze how much effect the flow parameter has on the pressure in the piping network and obtain dimensionless parameter relationships in the piping network. This study uses experimental research conducted in the Hydraulics laboratory of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Hasanuddin in Gowa. The characteristics of the water samples used are density (ρ) 1,000 kg/m³, kinematic viscosity 0.804 x 10⁻⁶ m²/s, dynamic viscosity (μ) 0.801 x 10⁻³ Kg/m.s, viscosity value (thickness) 8.5x10⁻⁷ m²/s, and specific gravity (γ) 1.00355 gr/cm³, at water temperature of 29.5°C. There are 3 discharge variations used, namely Q1 = 0.004 m³/s, Q2 = 0.003m³/s and Q3 = 0.002 m³/s and variations in head fall H1 = 0.5 meters, H2 = 1 meter, and H3 = 2 meters. The results show that the effect of flow parameters on the pressure in the piping network is that the higher the discharge, the higher the pressure. This is due to the increasing of speed and Reynolds number. Meanwhile, on the effect of headloss, the higher the headloss, the lower the pressure because the farther the observation point is, thus resulting in energy loss (major losses and minor losses). The non-dimensional parameter relationship of all parameters shows a very significant relationship between P from the measurement results and empirical P.

Kata Kunci: Tekanan, debit, tinggi jatuh (*head*), kehilangan energi

1. Pendahuluan

Sistem pendistribusian air menggunakan pipa merupakan salah satu alternatif yang memiliki beberapa keuntungan. Keuntungan tersebut diantaranya adalah air mudah diukur dan dikontrol, kualitas air dalam penyaluran tidak tercemar, kehilangan air karena rembesan dapat

dihilangkan, evaporasi sewaktu penyaluran dapat diperkecil, serta mudah dalam operasi dan pemeliharaan

Kebutuhan air yang harus dipenuhi akan menentukan tipe dan ukuran sistem distribusi jaringan pipa yang diinginkan. Bila tekanan rendah, maka akan menimbulkan masalah dalam



pendistribusian jaringan pipa. Namun bila tekanan terlalu besar akan menyebabkan kehilangan energi. Selain itu, dalam instalasi jaringan pipa akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti kecepatan aliran, perubahan dimensi pipa dan adanya belokan, serta perubahan kekasaran material pipa. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan

Proses perancangan dan perencanaan saluran tertutup (jaringan perpipaan) adalah aspek yang sangat luas dan membutuhkan analisa yang saling terkait satu sama lain antara kebutuhan air (debit), diameter pipa, tinggi jatuh (head), tekanan air, kecepatan air, dan sebagainya. Akibat keterkaitan faktor-faktor tersebut tidak diperhatikan, sehingga beberapa jaringan perpipaan yang ada tidak bekerja secara maksimal. Debit pada jaringan perpipaan berkurang, maka tekanan dan kecepatan juga berkurang. Sehingga aliran fluida di dalam pipa mengalami aliran tidak sempurna atau aliran pada pipa tidak penuh dikarenakan masih ada rongga yang berisi udara [1].

Penelitian ini diarahkan untuk mengetahui pengaruh parameter aliran terhadap tekanan dalam jaringan perpipaan. Untuk tujuan tersebut maka dilakukan penelitian model fisik di laboratorium yang meliputi: (1) mengetahui seberapa besar pengaruh parameter aliran terhadap tekanan dalam jaringan perpipaan. (2) mengetahui hubungan parameter tak berdimensi jaringan perpipaan. Dengan berjalannya penelitian ini, maka diharapkan dapat memperoleh manfaat sebagai berikut: (1) dapat dijadikan sebagai acuan dan informasi para peneliti dalam mengembangkan penelitian yang berhubungan dengan sistem perpipaan air. (2) sebagai referensi untuk pengembangan inovasi model jaringan pipa dalam meningkatkan kinerja jaringan pipa air.

2. Landasan Teori

2.1. Aliran pada Saluran Tertutup

Saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tampang aliran penuh [2]. Fluida yang dialirkan melalui pipa bisa berupa zat cair atau gas dan tekanan bisa lebih besar atau lebih kecil dari tekanan atmosfer.

Apabila zat cair di dalam pipa tidak penuh maka aliran termasuk dalam aliran saluran terbuka atau karena tekanan di dalam pipa sama dengan tekanan atmosfer, aliran termasuk dalam pengaliran terbuka. Tekanan dipermukaan zat cair di sepanjang saluran terbuka adalah tekanan atmosfer.

Perbedaan mendasar antara aliran pada saluran terbuka dan aliran pada saluran tertutup adalah adanya permukaan yang bebas yang (hampir selalu) berupa udara pada saluran terbuka. Jadi jika pada pipa alirannya tidak penuh sehingga masih ada rongga yang berisi udara maka sifat dan karakteristik alirannya sama dengan aliran pada saluran terbuka [1].

2.2. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds (Re) merupakan bilangan yang tidak memiliki dimensi yang menjadi faktor penting dalam menganalisa jenis aliran (laminar, turbulen atau transisi) [3]. Re adalah perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskositas.

Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{v\rho d}{\mu} = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{viskositas}} \quad (1)$$

dimana,

Re = Bilangan Reynolds

v = kecepatan rata-rata aliran di dalam pipa (m/det)

d = diameter dalam pipa (m)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

μ = viskositas dinamik fluida ($\text{kg/m}\cdot\text{det}$)

2.3. Kehilangan Energi

Kehilangan energi (*Headloss*) merupakan faktor yang mempengaruhi kapasitas pipa sebagai sarana penghantar aliran baik air maupun pipa [4].

Headloss terdiri dari :

a) *Major Headloss (major losses)*

Major Losses adalah kehilangan pada aliran dalam pipa yang disebabkan oleh friksi yang terjadi disepanjang aliran fluida yang mengalir terhadap dinding pipa.



b) Minor Headloss (minor losses)

Kehilangan-kehilangan yang terjadi dalam sistem pipa dikarenakan oleh *bends* (tekukan-tekukan), *elbows* (siku-siku), *joints* (sambungan-sambungan), *valves* (klep-klep) dan Lain-lain disebut kehilangan minor [5].

2.4. Viskositas

Viskositas suatu fluida adalah ukuran resistensi terhadap laju deformasi [6]. Viskositas atau kekentalan suatu fluida sangat penting dalam penganalisaan kondisi fluida dan gerakan fluida. Zat cair riil adalah zat yang memiliki kekentalan, sedangkan zat cair ideal tidak memiliki kekentalan. Hal ini terjadi karena adanya sifat kohesi antara partikel zat cair. Perbedaan kecepatan partikel dalam medan aliran terjadi karena adanya kekentalan zat cair. Partikel zat cair yang berdampingan dengan dinding batas akan memiliki kecepatan nol atau diam, sedang yang terletak pada suatu jarak tertentu dari dinding akan bergerak. Perubahan kecepatan tersebut merupakan fungsi jarak dari dinding batas. Aliran zat cair riil disebut aliran viskos.

Aliran ini dapat dibedakan menjadi 2 (dua). Apabila pengaruh kekentalan (viskositas) adalah cukup dominan sehingga partikel-partikel zat cair bergerak secara teratur menurut lintasan lurus maka aliran disebut laminar. Aliran laminar terjadi apabila kekentalan besar dan kecepatan kecil. Dengan berkurangnya pengaruh kekentalan atau aliran bertambah kecepatan maka aliran akan berubah dari laminar menjadi turbulen [7].

2.5. Tekanan

Fluida memegang peranan penting dalam penyelesaian permasalahan. Tinjauan fluida statis dan fluida dinamis mutlak diperlukan untuk mencari berbagai solusi yang diperlukan. Salah satu hal yang diperhatikan dalam fluida statis adalah tekanan (*pressure*).

Fluida didefinisikan sebagai zat yang mengalami perubahan bentuk bila mendapat tekanan, meskipun tekanan tersebut sangat kecil [8]. Tekanan pada fluida dipancarkan dengan kekuatan sama besar ke semua arah dan bekerja tegak lurus pada suatu bidang. Pada bidang datar yang sama kekuatan tekanan dalam suatu cairan

sama. Pengukuran-pengukuran satuan tekanan yaitu menggunakan berbagai bentuk meteran.

2.6. Hukum Bernoulli

Pernyataan Hukum Bernoulli adalah jumlah dari tekanan, energi kinetik tiap volume, dan energi potensial tiap volume di setiap titik sepanjang aliran fluida adalah sama. Artinya, saat aliran fluida meningkat, tekanan fluida tersebut akan turun. Dengan demikian, energi potensial yang dimiliki fluida juga akan turun. Sebaliknya, saat kecepatan aliran fluida turun, tekanan fluida akan naik [9].

Hukum ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis aliran fluida dengan beberapa asumsi, sebagai berikut:

- Fluida tidak dapat dimampatkan (*incompressible*).
- Fluida tidak memiliki kekentalan (*inviscid*).
- Aliran Fluida tidak berubah terhadap waktu (*steady*).
- Aliran fluida laminar (bersifat tetap, tidak ada pusaran).
- Tidak ada kehilangan energi akibat gesekan antara fluida dan dinding. Serta tidak ada kehilangan energi akibat turbulen.
- Tidak ada energi panas yang ditransfer pada fluida baik sebagai keuntungan ataupun kerugian panas.

Persamaan Bernoulli sebagai berikut:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (3)$$

dimana,

- P = Tekanan (Pascal)
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
 v = Kecepatan fluida (m/s)
 g = gaya gravitasi ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
 h = ketinggian (m)

Hukum Bernoulli sangat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari dan dimanfaatkan pada aplikasi berikut :

2.6.1. Tabung pitot (*pitot tube*)

Tabung pitot adalah instrumen untuk melakukan pengukuran tekanan pada aliran fluida. Tabung pitot ditemukan oleh insinyur berkebangsaan Perancis, Henry Pitot [10] dan dimodifikasi oleh ilmuwan berkebangsaan Prancis, Henry Darcy [11].



Tabung pitot telah digunakan secara luas untuk menentukan kecepatan dari pesawat terbang dan mengukur kecepatan udara dan gas pada aplikasi industri [12]. Kelajuan udara pada pipa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

dimana,

- v = kecepatan pada pitot (m/det)
- g = gravitasi (m/det²)
- h = pembacaan tinggi pada tabung pitot (m)

2.6.2. Venturimeter

Pada keadaan ideal dalam dinamika fluida persamaan bernoulli dan persamaan kontinuitas merupakan persamaan dasar yang digunakan oleh pipa venturimeter, melalui penjabaran dan substitusi persamaan diperoleh rumus menentukan kelajuan aliran pada pipa venturi meter. Berdasarkan teori kontinuitas bahwa lubang masuk dan keluaran pipa venturimeter yang mempunyai perbedaan ukuran penampang sedemikian teratur maka debit diantara lubang tersebut adalah sama [13].

2.7. Model dan Analisa Dimensi

Dengan dibuatnya model akan dapat diprediksi kelakuan dan kerja dari suatu bangunan. Beberapa kekurangan yang tidak diperkirakan akan terjadi dapat segera diketahui dan dapat segera dihindari pada prototip yang direncanakan.

Bentuk sesungguhnya dari bangunan yang diselidiki disebut prototip, dan model bisa lebih

besar, sama besar atau yang biasa dilakukan adalah lebih kecil dari prototip.

3. Metode Penelitian

3.1. Lokasi Penelitian

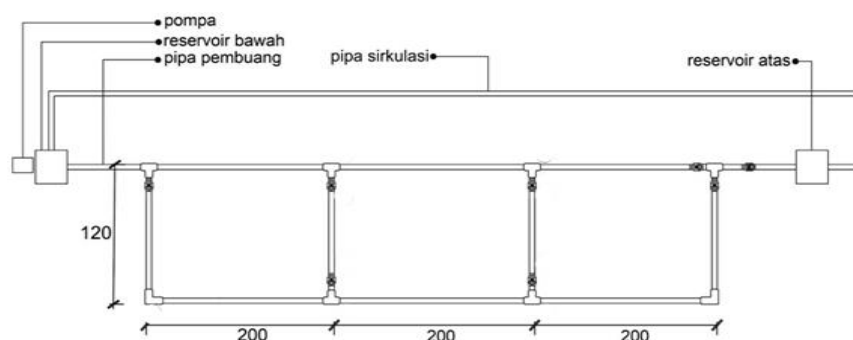
Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil dan Laboratorium Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

3.2. Jenis Penelitian

Penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Untuk memperoleh data penelitian, maka sumber data yang di gunakan berasal dari data primer yaitu data yang di peroleh langsung dari simulasi model fisik dilaboratorium dan data sekunder di peroleh dari *literature* dan hasil penelitian yang sudah ada baik yang telah dilakukan di laboratorium maupun dilakukan ditempat lain yang berkaitan dengan penelitian distribusi kecepatan

3.3. Rancangan Alat Uji

Untuk melakukan penelitian ini alat uji dirancang berdasarkan teori dan jurnal terdahulu. Alat uji ini dengan skala laboratorium, yaitu penggunaan alat yang hanya ditunjukan untuk pengambilan data dari sampel sedimen yang akan dilakukan penelitian. Rancangan alat uji berupa jaringan pipa lurus panjang 600 cm dan diameter pipa acrylic 6,4 cm.



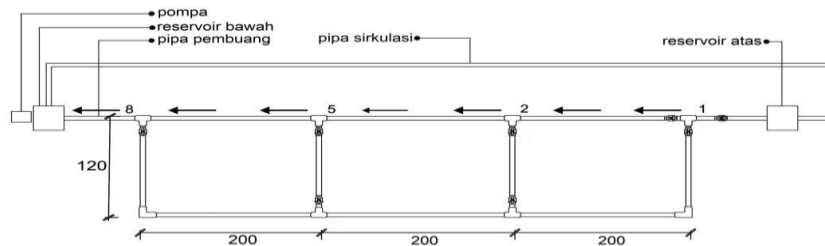
Gambar 1. Set up alat uji

Gambar 1 menunjukkan model set up alat uji berbentuk persegi panjang. Jaringan ini dilengkapi bak penampungan air bawah dan bak penampungan air atas sebagai tempat sirkulasi air, katub sebagai pengatur debit, mesin pompa

air yang mengatur suplai air dari bak penampungan bawah ke penampungan bak atas dan alat ukur kecepatan aliran.

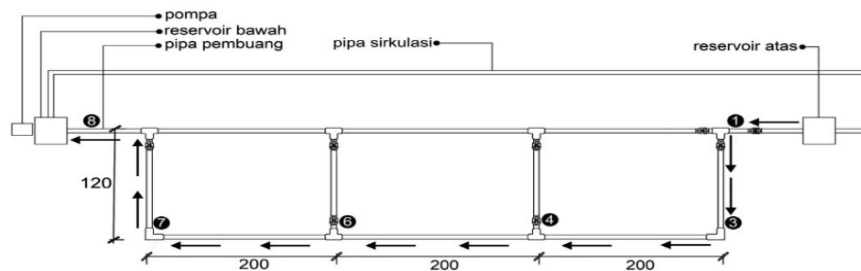
Pengujian dilakukan meliputi 2 (dua) kelompok, sebagai berikut :

3.3.1. Pengujian dengan arah aliran pipa lurus



Gambar 2. Arah aliran pipa lurus

3.3.2. Pengujian pada pipa belok



Gambar 3. Arah aliran pada pipa belok

Gambar 2 menunjukkan arah aliran air pada pengujian pipa lurus. Gambar 3 menunjukkan arah aliran air pada pengujian pipa belok.

Pengujian pipa ini dimaksudkan untuk mengamati karakteristik aliran yang terjadi dari awal pengaliran (hulu) sampai dengan akhir (hilir) dengan variasi debit (Q).

Tahap awal meliputi persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan selama penelitian. Kalibrasi peralatan dilakukan pada tabung pitot manual dan tabung pitot digital untuk mendapatkan hubungan nilai pembacaan alat tersebut.

Kalibrasi tabung pitot manual dilakukan dengan tabung pitot digital serta memasang tabung pitot pada Titik Pengukuran (TP) di pipa pengujian. Dan pitot diletakkan dengan ketinggian yang sama yaitu 2 cm dari dasar pipa pengujian. Catat tinggi tekanan (h) pada kedua tabung pitot dengan beberapa kali perubahan debit (Q).

Pengujian ini dilakukan berdasarkan tinggi jatuh air atau head yaitu 0,5 meter, 1 meter dan 2 meter. Prosedur pengambilan data sebagai berikut;

a) Penyiapan rangkaian pipa sebagai alat pengujian. Pengujian tahap awal dengan kondisi tinggi jatuh air atau head, yaitu 50 cm digunakan air bersih dan pengujian pada jaringan pipa.

- b) Siapkan air pada reservoir bawah. Mengatur bukaan katub pengaliran sebelum air masuk ke reservoir atas. Katub ini dimaksudkan untuk mendapatkan variasi debit (Q) yang digunakan,
- c) Jalankan pompa untuk mensuplai air dari reservoir bawah ke reservoir atas dan dari reservoir atas akan mengalir secara gravitasi ke pipa pengujian dan berakhir ke reservoir bawah. Aliran air akan terus bersirkulasi sampai air di pipa pengujian menjadi konstan atau stabil,
- d) Pada saat aliran telah konstan, ambil debit aliran (Q) pada outlet/hulu pipa pengujian dengan cara menampung air selama beberapa waktu yang diinginkan debit aliran (Q) diatur dengan bukaan katub sesuai dengan debit aliran (Q) yang diinginkan,
- e) Baca penunjukan nilai tinggi tekanan (h) pada manometer yang terpasang, kecepatan (v) pada tabung pitot dan tinggi muka air (m) pada titik titik pengamatan di pipa jaringan.
- f) Ulangi Percobaan prosedur (a) sampai (e) untuk tiap perubahan debit (Q), perubahan model pengujian aliran pipa lurus dan pipa belokan.
- g) Data yang diperoleh dari eksperimen dianalisis.

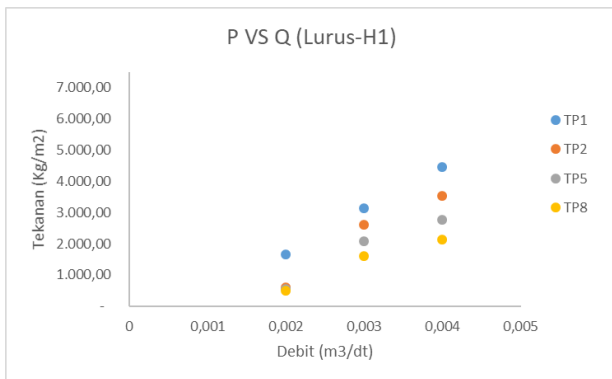
Data yang diperoleh dari percobaan selanjutnya dianalisis dan disimpulkan hasilnya.

4. Hasil dan Pembahasan

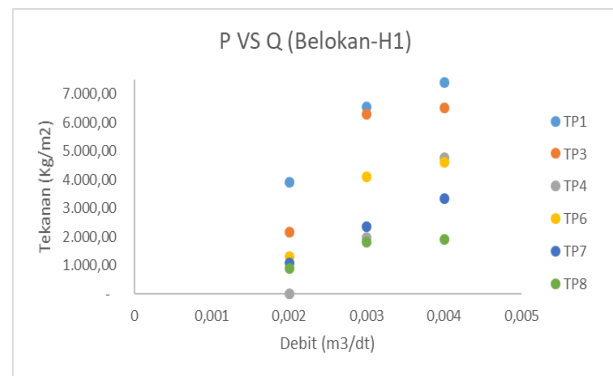
4.1. Pengaruh Parameter Aliran terhadap Tekanan pada Jaringan Perpipaan

4.1.1. Pengaruh Debit

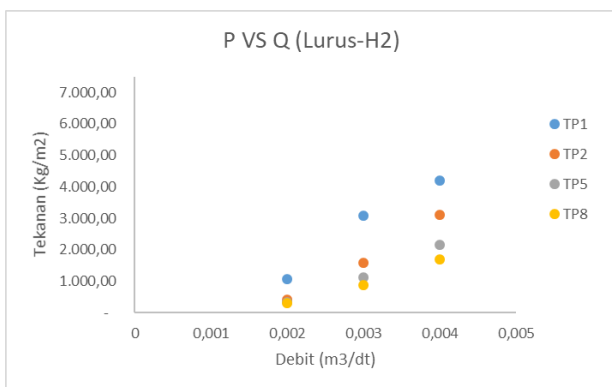
Pengaruh debit terhadap tekanan pada jaingan pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



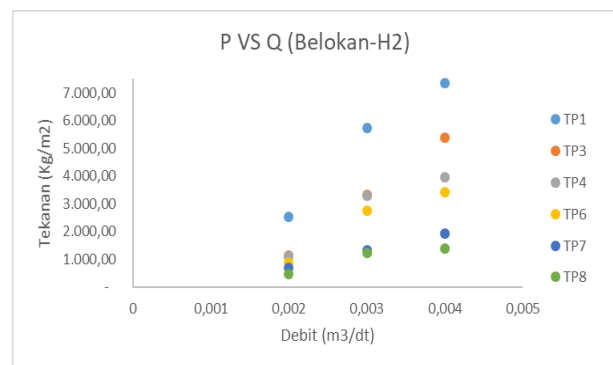
(a)



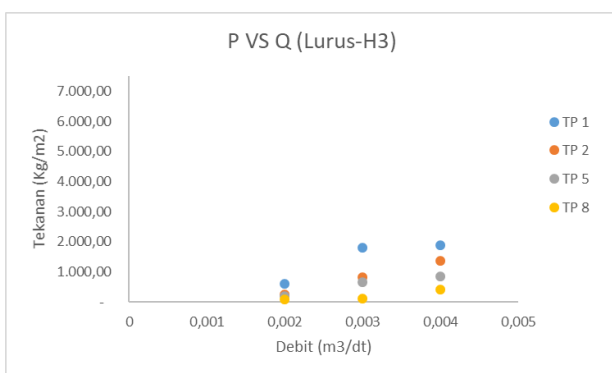
(a)



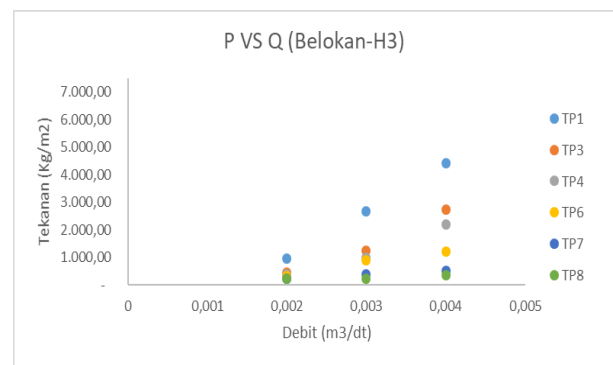
(b)



(b)



(c)



(c)

Gambar 4. Hubungan debit dengan tekanan pada pipa lurus (a) H1, (b) H2, (c) H3

Gambar 4 menunjukkan hubungan debit dengan tekanan. Pada titik TP1 untuk tinggi jatuh

H1 penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 29,41% dan dari Q2 ke Q3 sebesar 46,88%. Pada titik (TP2) penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 26,39%, dari Q2 ke Q3 sebesar 76,98%. Titik TP5 terjadi penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 25,18%, dari Q2 ke Q3 sebesar 73,54%. Begitu juga di titik TP8 terjadi penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 23,89%, dari Q2 ke Q3 sebesar 69,01%. Sama halnya dengan tinggi jatuh H1, tinggi jatuh H2 dan H3 juga terjadi penurunan tekanan akibat penurunan debit.

Gambar 5. Hubungan debit dengan tekanan pada pipa belok (a) H1, (b) H2, (c) H3

Pada Gambar 5 dapat dilihat di titik TP1 untuk tinggi jatuh H1, penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 11,70%. Dari Q2 ke Q3 sebesar

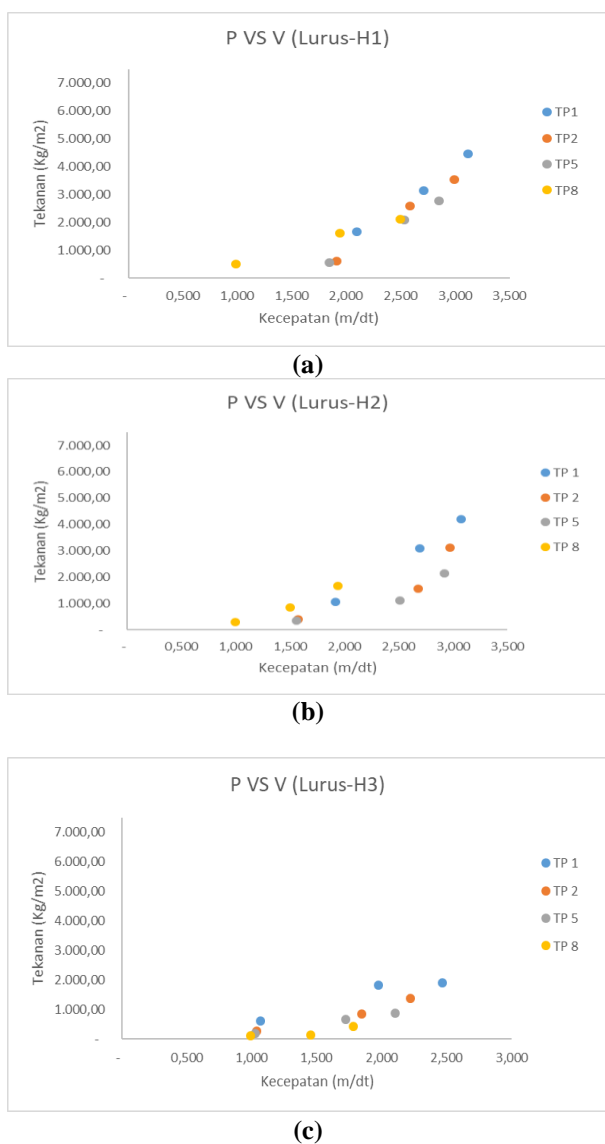


40,30%. Pada titik TP3 untuk tinggi jatuh H1, penurunan tekanan dari Q1 ke Q2 sebesar 3,46%. Begitu juga penurunan tekanan dari Q2 ke Q3 sebesar 65,60%.

TP4, TP6, TP7 dan TP8 juga terjadi penurunan tekanan akibat penurunan debit Q1, Q2, dan Q3. Demikian juga penurunan tekanan yang diakibatkan karena penurunan debit terjadi pada pipa dengan tinggi jatuh H2 dan H3.

4.1.2. Pengaruh Kecepatan

Pengaruh kecepatan aliran terhadap tekanan pada pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.

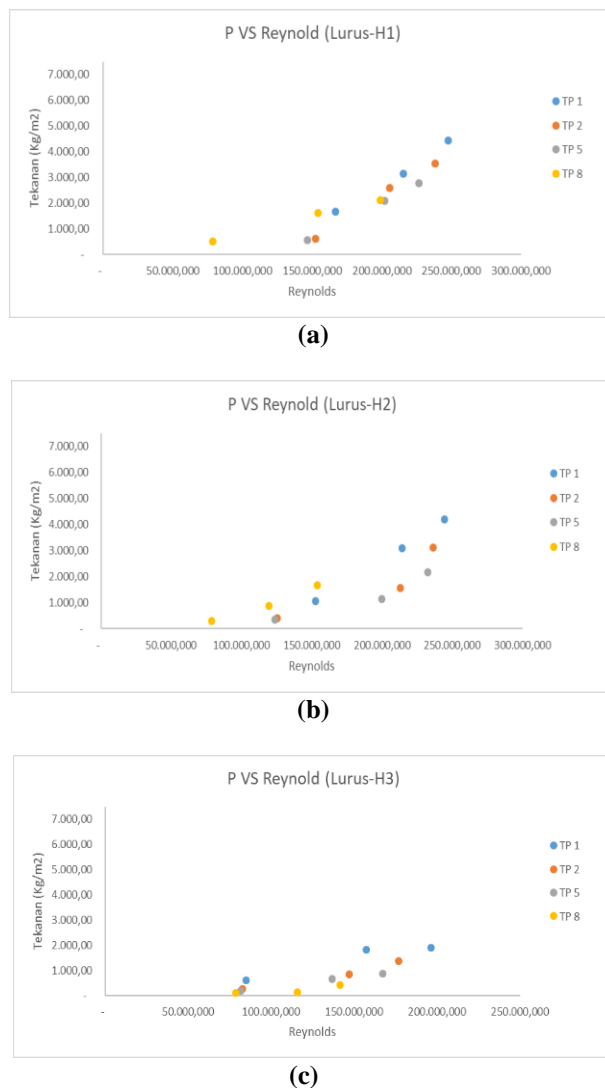


Gambar 6. Hubungan kecepatan dengan tekanan pada pipa lurus (a) H1, (b) H2, (c) H3

Pada Gambar 6 dapat dilihat pada titik TP1 untuk tinggi jatuh H1 penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 sebesar 13,07% dan dari Q2 ke Q3

sebesar 22,61%. Pada titik TP2 penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 sebesar 13,36%, dari Q2 ke Q3 sebesar 25,91%. Titik TP5 terjadi penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 sebesar 10,93%, dari Q2 ke Q3 sebesar 27,32%.

Begitu juga di titik TP8 terjadi penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 sebesar 22,40%, dari Q2 ke Q3 sebesar 48,96%. Sama halnya dengan tinggi jatuh H1, tinggi jatuh H2 dan H3 juga terjadi penurunan kecepatan akibat penurunan debit dan tekanan.



Gambar 7. Hubungan kecepatan dengan tekanan pada pipa belok (a) H1, (b) H2, (c) H3

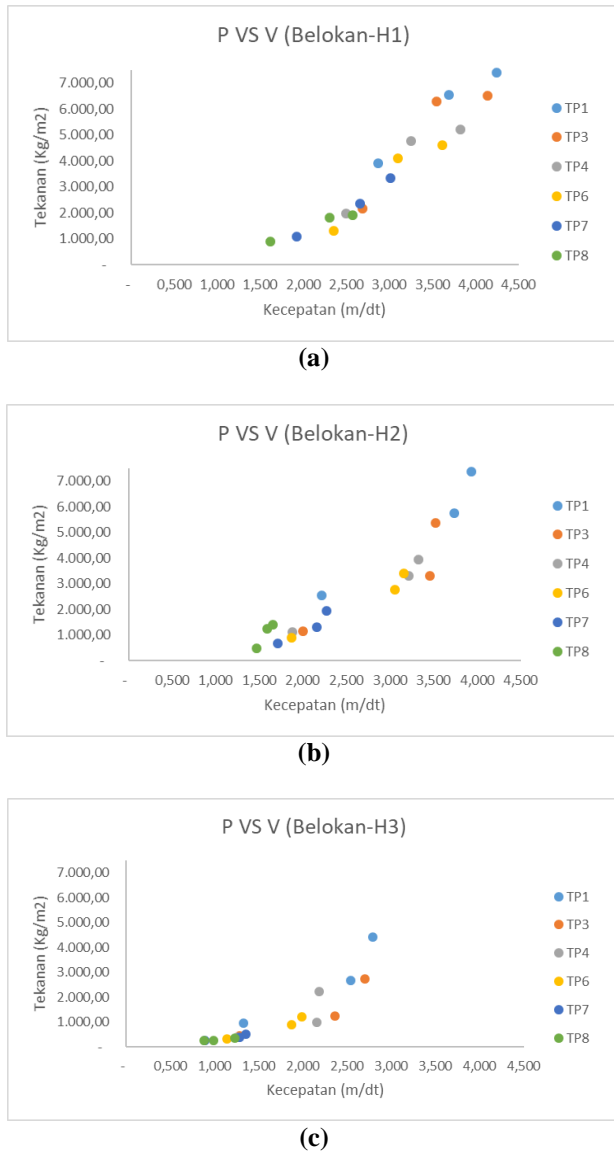
Pada Gambar 7 dapat dilihat di titik TP1 untuk tinggi jatuh H1, penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 13,07%. Dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 22,192%. Pada titik TP3 untuk tinggi jatuh H1, penurunan kecepatan dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 14,39%. Begitu juga penurunan kecepatan dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 24,23%. TP4, TP6, TP7 dan TP8 juga terjadi penurunan



kecepatan. Demikian juga pada pipa dengan tinggi jatuh H2 dan H3 terjadi penurunan kecepatan akibat penurunan debit dan tekanan.

4.1.3. Pengaruh Bilangan Reynold

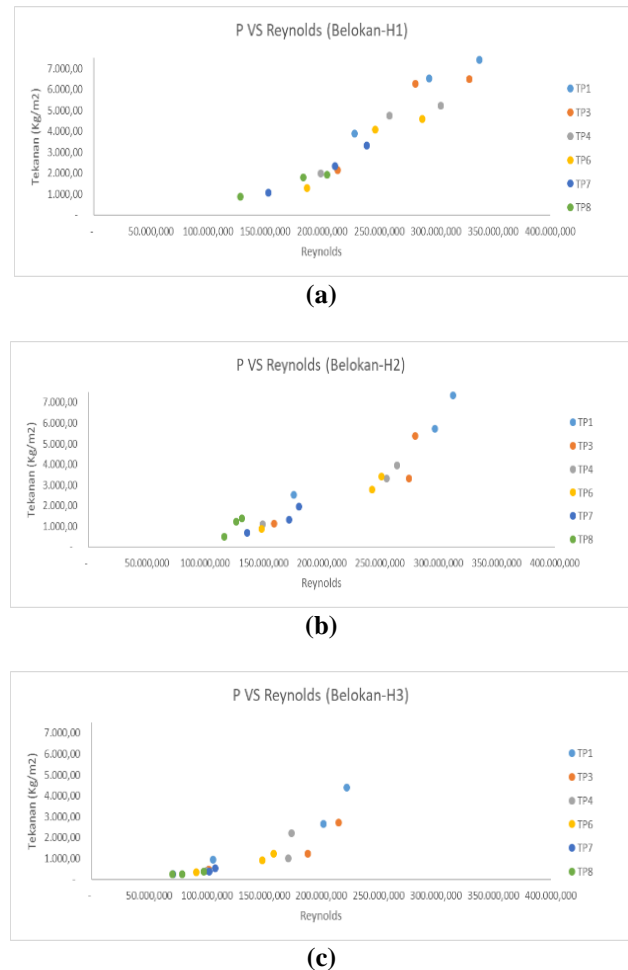
Pengaruh Bilangan Reynold terhadap tekanan pada pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Hubungan Bilangan Reynold dengan tekanan pada pipa lurus (a) H1, (b) H2, (c) H3

Pada Gambar 8 dapat dilihat pada titik TP1 untuk tinggi jatuh H1 penurunan Bilangan Reynold dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 13,07% dan dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 22,61%. Pada titik TP2 penurunan Bilangan Reynold dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 13,36%, dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 25,91%. Titik TP5 terjadi penurunan Bilangan Reynold dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar

10,93%, dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 27,32%. Begitu juga di titik TP8 terjadi penurunan Bilangan Reynold dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 22,40%, dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 48,96%. Sama halnya dengan tinggi jatuh H1, tinggi jatuh H2 dan H3 juga terjadi penurunan Bilangan Reynold akibat penurunan kecepatan, debit, dan tekanan pada penampang pipa yang sama.



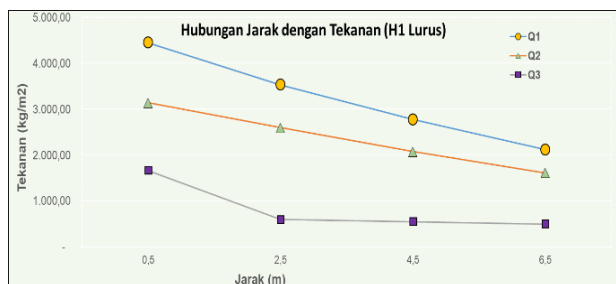
Gambar 9. Hubungan Bilangan Reynold dengan tekanan pada pipa belok (a) H1, (b) H2, (c) H3

Pada Gambar 9 dapat dilihat di titik TP1 untuk tinggi jatuh H1, penurunan Bilangan Reynolds dari Q1 ke Q2 yaitu sebesar 13,07%. Dari Q2 ke Q3 yaitu sebesar 22,192%. Pada titik TP3 untuk tinggi jatuh H1, penurunan Bilangan Reynolds dari Q1 ke Q2 sebesar 14,39%. Begitu juga penurunan Bilangan Reynolds dari Q2 ke Q3 sebesar 24,23%. TP4, TP6, TP7 dan TP8 juga terjadi penurunan Bilangan Reynolds akibat penurunan kecepatan, debit, dan tekanan. Hal sama juga terjadi pada tinggi jatuh H2 dan H3.

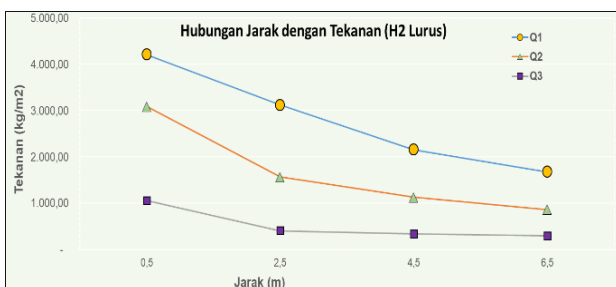


4.1.4. Pengaruh Jarak

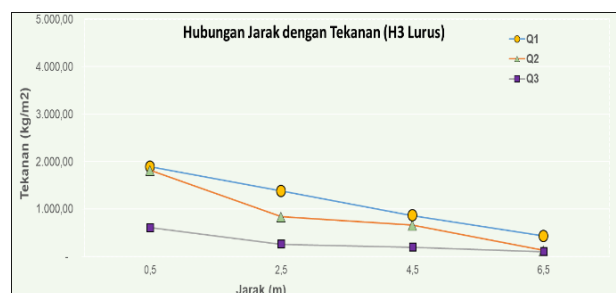
Pengaruh jarak terhadap tekanan pada pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11.



(a)



(b)



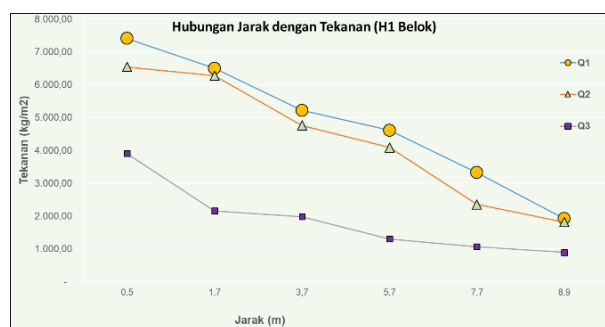
(c)

Gambar 10. Hubungan jarak dengan tekanan pada pipa lurus (a) H1, (b) H2, (c) H3

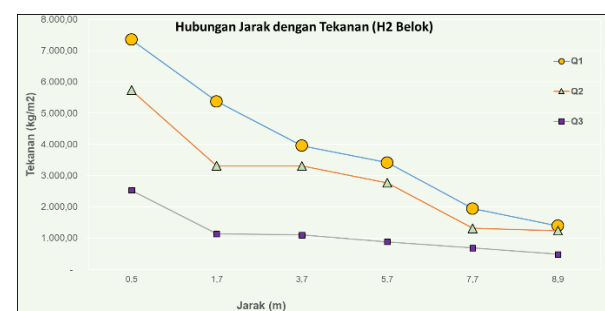
Pada Gambar 10 dapat dilihat untuk tinggi jatuh H1 penurunan tekanan dari titik TP1 ke TP2, TP5, dan TP8 yaitu dari 4.447,20 kg/m² menjadi 3.531,60 kg/m², 2.775,41 kg/m², dan 2.121,41 kg/m². Sama halnya dengan tinggi jatuh H1, tinggi jatuh H2 dan H3 juga terjadi penurunan tekanan. Hal ini disebabkan *headloss*, adanya gesekan fluida pada dinding pipa memanjang (*major losses*) dan adanya sambungan pipa (*minor losses*) sehingga terjadi penurunan pada tekanan, kecepatan, dan Bilangan Reynolds pada penampang pipa yang sama.

Pada Gambar 11 dapat dilihat untuk tinggi jatuh H1 penurunan tekanan dari titik TP1 ke TP3, TP4, TP6, TP7, dan TP8 yaitu dari 7.406,55

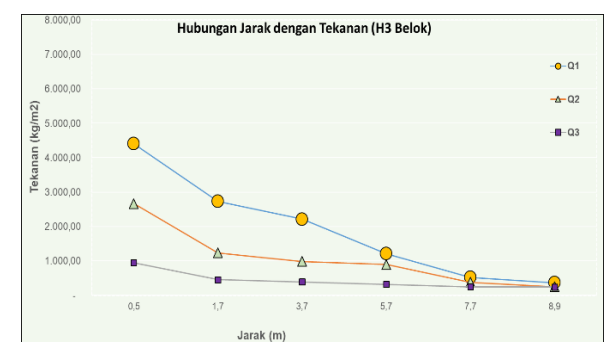
kg/m² menjadi 6.499,13 kg/m², 5.215,65 kg/m², 4.610,70 kg/m², 3.323,14 kg/m², dan 1.923,61 kg/m². Sama halnya dengan tinggi jatuh H1, tinggi jatuh H2 dan H3 juga terjadi penurunan tekanan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 11. Hubungan jarak dengan tekanan pada pipa belok (a) H1, (b) H2, (c) H3

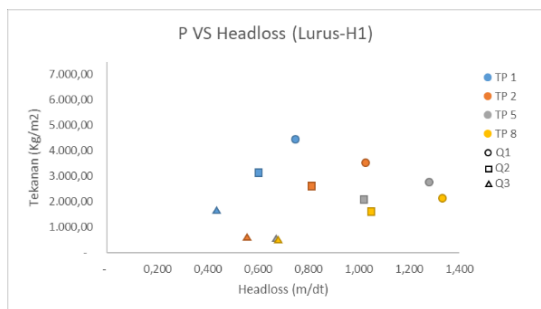
Hal ini disebabkan *headloss*, adanya gesekan fluida pada dinding pipa memanjang (*major losses*) dan adanya sambungan dan belokan pada pipa (*minor losses*) sehingga terjadi penurunan pada tekanan, kecepatan, dan Bilangan Reynolds pada penampang pipa yang sama.

4.1.5. Pengaruh Headloss

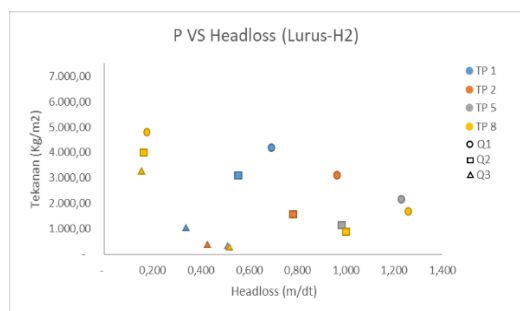
Pengaruh *headloss* terhadap tekanan pada pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13.



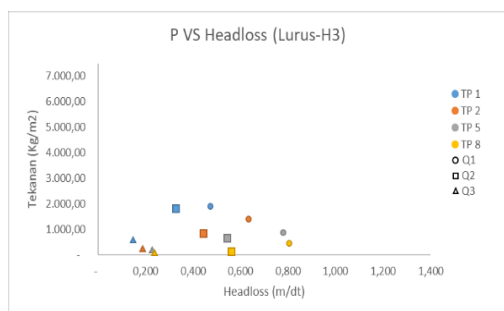
Pada Gambar 12 dapat dilihat pada debit yang sama (Q1) untuk tinggi jatuh H1 terjadi penurunan tekanan dan kenaikan *headloss* dari titik TP1 yaitu tekanan (4.447,20 kg/m²) dan *headloss* (0,749 m/det) ke TP2 yaitu tekanan (3.531,60 kg/m²) dan *headloss* (1,026 m/det). Dari titik TP2 yaitu tekanan (3.531,60 kg/m²) dan *headloss* (1,026 m/det) ke titik TP5 yaitu tekanan (2.775,41 kg/m²) dan *headloss* (1,280 m/det). Dan dari titik TP5 yaitu tekanan (2.775,41 kg/m²) dan *headloss* (1,280 m/det) ke titik TP8 yaitu tekanan (1.614,56 kg/m²) dan *headloss* (1,331 m/det). Hal yang sama juga terjadi pada variasi debit Q2 dan Q3, serta variasi tinggi jatuh H2 dan H3.



(a)



(b)

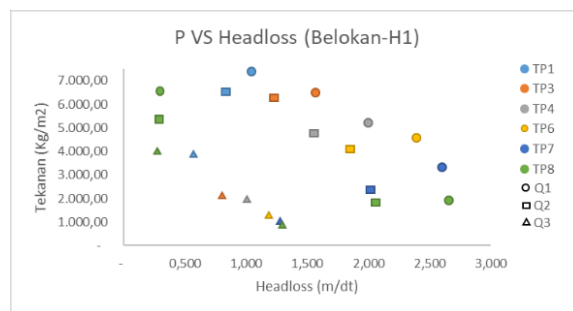


(c)

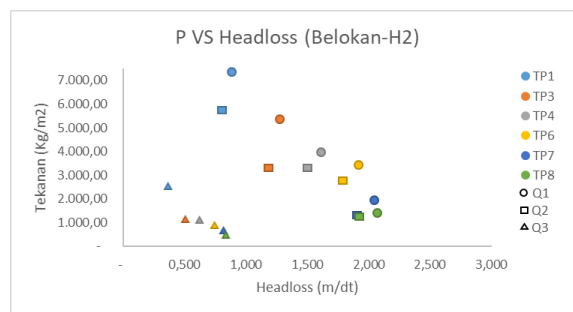
Gambar 12. Hubungan *headloss* dengan tekanan pada pipa lurus (a) H1, (b) H2, (c) H3

Pada Gambar 13 dapat dilihat pada debit yang sama (Q1) untuk tinggi jatuh H1 terjadi penurunan tekanan dan kenaikan *headloss* dari titik TP1 yaitu tekanan (7.406,55 kg/m²) dan *headloss* (1.040 m/det) ke TP3 yaitu tekanan (6.499,13 kg/m²) dan *headloss* (1,566 m/det). Dari titik TP3 yaitu tekanan (6.499,13 kg/m²) dan

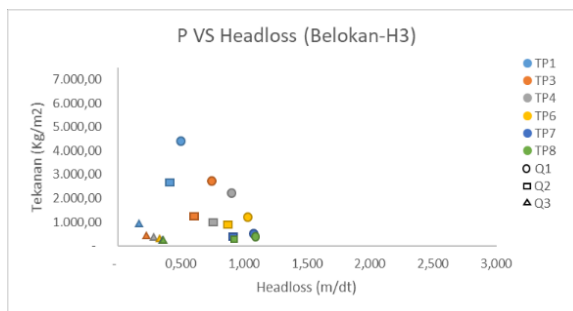
headloss (1,566 m/det ke titik TP4 yaitu tekanan (5.215,65 kg/m²) dan *headloss* (1,998 m/det). Dari titik TP4 yaitu tekanan (5.215,65 kg/m²) dan *headloss* (1,998 m/det) ke titik TP6 yaitu tekanan (4.610,70 kg/m²) dan *headloss* (2,389 m/det). Dari titik TP6 ke titik TP7 dan TP8 juga terjadi penurunan tekanan dan peningkatan *headloss*. Hal yang sama juga terjadi pada variasi debit Q2 dan Q3, serta variasi tinggi jatuh H2 dan H3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 13. Hubungan *headloss* dengan tekanan pada pipa belok (a) H1, (b) H2, (c) H3

4.2. Analisa Dimensi Metode Buckingham

Bilangan Tak Berdimensi digunakan untuk menggambarkan hasil penelitian, dengan demikian hasil dari penelitian tersebut dapat digeneraliser serta dapat pula digunakan untuk menyatakan hubungan antar parameter [14]. Metode analisis bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode Buckingham.



Berdasarkan Metode Buckingham, maka persamaan.

$$\psi = f\left(\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2,5}}; \frac{P}{\rho D}; \frac{H}{h}\right) \quad (5)$$

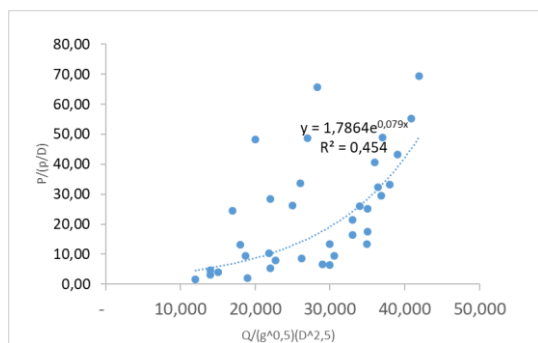
dimana,

- $\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2,5}}$ = Faktor Debit
- $\frac{P}{\rho D}$ = Tekanan Hidrostatik
- $\frac{H}{h}$ = Perbandingan *Head* dengan Tinggi Muka Air

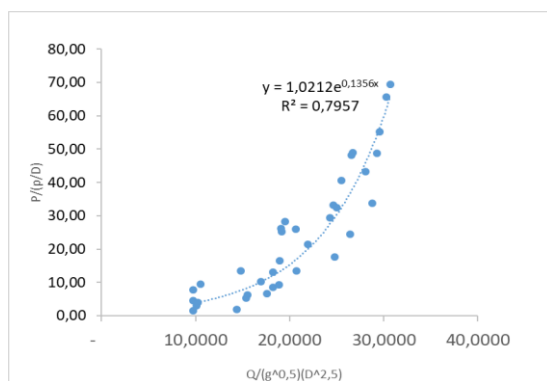
4.2.1. Hubungan Tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ dengan Debit

$$\left(\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2,5}}\right)$$

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengolahan data diperoleh grafik hubungan tekanan dengan debit pada Gambar 13.



(a)



(b)

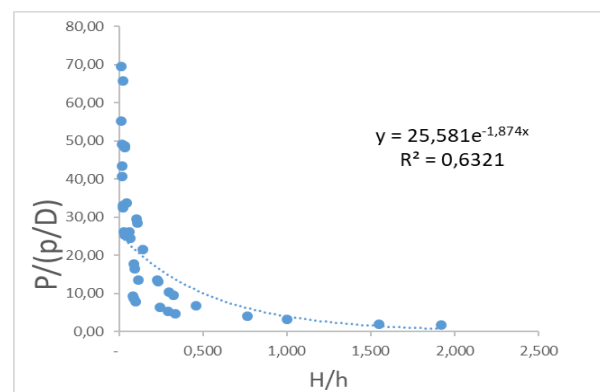
Gambar 14. Hubungan tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ dan debit

$\left(\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2,5}}\right)$ pada pipa (a) lurus, (b) belok

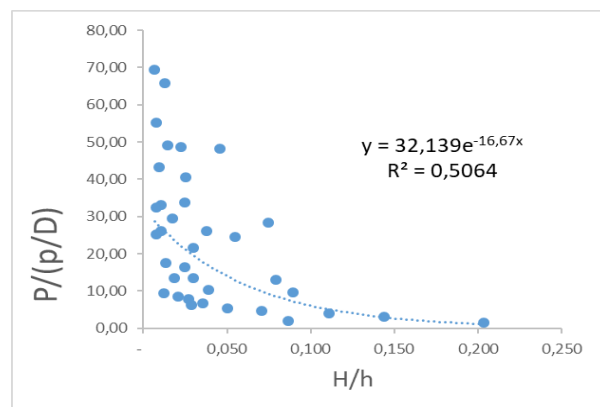
Gambar 14 menunjukkan hubungan tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ terhadap debit $\left(\frac{Q}{\sqrt{g}D^{2,5}}\right)$ pada beberapa titik pengukuran. Semakin besar debit aliran, semakin besar tekanannya (P).

4.2.2. Hubungan tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ dengan $\left(\frac{H}{h}\right)$

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengolahan data diperoleh grafik hubungan pada Gambar 15.



(a)



(b)

Gambar 15. Hubungan tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ dan tinggi

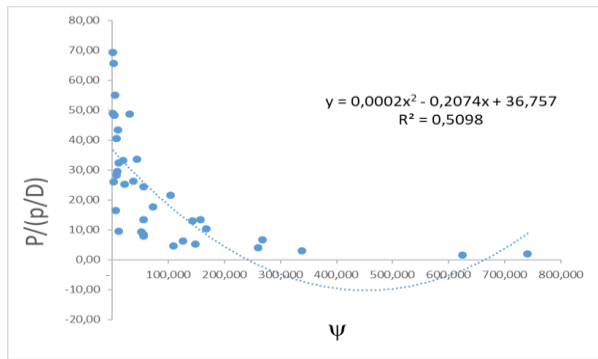
jatuh air $\left(\frac{H}{h}\right)$ pada pipa (a) lurus, (b) belok

Gambar 15 menunjukkan hubungan tekanan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ terhadap tinggi jatuh air $\left(\frac{H}{h}\right)$ pada titik titik pengukuran. Semakin besar tinggi jatuh air, semakin besar tekanannya.

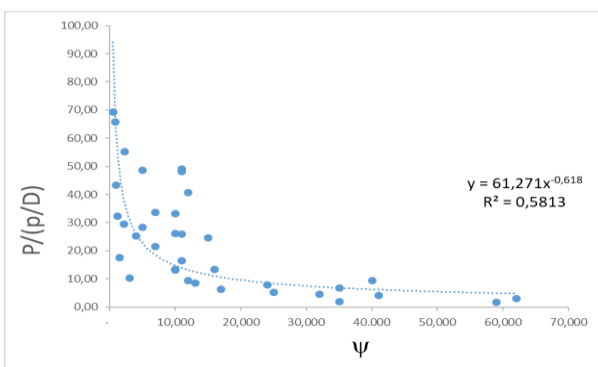


4.2.3. Pengaruh bersama (ψ) terhadap Tekanan

Hubungan ψ dengan tekanan dapat dilihat pada Gambar 16.



(a)



(b)

Gambar 16. Hubungan (ψ) dengan $\left(\frac{P}{\rho D}\right)$ pada pipa (a) lurus, (b) belok

5. Validasi Hasil

5.1. Persamaan Bernoulli

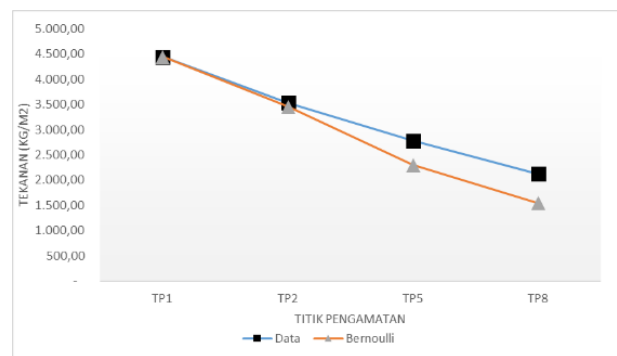
Metode lainnya yang dapat digunakan untuk memvalidasi hasil penelitian atau sebelumnya adalah dengan menggunakan Persamaan Bernoulli. Di dalam praktek, faktor penting dalam studi hidraulika adalah debit, kecepatan, dan tekanan. Pada penelitian ini, diameter pipa dan debit sudah ditentukan, kecepatan dan kehilangan energi juga sudah dihitung, sehingga dengan menggunakan persamaan-persamaan empiris yang ada maka tekanan dapat ditentukan. Dalam hal ini untuk menghitung tekanan secara teoritis digunakan Persamaan Bernoulli. Hasil perhitungan tekanan dengan menggunakan Persamaan Bernoulli ini akan dibandingkan dengan tekanan yang didapatkan dari pengukuran langsung. Rumus tersebut mempunyai bentuk.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (6)$$

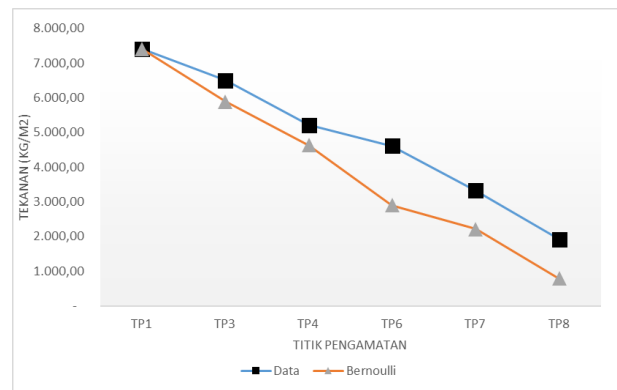
dimana,

- P = Tekanan (kg/m^2)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
- v = Kecepatan (m/det)
- g = gaya gravitasi ($g= 9,8 \text{ m/s}^2$)
- z = elevasi titik (m)
- h_L = kehilangan energi (m/det)

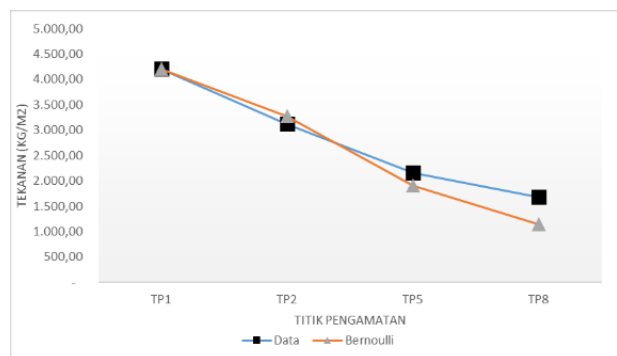
Perbandingan nilai tekanan antara pengukuran langsung dengan teoritis dengan debit Q1 untuk kondisi pipa lurus dan belok dengan variasi head adalah H1, H2, dan H3 dapat dilihat pada Gambar 17.



(a1)

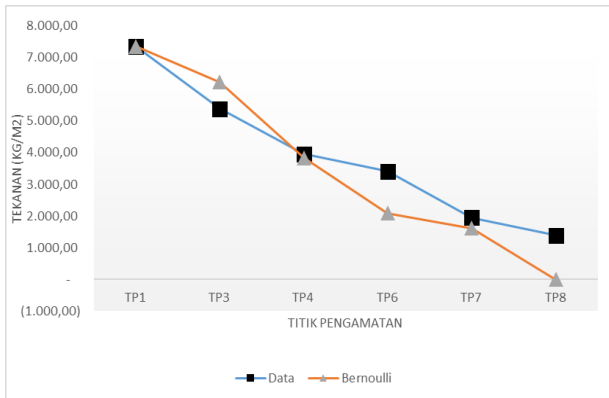


(a2)



(b1)

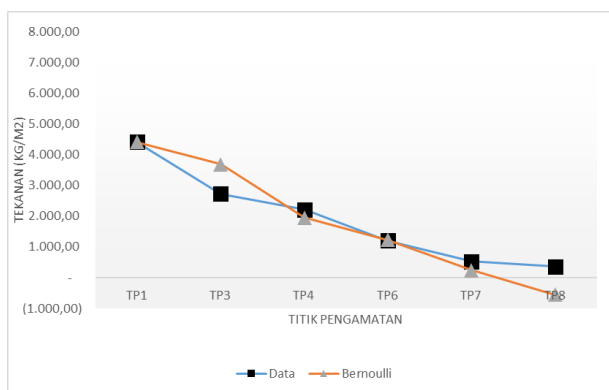




(b2)



(c1)



(c2)

Gambar 17. Perbandingan tekanan antara pengukuran langsung dengan Metode Analitis (Bernoulli) (a1) Q1H1 pada pipa lurus, (a2) Q1H1 pada pipa belok. (b1) Q1H2 pada pipa lurus, (b2) Q1H2 pada pipa belok. (c1) Q1H3 pada pipa lurus, (c2) Q1H3 pada pipa belok

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa nilai tekanan hasil pengukuran langsung (data) mengikuti pola nilai tekanan analitis dalam hal ini menggunakan Persamaan Bernoulli serta memiliki perbedaan yang tidak terlalu jauh. Salah satu hal yang menyebabkan adanya perbedaan nilai tekanan antara analitis dengan pengukuran langsung karena adanya beberapa parameter yang mempengaruhi persamaan Bernoulli dan pengukuran langsung.

6. Kesimpulan

Berdasarkan tujuan penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal dari hasil penelitian yang telah dilakukan, yaitu : Pengaruh parameter aliran terhadap tekanan dalam jaringan perpipaan bahwa semakin tinggi debit maka tekanannya juga meningkat. Hal ini disebabkan karena kecepatan dan Bilangan Reynold juga meningkat. Sedangkan pengaruh *headloss*, semakin tinggi *headloss* maka tekanan semakin rendah karena semakin jauh titik pengamatannya sehingga terjadi kehilangan energi (*major losses* dan *minor losses*).

Referensi

- [1] R. J. Kodoatie, *Hidrolika Terapan, Aliran pada Saluran Terbuka dan Pipa*. Yogyakarta: Andi, 2011.
- [2] B. Triatmodjo, *Mekanika Fluida*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, 1992.
- [3] J. Dake, *Hidrolika Teknik*, Terjemahan. Jakarta: Erlangga, 1983.
- [4] Waspodu, "Analisa Head Loss Sistem Jaringan Pipa pada Sambungan Kombinasi Diameter Berbeda," *J. Suara Tek. Fak. Tek. UM Pontianak*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2017.
- [5] M. Orianto and W. A. Pratiktok, *Mekanika Fluida I*. Surabaya: Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November.
- [6] J. R. Welty and et.al, *Dasar-dasar Fenomena Transport Volume 1 Transfer Momen Edisi ke-4*. Jakarta: Erlangga, 2000.
- [7] B. Triatmodjo, *Hidrolika II*. Yogyakarta: Beta Offset, 2003.
- [8] Chorlton, *Fluida Mechanics*. London: Van Nostrand, 1967.
- [9] E. Viandai, "Belajar Fluida, Ingat Hukum Bernoulli," 2019. .
- [10] H. Pitot, *Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux" Histoire de l'Académie royale des sciences avec les mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de cette Académie*. 1732.
- [11] H. Darcy, *Note relative à quelques modifications à introduire dans le tube de Pitot" Annales des Ponts et Chaussées*, Series 3. 1858.
- [12] C. J. Geankoplis, *Transport processes and separation process principles (include unit operations)*, 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [13] S. R. Pudjiwahyuni, "Mengukur Besar Debit Aliran Fluida pada Pipa Venturimeter," Universitas Katolik Widya Mandala, 1999.
- [14] B. Triatmodjo, *Hidrolika II*. Yogyakarta: Beta Offset, 2015.

Waktu Dengung Ruang Ibadah Masjid Besar Al-Abrar Makassar

Siti Amaliyah Mustafa Kamal*¹, Asniawaty¹, Muhammad Taufik Ishak¹

¹Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: amaliyahmstf@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.03

Abstrak

Ruangan dengan kualitas kenyamanan audial yang baik memiliki kondisi suara yang terdengar stabil, yaitu ketika nilai-nilai standar kenyamanan audial sebagaimana fungsi ruangnya telah terpenuhi. Salah satunya standar kenyamanan audial adalah waktu dengung. Waktu dengung merupakan aspek penentu kualitas akustik yang utama dari sebuah ruang privasi maupun publik, tidak terkecuali pada ruang ibadah masjid. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelitian terkait waktu dengung pada ruang ibadah Masjid Besar Al-Abrar Makassar kemudian menyajikan saran untuk mencapai kenyamanan audial yang sesuai dengan ruang ibadah masjid. Penelitian dilakukan dengan metode kuantitatif deskriptif dengan melakukan simulasi dengan aplikasi *Autodesk Ecotect Analysis v5.50*, dan pembagian kuesioner untuk pengguna pada setiap titik ukur yang ditentukan pada denah setiap segmen lantai. Hasil yang didapatkan, ruang ibadah masjid masih memiliki masalah dengan waktu dengung pada semua segmen lantai yaitu segmen lantai 1,2, dan 3. Pada frekuensi 500 Hz dengan rumus sabine, hasil simulasi menggunakan aplikasi *Autodesk Ecotect Analysis v5.50* segmen lantai 1 adalah 5,41 detik, segmen lantai 2 adalah 4,05 detik, dan segmen lantai 3 adalah 1.36 detik. Kesimpulan dari penelitian ini adalah kenyamanan audial pada ruang ibadah Masjid Besar Al-Abrar Makassar terkait waktu dengung masih belum sepenuhnya memenuhi standar kenyamanan audial, namun hasil dari keusioner pengguna masjid sudah merasa nyaman dengan keadaan tersebut.

Abstract

Reverberation Time of the Worship Room of the Great Mosque of Al-Abrar Makassar. A room with good audial comfort quality has a stable sound condition, which is when the standard values of audial comfort as the function of the room has been fulfilled. One of the standards of audial comfort is the reverberation time. Reverberation time is the main acoustic quality determinant aspect of a privacy and public space, not least in the mosque worship room. This research aims to conduct research related to drone time in the worship room of Al-Abrar Mosque in Makassar then presents suggestions to achieve audial comfort that is in accordance with the mosque worship room. The research was conducted by descriptive quantitative methods by conducting simulations with *Autodesk Ecotect Analysis v5.50* application, and the distribution of questionnaires for users at each measuring point specified on the floor plan of each floor segment. As a result, the mosque worship room still has problems with reverberation time on all segments of the floor, namely the 1, 2nd, and 3rd floor segments. At a frequency of 500 Hz with the sabine formula, the simulation results using *Autodesk Ecotect Analysis v5.50* segment of the 1st floor is 5.41 seconds, the 2nd floor segment is 4.05 seconds, and the 3rd floor segment is 1.36 seconds. The conclusion of this study is audial comfort in the worship room of Al-Abrar Mosque in Makassar related to drone time still does not fully meet audial comfort standards, but the results of the questionnaire of mosque users are already comfortable with the situation.

Kata Kunci: Akustik, audial, ecotect, masjid, waktu dengung

1. Pendahuluan

Masjid merupakan rumah tempat ibadah umat Islam melaksanakan ibadah. Ruang masjid yang bermasalah akan berpengaruh terhadap kenyamanan beribadah. Kenyamanan dan kekhusukan beribadah sangat dipengaruhi oleh kondisi mendengar (akustik) di dalam ruang masjid. Diharapkan di dalam ruang masjid suara dapat didengarkan dengan keras, jelas dan estesis, atau memenuhi kriteria *loudness, clarity or intelligibility and liveness of sound* [1].

Kondisi akustik ruang masjid seharusnya mendapatkan perhatian khusus. Penelitian Kinerja Akustik Masjid di Indonesia menyebutkan 5 persyaratan umum akustik untuk ruang masjid, yaitu kekerasan suara yang mencukupi, distribusi suara yang merata, waktu dengung yang optimum yang berpengaruh pada kejelasan pembicaraan, bebas dari cacat akustik, dan tingkat bising yang rendah [2]. Masalah utama yang terdapat saat menata suara dalam ruangan adalah lamanya waktu dengung. Karena waktu dengung merupakan aspek penentu kualitas akustik yang utama dari sebuah ruang



privasi maupun publik, maka tidak terkecuali untuk bangunan ibadah yaitu masjid [3].

Waktu dengung yaitu waktu lamanya terjadi dengung di dalam ruangan yang masih dapat didengar [4]. Dalam geometri akustik disebutkan bahwa bunyi juga mengalami pantulan jika mengenai permukaan yang keras, tegar, dan rata, seperti plesteran, batu bata, beton, atau kaca. Selain bunyi langsung, akan muncul pula bunyi yang berasal dari pantulan tersebut [5]. Hasil dari observasi awal terhadap waktu dengung (RT60) ruang ibadah masjid saat kondisi ruangan kosong dengan frekuensi 500Hz adalah 6,67s untuk Rumus Sabine. Hasil simulasi awal hasilnya membuktikan bahwa waktu dengung (RT) pada ruang masjid termasuk tinggi. Hal ini tidak sesuai dengan standar kenyamanan audial pada ruang ibadah sebuah masjid. Hal yang dialami oleh pendaftar akan memiliki gangguan tersendiri untuk kenyamanan audialnya. Masalah seperti ini tidak dapat dicapai hanya melalui pengamatan fisik saja, namun harus melalui perhitungan tertentu. Oleh karena itu perlu dianalisis kenyamanan audial pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar, Kelurahan Mannuruki, Kecamatan Tamalate, Kota Makassar.

2. Tinjauan Pustaka

Perpanjangan bunyi sebagai akibat pemantulan berulang-ulang dalam ruang tertutup

setelah sumber bunyi dimatikan disebut dengung, yang memberikan pengaruh tertentu pada kondisi mendengar. Waktu dengung adalah waktu yang dibutuhkan suatu energi suara untuk meluruh hingga sebesar sepersatu juta dari energi awalnya, yaitu sebesar 60 dB. Besaran standar yang digunakan dalam pengendalian dengung disebut waktu dengung atau reverberation time [6]. Dalam perkembangannya, waktu dengung tidak hanya didasarkan pada peluruhan 60 dB saja, tetapi juga pada pengaruh suara langsung dan pantulan awal (EDT) atau peluruhan-peluruhan yang terjadi kurang dari 60 dB, seperti 15 dB (RT15), 20 dB (RT20), dan 30 dB (RT30).

Waktu dengung (*reverberation time*) sangat menentukan dalam mengukur tingkat kejelasan *speech*. Auditorium yang memiliki waktu dengung terlalu panjang akan menyebabkan penurunan *speech intelligibility*, karena suara langsung masih sangat dipengaruhi oleh suara pantulnya. Sedangkan waktu dengung yang terlalu pendek akan menyebabkan ruangan mati, sebaliknya waktu dengung yang baik akan memberikan suasana hidup pada ruang. Waktu dengung untuk ruangan yang aktivitasnya banyak percakapan (alamiah) 0,5-1 detik, untuk aktivitas *music* 1-2 detik [7]. Sedangkan untuk jenis *speech auditorium* disarankan berada pada 0,60-1,20 detik, sedangkan untuk *music auditorium* disarankan berada pada 1,00-1,70 detik [8].

Tabel 1. Koefisien serap beberapa material bangunan [9]

Nama Bahan	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Kaca jendela biasa	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Kaca tebal	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Papan gypsum 13mm	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Lantai keramik	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Plywood 6mm	0.30	0.40	0.14	0.16	0.12	0.10
Plywood 6mm, dengan rongga udara 25mm berisi fiber glass	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09	0.09
Plywood 9mm	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Plywood 12mm	0.03	0.08	0.17	0.13	0.13	0.11
Tembok bata, tanpa cat	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Tembok bata, dicat	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Balok beton, dicat	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Balok cor, dicat	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Karpet biasa	0.10	0.14	0.20	0.33	0.50	0.60
Absorpsi udara /m ³	0	0	0	0.003	0.009	0.024



Tabel 1 merupakan beberapa material dengan nilai koefisien serap atau nilai kemampuan untuk menyerap suara pada beberapa frekuensi (Hz). Koefisien absorpsi bahan tertentu sangat menentukan perubahan kualitas akustik ruang [10]. Perilaku bunyi dapat merambat langsung melalui udara dari sumbernya ke telinga manusia, gelombang bunyi dapat juga terpantul-pantul terlebih dahulu oleh permukaan bangunan, menembus dinding, membelok, menyebar, atau merambat melalui struktur bangunan [11].

Intensitas kehadiran mempengaruhi subjektivitas pendengar karena berkaitan dengan adaptasi terhadap kondisi lingkungan. Semakin sering atau lama subjek berada dalam kondisi tertentu, maka subjek akan beradaptasi dengan kondisi lingkungan tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi subjektivitas pendengaran manusia adalah usia, jenis kelamin, jenis pekerjaan, posisi pendengar, dan sebagainya.

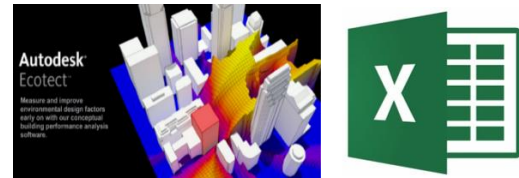
3. Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode pengukuran perhitungan pada aplikasi *Autodesk Ecotect Analysis v5.50*, perhitungan manual dengan rumus waktu dengung menurut Sabine pada frekuensi 500 Hz. Sehingga hasil tersebut didapatkan selisih untuk mendapatkan hasil yang valid. Serta pembagian kuesioner yang diolah menggunakan *Microsoft Excel 2021*.

Luas ruang ibadah pada semua segmen lantai 1, 2, dan 3 adalah 19.8 x 23.3 m. Titik ukur dibagi menjadi 9 titik ukur pada segmen lantai 1 dan 2, 7 titik ukur pada segmen lantai 3. Kuesioner tertutup dibagikan sesuai dengan titik ukur setiap segmen lantai dengan sampel 5 responden per titik ukur.

4. Metode Analisis Data

Berdasarkan tujuan penelitian dan perumusan masalah yang telah dijelaskan maka metode penelitian yang diterapkan yaitu metode penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif adalah metode penelitian yang menggunakan proses data-data yang berupa angka sebagai alat menganalisis dan melakukan kajian penelitian, terutama mengenai apa yang sudah diteliti [12]. Sehingga data hasil kuesioner digunakan untuk menjelaskan keterkaitannya dengan data hasil pengukuran [13].

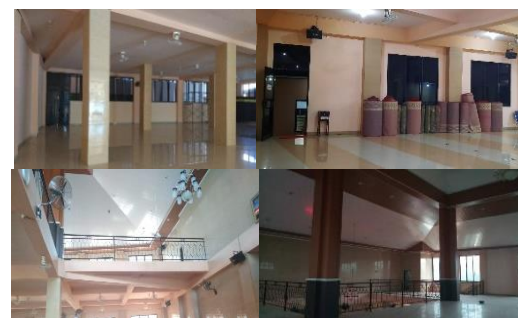


Gambar 1. Instrumen penelitian program aplikasi

Pada Gambar 1 merupakan instrumen yang digunakan untuk melakukan penelitian. Aplikasi yang digunakan adalah *Autodesk Ecotect Analysis* untuk melakukan simulasi waktu dengung dengan kondisi eksisting beserta setelah melakukan beberapa alternatif material dan *Microsoft Excel 2021* untuk membuat tabel dalam pengolahan data hasil simulasi. *Microsoft Excel 2021* juga digunakan untuk mengolah hasil dari kuesioner yang diberikan kepada para responden.

5. Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 merupakan kondisi eksisting dari interior ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar. Material lantai dari semua segmen adalah keramik dan dinding menggunakan pasangan batu bata yang difinishing. Material yang digunakan pada plafon untuk segmen lantai 1 dan 2 menggunakan plafon beton sehingga berbentuk rata, sedangkan segmen lantai 3 menggunakan PVC yang berbentuk limasan. Pada segmen lantai 2 terdapat void pada plafon.



Gambar 2. Interior ruang Ibadah Masjid Al-Abrar

5.1. Analisis Waktu Dengung (*Reverberation Time/RT*)

Analisis waktu dengung (*reverberation time*) dilakukan dengan perhitungan yang dilakukan manual menggunakan rumus Sabine dan juga simulasi menggunakan *Autodesk Ecotect Analysis*.

Berikut adalah perhitungan manual waktu dengung ruang gereja tersebut dengan menggunakan rumus Sabine [4]:

$$RT = \frac{0.16V}{A + xV} \quad (1)$$

Dimana,
 RT = Waktu dengung (detik)
 $0,16$ = Konstanta (det/m)
 V = Volume ruangan (m^3)
 A = Koefisien absorb material dalam ruangan (Sabin m^2)

Tabel 2. Hasil perhitungan manual waktu dengung segmen lantai 1 pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar

Objek	Material	Koef.	Jumlah	Luas (m^2)	Total Luas (m^2)
Lantai	Lantai keramik	0.02	-	445.25	445.25
Dinding	Pasangan batu bata	0.02	-	265.78	265.78
Dinding Timur	Plywood 6mm	0.14	-	27.58	27.58
Plafon	Plafon beton	0.06	-	439.01	439.01
Kolom utama	Lantai keramik	0.02	9	10.08	90.72
Pintu utama	Kaca biasa	0.04	2	8.2	16.38
Pintu samping	Kaca biasa + aluminium	0.04	1	3.59	3.59
Jendela 1	Kaca biasa + aluminium	0.18	9	1.65	14.22
Jendela 2	Kaca biasa + aluminium	0.18	2	1.18	2.36
Jendela 3	Kaca biasa + aluminium	0.18	5	1.16	5.81
Jendela 4	Kaca biasa + aluminium	0.18	19	1.35	25.65
Speaker	Speaker	0.45	6	0.6	3.6
Total A					56.4928
Volume					1864.72
Waktu Dengung (RT)					5.3 detik

Pada Tabel 2, hasil dari perhitungan manual waktu dengung (*reverberation time*) pada segmen lantai 1 ruang ibadah masjid Al-Abrar menggunakan rumus Sabine dengan frekuensi

500 Hz adalah 5,3 detik. Hasil perhitungan waktu dengung yang jauh dari standar yang telah ditentukan.

Tabel 3. Hasil perhitungan manual waktu dengung segmen lantai 2 pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar

Objek	Material	Koef.	Jumlah	Luas (m^2)	Total Luas (m^2)
Lantai	Lantai keramik	0.02	-	445.36	445.36
Dinding	Pasangan batu bata	0.02	-	194.95	194.95
Dinding Barat	Lantai keramik	0.02	-	116.54	116.54
Plafon	Plafon beton	0.06	-	415.53	415.53
Kolom utama	Lantai keramik	0.02	6	8.4	50.4
Pintu Barat	Kaca biasa + aluminium	0.04	1	1.48	1.48
Pintu Selatan	Kaca biasa + aluminium	0.04	1	1.7	1.7
Jendela	Kaca biasa + aluminium	0.18	49	1.54	75.46
Partisi	Kayu (solid)	0.05	3	6.75	26.46
Jam	Kayu (solid)	0.05	1	2.43	2.43
Lemari kaca	Kaca biasa + aluminium	0.18	2	4.5	9
Mimbar	Kayu (solid)	0.05	1	3.4	3.4
Speaker	Speaker	0.45	8	0.6	4.8
Total A					60.1813
Volume					1975.17
Waktu Dengung (RT)					4.97 detik



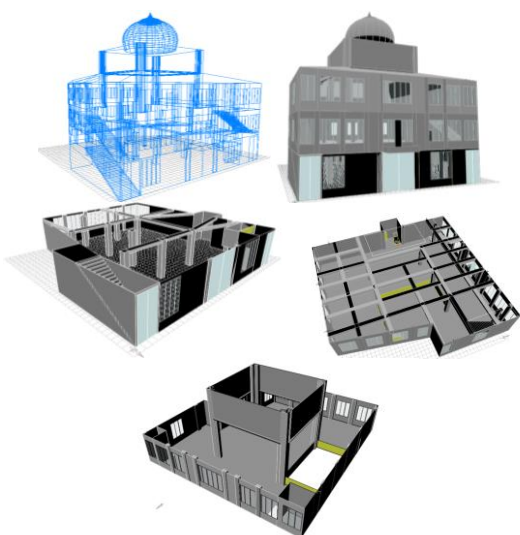
Pada Tabel 3, hasil dari perhitungan manual waktu dengung (*reverberation time*) pada segmen lantai 2 ruang ibadah masjid Al-Abrar menggunakan rumus Sabine dengan frekuensi

500 Hz adalah 4,97 detik. Hasil perhitungan waktu dengung yang jauh dari standar yang telah ditentukan.

Tabel 4. Hasil perhitungan manual waktu dengung segmen lantai 3 pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar

Objek	Material	Koef.	Jumlah	Luas (m ²)	Total Luas (m ²)
Lantai	Lantai keramik	0.02	-	415.53	415.53
Dinding	Pasangan batu bata	0.02	-	452.32	452.32
Dinding Barat	Lantai keramik	0.02	-	96.23	96.23
Kubah	Beton	0.06	-	168.73	168.73
Plafon	PVC	0.03	-	381.02	381.02
Kolom utama	Plywood	0.14	4	39.95	159.8
Pintu Samping	Kaca biasa + aluminium	0.04	3	1.63	4.89
Jendela	Kaca biasa + aluminium	0.18	51	1.54	78.54
Speaker	Speaker	0.45	2	0.6	1.2
Total A					239.2832
Volume					2707.6
Waktu Dengung (RT)					1.8 detik

Hasil dari Tabel 4, hasil dari perhitungan manual waktu dengung (*reverberation time*) pada segmen lantai 3 ruang ibadah masjid Al-Abrar menggunakan rumus Sabine dengan frekuensi 500 Hz adalah 1,8 detik. Hasil perhitungan waktu dengung yang paling rendah dan mendekati nilai standar dibandingkan dengan perhitungan manual waktu dengung pada segmen lantai 1 dan 2 ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar.



Gambar 3. Model simulasi dan visualisasi interior ruang masjid

Gambar 3 dan Tabel 5, 6, dan 7 adalah gambar model menggunakan aplikasi Autodesk Ecotect Analysis v5.50.

Setelah dibentuk model sesuai dengan dimensi dan material yang digunakan pada ruang ibadah Al-Abrar maka berikut merupakan tabel hasil simulasi nilai RT menggunakan aplikasi Ecotect Analysis v5.50.

Tabel 5. Hasil simulasi RT lantai 1 Masjid Al-Abrar Makassar

Frekuensi (Hz/kHz)	Total absorpsi	RT60 Sabine (detik)
63 Hz	99.784	5.39
125 Hz	90.118	5.40
250 Hz	60.996	5.41
500 Hz	83.526	5.41
1 kHz	61.21	5.41
2 kHz	80.744	5.38
4 kHz	136.028	5.32
8 kHz	141.96	5.22
16 kHz	167.692	5.20

Hasil perhitungan manual waktu dengung pada segmen lantai 1 menggunakan rumus Sabine dan didapatkan hasil 5,3 detik. Sedangkan pada hasil perhitungan pada Ecotect Analysis v5.50 adalah 5,41 detik pada Tabel 5. Selisih antara perhitungan manual dengan komputerisasi mempunyai selisih yang tidak terlalu jauh yaitu 0,11 detik.

Tabel 6. Hasil simulasi RT Lantai 2 Masjid Al-Abrar Makassar

Frekuensi (Hz/kHz)	Total absorpsi	RT60 Sabine (detik)
63 Hz	302.406	1.2
125 Hz	275.392	1.32
250 Hz	154.936	2.31
500 Hz	85.419	4.05
1 kHz	65.285	4.31
2 kHz	93.117	2.9
4 kHz	157.875	1.84
8 kHz	167.658	1.41
16 kHz	195.158	1.32

Hasil perhitungan manual waktu dengung pada segmen lantai 2 menggunakan rumus Sabine dan didapatkan hasil 4,97 detik. Sedangkan pada hasil perhitungan pada *Ecotect Analysis v5.50* adalah 4,05 detik pada Tabel 6. Selisih antara perhitungan manual dengan komputerisasi mempunyai selisih yang tidak terlalu jauh yaitu 0,92 detik.

Tabel 7. Hasil simulasi RT Lantai 3 Masjid Al-Abrar Makassar

Frekuensi (Hz/kHz)	Total absorpsi	RT60 Sabine (detik)
63 Hz	82.189	3.81
125 Hz	69.397	4.38
250 Hz	96.243	3.19
500 Hz	231.757	1.36
1 kHz	441.444	0.72
2 kHz	459.870	0.68
4 kHz	406.295	0.76
8 kHz	384.974	0.76
16 kHz	355.071	0.81

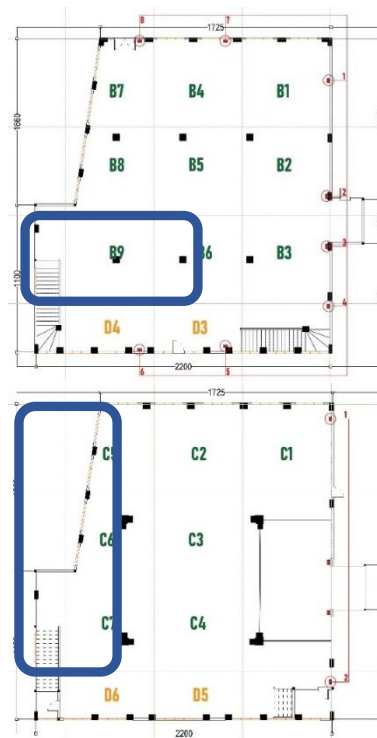
Sedangkan hasil perhitungan manual waktu dengung (*reverberation time*) pada segmen lantai 3 menggunakan rumus Sabine dan didapatkan hasil 1,8 detik. Sedangkan pada hasil perhitungan pada *Ecotect Analysis v5.50* adalah 1,36 detik pada Tabel 7. Selisih antara perhitungan manual dengan komputerisasi mempunyai selisih yang tidak terlalu jauh yaitu 0,44 detik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perhitungan ini sudah sesuai dengan keadaan pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar.

Waktu dengung untuk jenis *speech room* disarankan berada pada 0,60-1,20 detik [8]. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi dalam ruangan ibadah segmen lantai 1,2, dan 3 melebihi standar

yang ada. Sehingga waktu dengung (RT) pada ruang ibadah Masjid Al-Abrar masih perlu memenuhi standar untuk kegiatan beribadah.

5.2. Hasil Kuesioner

Pada waktu salat wajib, hanya segmen lantai 2 yang digunakan. Pada waktu salat jumat adalah penggunaan semua segmen lantai digunakan oleh jemaah. Namun pada segmen lantai 1 hanya 3 titik ukur saja yang digunakan. Sehingga pembagian responden hanya dapat dibagikan pada titik ukur A1, A2, dan A3. Pada lantai 2 dan 3 penggunaan kapasitas ruang ibadah adalah lebih 85 persen dan mencakup semua titik ukur yang telah ditentukan untuk pembagian kuesioner. Pada segmen lantai 1, lantai 2, dan lantai 3, jumlah responden masing-masing adalah 15, 111, dan 35 responden dengan jumlah 161 responden.



Gambar 4. Posisi responden yang merasa terganggu terhadap khotbah/speech yang menggema (kotak biru) secara berturut-turut pada segmen Lantai 2, dan Lantai 3

Hasil responden pada segmen lantai 1 tidak merasakan adanya masalah pada waktu dengung. Pada Gambar 4 tentang zonasi gangguan audial yang dirasakan responden, titik yang merasa terganggu dengan kejelasan kalimat yang kurang jelas adalah titik ukur B9, C5, C6, dan C7. Hal ini dapat dikaitkan dengan posisi duduk berpengaruh

terhadap pendengaran manusia karena adanya perbedaan jarak ke sumber suara [14] serta perbedaan bentuk dan material pada tiap posisi duduk.

Hasil simulasi pada *ecotect analysis* menghasilkan semua pada segmen lantai mengalami masalah pada waktu dengung. Terlebih pada lantai 1, tetapi tidak ada responden yang memberikan komentar pada masalah *speech*. Namun dengan jumlah responden yang terbatas pada segmen lantai 1 yang hanya untuk titik ukur A1, A2, dan A3. Responden pada titik ukur A1, A2, dan A3 merupakan jemaah yang sudah sering mengunjungi masjid. Hal ini membuktikan semakin sering atau lama subjek berada dalam kondisi tertentu, maka subjek akan beradaptasi dengan kondisi lingkungan tersebut.

5.3. Perbaikan Kondisi Akustik

Hasil simulasi yang telah dianalisis menggunakan *Autodesk Ecotect Analisis v5.50* sebelumnya dapat disimpulkan yaitu perlu

dilakukan perbaikan kondisi akustik masjid untuk mencapai waktu dengung yang sesuai standar. Simulasi dengan menggunakan program *Autodesk Ecotect Analisis v5.50* dilakukan dengan tujuan menemukan solusi desain yang optimal dan sesuai dengan standar waktu dengung (RT) untuk mencapai kenyamanan audial masjid.

Cara untuk mengatasi masalah waktu dengung (RT) untuk segmen lantai 1 dan 2 adalah dengan penambahan material plafon menggunakan *acoustic tile* atau *fiberglass plafon tile*. Penyerapan oleh elemen plafon sangat bermanfaat untuk mengontrol waktu dengung dan bising latar belakang (*background noise*) [15]. Kemudian menambah ketebalan dinding untuk segmen lantai 1, 2, dan 3.

Berikut merupakan hasil simulasi *Autodesk Ecotect Analisis v5.50* untuk perbaikan kondisi waktu dengung semua segmen lantai (1, 2, dan 3) ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar dengan beberapa alternatif yang hasilnya sesuai dengan standar yang digunakan.

Tabel 8. Hasil simulasi RT Lantai 1 dengan alternatif penambahan material dinding dan plafon

No.	Dimensi Elemen Pembentuk ruang (Penambahan Material)	Alternatif Material	Luas (m ²)	RT(60) Sabine
1	Dinding	<i>Rockwool, plywood</i>	265.78	1.08 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	439.01	
2	Dinding	<i>Air gap 50mm, rockwool, plywood</i>	132.89	1.16 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	439.01	
3	Dinding	<i>Air gap 100mm, wood panel</i>	265.78	1.05 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	439.01	
4	Dinding	<i>Acourete board</i>	265.78	1.15 detik
	Dinding	<i>Air gap 100mm, acourete fiber, gypsum board</i>	265.78	
5	Dinding	<i>Acourete fiber, gypsum board</i>	265.78	1.19 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	439.01	
6	Plafon	<i>Fiberglass plafon tile</i>	439.01	0.83 detik

Pada Tabel 8, terdapat 6 alternatif yang dapat digunakan segmen lantai 1 ruang ibadah Al-Abrar untuk mencapai waktu dengung yang

sesuai standar kenyamanan audial dari ruang masjid.



Tabel 9. Hasil simulasi RT Lantai 2 dengan alternatif penambahan material dinding dan plafon

No.	Dimensi Elemen Pembentuk ruang (Penambahan Material)	Alternatif Material	Luas (m ²)	RT(60) Sabine
1	Dinding	<i>Rockwool, plywood</i>	194.95	1.14 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	415.53	
2	Dinding	<i>Air gap 100mm, wood panel</i>	194.95	1.07 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	415.53	
3	Dinding	<i>Acourete board</i>	194.95	0.97 detik
	Dinding	<i>Air gap 100mm, acourete fiber, gypsum board</i>	194.95	
4	Dinding	<i>Acourete fiber, gypsum board</i>	194.95	0.12 detik
	Plafon	<i>Acoustic tile</i>	415.53	
5	Plafon	<i>Fiberglass plafon tile</i>	415.53	0.91 detik

Pada Tabel 9, terdapat 5 alternatif yang dapat digunakan segmen lantai 2 ruang ibadah Al-Abrar untuk mencapai waktu dengung yang sesuai standar kenyamanan audial dari ruang masjid.

Tabel 10. Hasil Simulasi RT Lantai 3 dengan alternatif penambahan material dinding

No.	Dimensi Elemen Pembentuk ruang (Penambahan Material)	Alternatif Material	Luas (m ²)	RT(60) Sabine
1	Dinding	<i>Rockwool, plywood</i>	194.95	0.98 detik
2	Dinding	<i>Acourete board</i>	194.95	0.74 detik
3	Dinding	<i>Air gap 100mm, acourete fiber, gypsum board</i>	194.95	0.76 detik

Pada Tabel 9, terdapat 3 alternatif yang dapat digunakan segmen lantai 3 ruang ibadah Al-Abrar untuk mencapai waktu dengung yang sesuai standar kenyamanan audial dari ruang masjid. Standar waktu dengung (*reverberation time*) untuk jenis *speech auditorium* disarankan berada pada 0,6-1,2 detik. Hasil simulasi pada aplikasi *Ecotect Analysis* Tabel 8, Tabel 9 dan tabel 10 telah memenuhi standar alternatif karena berada pada 0,6-1,2 detik waktu dengung (RT) pada segmen lantai 1,2, dan 3 ruang ibadah Masjid Al-Abrar.

6. Kesimpulan

Daya serap atau koefisien absorb material menciptakan karakter akustik yang berbeda sehingga perlu untuk memikirkan material yang sesuai dalam merancang sebuah bangunan, khususnya ruang ibadah masjid. Waktu dengung (*reverberation time*) menurut Egan *speech room* disarankan berada pada 0.60-1.20 detik [7]. Pada

ruang ibadah Masjid Al-Abrar Makassar masih belum memenuhi standar kenyamanan audial masjid. Namun hasil dari keusioner pengguna masjid sudah merasa nyaman dengan keadaan tersebut.

Referensi

- [1] Mariani. and R. Nurlaela, "Deskripsi kondisi akustik ruang masjid al markaz al islami makassar," *J. SMARTek*, vol. 6, no. 4, pp. 246–260, 2008.
- [2] Soegijanto, "Penelitian Kinerja Akustik Mesjid di Indonesia," ITB, 2001.
- [3] W. A. A. Hedy C. Indrani, Sri Nastiti N. Ekasiwi, "Analisis Kinerja Akustik Pada Ruang Auditorium Multifungsi," 2007.
- [4] W. C. Sabine, *Design for Good Acoustics. Collected Papers on Acoustics*. U.S: Peninsula, 1993.
- [5] C. I. P. K. Kencanawati, "Akustik dan Material Penyerap Suara," Universitas Udayana, 2017.
- [6] L. Doelle, *Akustik Lingkungan*. Jakarta: Erlangga, 1993.
- [7] N. R. Syamsiyah, S. Utami, and A. Dharoko, "Kualitas Akustik Ruang Pada Masjid Berkarakter Opening Wall Design (Studi Kasus: Masjid Al Qomar



- Purwosari Surakarta),” *Simp. Nas. RAPI XIII - 2014 FT UMS*, no. December 2014, 2014.
- [8] M. D. Egan, *Concept in Architectural Acoustics*. McGraw Hill, Inc. United States of America, 1976.
- [9] F. Maulana, “Kajian Kualitas Pencahayaan, Penghawaan, dan Akustik pada Ruang Salat Masjid Raya Al-Jihad,” Karawang, 2018.
- [10] L. L. Doelle, *Environmental Acoustic*. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1972.
- [11] P. Satwiko, *Fisika Bangunan*. Penerbit Andi, 2008.
- [12] M. Kasiram, “Metode Penelitian Kuantitatif-Kualitatif,” UIN Malang Press, 2008.
- [13] Sugiyono, *Metode Penelitian Pendidikan (Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D)*. Bandung: Alfabeta, 2010.
- [14] C. E. Mills, “Podocoryne Selena, a New Species of Hydroid from the Gulf of Mexico, and a Comparison with Hydractinia Echinata,” vol. 151, pp. 214–224, 1976.
- [15] M. N. Massiki, “Desain Akustik Ruang Sholat Masjid Agung Darussalam Palu,” *J. Ruang*, 2011.



Optimasi Layanan Air Baku dan Irigasi Embung Kawari Kabupaten Jeneponto

Muh Nur Asri Amin^{1*}, Farouk Maricar¹, Mukhsan Putra Hatta¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: m.nurasri91@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.04

Abstrak

Perencanaan pembangunan Embung Kawari untuk mengatasi keterbatasan sumber air yang ada di Kecamatan Bontoramba, Provinsi Sulawesi Selatan. Embung tersebut digunakan untuk memenuhi kebutuhan air baku dan irigasi. Pemenuhan layanan embung perlu dioptimasi untuk memenuhi jumlah kebutuhan air baku dan irigasi dengan berbagai skenario. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan menentukan jumlah pemakaian air untuk kebutuhan air baku dan irigasi secara optimal. Optimasi dilakukan dengan metode *Generalized Reduced Gradient* (GRG). Untuk fungsi tujuan memaksimalkan penggunaan air embung. Hasil optimasi diperoleh dua kriteria, kriteria A pemanfaatan air untuk air baku sebesar 42% dari proyeksi penduduk di tahun 2029 dan areal layanan irigasi untuk tanaman padi seluas 316,13 Ha dan tanaman jagung 63,87 Ha, kriteria B pemanfaatan untuk air baku sebesar 42% dari proyeksi penduduk di tahun 2029 dan areal layanan irigasi pada tanaman jagung seluas 697,35 Ha dan masing masing keuntungan dari sektor pertanian untuk kriteria A sebesar Rp 7.447.434.604,00, dan Kriteria B sebesar Rp 11.694.575.287,00.

Abstract

Optimization of Raw Water and Irrigation Services for Kawari Dam, Jeneponto Regency. Kawari dam construction design to overcome the limitations of water resources in Kecamatan Bontoramba, South Sulawesi. The Dam is used to comply raw water needs and irrigation. The fulfillment of raw service requirements optimization to fulfill the amount of raw water in vary scenarios. This research aims to determine the amount of water usage for raw water and irrigation needs optimally. The optimization performed with *Generalized Reduced Gradient* (GRG) Methods. For the purpose of its function is to maximize the dam water usage. The optimization results obtained two criteria, Criterion A The use of water for raw water is 42% of the estimated population in 2029 and the irrigation service area for rice plants is 316.13 Ha and corn 63.87 Ha, Criterion B utilization for raw water is 42% from the estimated population in 2029 and the corn crop irrigation service area is 697.35 Ha and each profit from the agricultural sector for criteria A is Rp 7.447.434.604,00 and criteria B is Rp 11.694.575.287,00.

Kata Kunci: Embung, ketersediaan air, pemenuhan kebutuhan air, optimasi

1. Pendahuluan

Kehidupan manusia tidak terlepas dari kebutuhan akan air. Air dipergunakan untuk berbagai keperluan terutama untuk menjamin kelangsungan hidup manusia [1] dalam hal ini yang dimaksud adalah air bersih atau air minum. Air bersih yang digunakan haruslah memenuhi syarat dalam segi jumlah maupun mutunya. Karena itu penyediaan air bersih perlu diusahakan baik oleh pemerintah maupun masyarakat sendiri.

Hingga saat ini ketercapaian Indonesia dalam memenuhi kebutuhan air bersih nasional masih belum memenuhi target yang diharapkan. Masalahnya terdapat pada tata kelola yang kurang baik. Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 16 tahun 2005, salah satu aspek yang

menjadi acuan dalam program penyediaan air baku yaitu Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) diselenggarakan berdasarkan asas kelestarian, keseimbangan, kemanfaatan umum, keterpaduan dan keserasian, keberlanjutan, keadilan, kemandirian, serta transparansi dan akuntabilitas [2].

Pengaturan pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) dilakukan sehubungan dengan tersedianya potensi sumber air berupa DPS/DAS yang dapat dimanfaatkan untuk pemenuhan air baku. Ketersediaan sumber air di Kabupaten Jeneponto yaitu pada Sungai Kawari merupakan salah satu potensi air baku dan irigasi untuk memenuhi kebutuhan penduduk di Kabupaten Jeneponto Khususnya di Kecamatan Bontoramba. Menyadari



ketergantungan tersebut manusia dituntut untuk selalu dapat menyediakan air bersih guna dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Berbagai teknologi dimanfaatkan untuk menghadirkan air ditengah kehidupan manusia walaupun kondisi alam yang tidak memungkinkan. Kebutuhan air bersih di Kec. Bontoramba sangat terbatas dan dari tahun ke tahun semakin meningkat sejalan dengan perkembangan jumlah penduduk yang sedemikian pesat. Jumlah penduduk yang ada di Kec. Bontoramba pada tahun 2019 yaitu 36 590 jiwa, dan area Irigasi ±380 Ha. Untuk memenuhi kebutuhan air bersih dan Irigasi, penduduk Kec. Bontoramba saat ini memanfaatkan beberapa sumber air, seperti dari sungai, sumur dan air hujan.

Terdapat dua sektor utama yang menggunakan air yaitu pertanian dan rumah tangga. Pertanian merupakan pengguna air terbesar yaitu sekitar 65% dari seluruh sumber air [3]. Salah satu upaya untuk meningkatkan ketahanan air dan ketahanan pangan adalah dengan merencanakan pembangunan embung [4] yang berada di Desa Tanammawang Kecamatan Bontoramba Kabupaten Jeneponto Provinsi Sulawesi Selatan merupakan daerah yang cukup kering. Dengan adanya embung, ketahanan air dan pangan di desa tersebut dapat meningkat. Oleh karena itu pembangunan embung perlu direncanakan dengan baik, agar air tampungan dapat dimanfaatkan secara optimal dan berkelanjutan dengan mengoptimalkan penggunaan air baku dan irigasi [5].

Penentuan jumlah air secara optimal dilakukan dengan pendekatan optimasi. Optimasi adalah subyek yang populer dalam studi pengelolaan sumber daya air. Metode ini telah digunakan dalam beberapa dekade sebagai solusi untuk perencanaan dan pengelolaan sumber daya air [6].

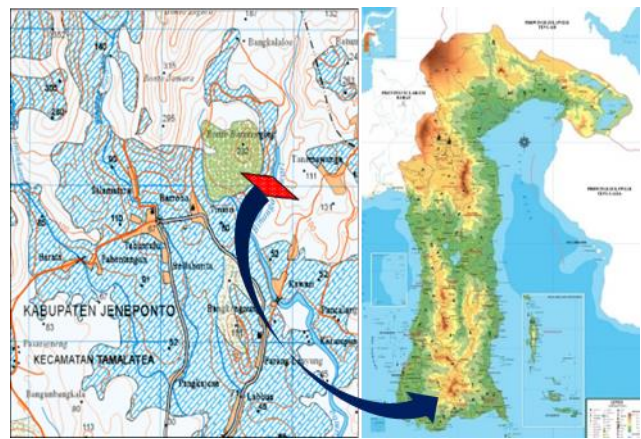
Teknik optimasi lainnya yang sering di gunakan adalah *Generalized Reduced Gradient* (GRG). Teknik ini sudah tersedia dalam *Microsoft Excel*. GRG adalah alat optimasi di *Microsoft Excel* yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai optimal dari parameter linier serta persamaan nonlinier. Metode Solver dalam *Microsoft Excel* terdiri dari Linear Programming Solver (LP) untuk persamaan linier, GRG dan Evolutionary Solver untuk optimasi persamaan nonlinier [7]–[9]

2. Metodologi

2.1. Lokasi Penelitian

Secara administratif, Rencana Embung Kawari terletak di Desa Tanammawang Kecamatan Bontoramba Kabupaten Jeneponto. Adapun batas sebelah barat dengan Desa Kareloe, sebelah timur dengan Desa Baraya dan Desa Lembangloe (Kabupaten Gowa), sebelah utara dengan Desa Lembangloe (Kabupaten Gowa) dan sebelah selatan dengan desa Baraya. Kordinat lokasi: 5°32'53.47"LS dan 119°41'51.05"BT.

Embung Kawari terletak pada Sungai Kawari yang merupakan anak sungai Bontoramba dan selanjutnya mengalir ke selatan ke aliran Sungai Taman Roya. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan sarana pokok untuk menemukan penyelesaian suatu masalah secara ilmiah. Dalam pengumpulan data, peranan instansi yang terkait sangat diperlukan sebagai pendukung dalam memperoleh data-data yang diperlukan.

Data diperoleh menggunakan data-data yang pernah dicatat dan didesain oleh instansi yang berkepentingan dalam hal ini adalah dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Sulawesi Selatan Bidang Pengairan dan Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang. Data tersebut kemudian diolah menjadi data siap pakai yang nantinya menjadi masukan dalam analisa selanjutnya. Adapun data tersebut adalah:

- 1) Data hujan diambil dari stasiun pencatat yang berpengaruh pada daerah pengaliran Sungai

Kawari yaitu: Stasiun Topa/Tuju, Stasiun Paitana dan Stasiun Paladingan

- 2) Data Klimatologi Stasiun Gantinga
- 3) Peta lokasi dan peta topografi Embung Kawari
- 4) Laporan perencanaan Embung Kawari

2.3. Analisis Data

Tahapan analisa dalam penelitian ini, secara garis besar adalah sebagai berikut:

- a) Menghitung Curah Hujan Bulanan Rata-Rata
Dalam memperhitungkan hujan rerata polygon Thiessen pada daerah tangkapan yang ditinjau pada penelitian ini menggunakan bantuan software autocad dalam membuat polygon Thiessen daerah tangkapan dan untuk mengetahui luas daerah hujan pada setiap stasiun hujan yang berpengaruh terhadap DAS yang ditinjau [10].

- b) Menguji Konsistensi Data
Dalam penelitian ini uji konsistensi data menggunakan metode RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*).

- c) Menghitung Evapotranspirasi
Perhitungan evapotranspirasi potensial dengan menggunakan Metode Penman modifikasi [11].

- d) Menghitung Debit Dari Data Hujan
Perhitungan limpasan model NRECA dibagi menjadi dua bagian yaitu perhitungan limpasan langsung (*direct runoff*) dan air tanah yang menuju ke sungai (*Groudwater*) [11].

- e) Menghitung Debit Andalan
Dalam menentukan besarnya debit andalan dengan peluang 80 % digunakan probabilitas Metode Weibull

- f) Menghitung Kebutuhan Air Baku
 - Analisis social merupakan aspek penting dalam menganalisis kebutuhan penyediaan di masa mendatang. Analisis sosial untuk masa mendatang dilaksanakan dengan dasar analisis pertumbuhan penduduk pada wilayah yang direncanakan [12]. Kebutuhan air 32ocial32c untuk kota dibagi dalam beberapa kategori dan kriteria.

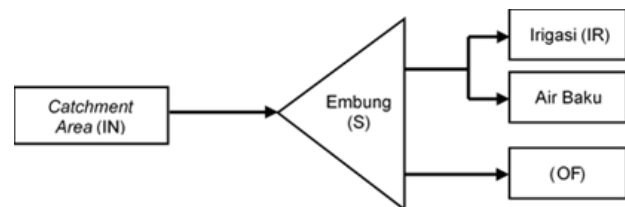
Perencanaan air bersih pada tiap – tiap kategori [13].

- Analisis 32ocial non 32ocial32c dilaksanakan dengan berpegangan pada analisis data pertumbuhan terakhir fasilitas – fasilitas 32ocial ekonomi yang ada pada wilayah perencanaan

- g) Meghitung Kebutuhan Air Irigasi
Kebutuhan air irigasi dapat diketahui dengan menghitung kebutuhan air tanaman. Hasil perhitungan irigasi digunakan untuk menganalisis air, yaitu membandingkan debit air yang ada di sungai dengan kebutuhan air irigasi [14].

- h) Analisis Neraca Air
Kondisi neraca air pada rencana Embung Kawari dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kontinuitas.

- i) Optimasi Operasi Waduk
Optimasi operasi waduk terhadap pemenuhan layanan air baku dan Irigasi dengan memaksimalkan pola tanam dan area layanan irigasi menggunakan metode solver. Skema sistem Embung seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema aliran rencana embung kawari

dimana,

- IN : jumlah air yang masuk (inflow) ke dalam embung,
 S : volume tampungan embung,
 IR : jumlah air dari embung untuk keperluan irigasi,
 OF : Outflow embung yang melewati spillway.

Debit outflow merupakan kelebihan debit setelah dimanfaatkan untuk irigasi serta tidak tertampung dalam embung. Outflow dilewatkan melalui pelimpah.

- j) Perumusan Komponen Model
Model adalah sebuah istilah yang merupakan gambaran dari keadaan nyata dan menyatakan

hubungan fungsional langsung maupun tidak langsung, antara satu unsur dengan unsur lainnya yang membentuk satu sistem [15].

Dalam hal ini, komponen-komponen model dinyatakan dalam simbol-simbol matematis. Dengan konfigurasi tata air pada Embung Kawari seperti disajikan pada gambar di atas, dapat di definisikan komponen model sebagai berikut:

- 1) Inflow (IN) pada waktu $t = 1, 2, 3, \dots, n$
- 2) Kebutuhan air baku dan irigasi (IR) pada waktu $t = 1, 2, 3, \dots, n$
- 3) Luas lahan yang dipenuhi (A) pada waktu $t = 1, 2, 3, \dots, n$

Untuk lebih jelasnya, nilai-nilai variabel harus diolah sedemikian rupa agar nilai fungsi tujuan maksimum dan mempunyai fungsi kendala (*constrains*).

k) Fungsi Tujuan

Pada kajian ini tujuan yang akan dicapai adalah untuk mengoptimalkan ketersediaan air sehingga memperoleh jumlah layanan irigasi yang optimal. Fungsi tujuan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Z_{\max} = (C_1 \times A_1) + (C_2 \times A_2) \quad (1)$$

Dimana, C_1 , C_2 adalah besarnya nilai parameter yang diperoleh dari hasil usaha pertanian per Ha dan A_1 , A_2 adalah luas lahan pada jenis tanaman.

l) Fungsi Kendala

Dalam analisa optimalisasi, sumber daya yang dianalisa tentu pada kondisi terbatas [16]. Keterbatasan sumber daya yang akan tersedia inilah yang dijadikan sebagai fungsi kendala. Jadi fungsi kendala berisi tentang batasan-batasan dalam melakukan optimalisasi.

Dalam studi ini ada beberapa sumber daya yang tersedia yang dibatasi, diantaranya adalah volume air yang tersedia dan luas lahan yang dapat ditanami.

Fungsi kendala dari Embung Kawari dapat dirumuskan adalah sebagai berikut:

- Luas lahan irigasi yang dipenuhi, $A_1 + A_2 \leq 380$ Ha (Kriteria A)
- Volume tampungan maksimum dari rencana Embung Kawari adalah 361211.7 m^3 (134.86 liter/ detik) dan volume tampungan minimumnya adalah 0 m^3 . Dimana $S_n \geq 0$

- Nilai outflow embung adalah lebih dari atau sama dengan nol

Jumlah air dari embung untuk keperluan air baku dan irigasi adalah indlow ditambah volume tampungan lebih besar atau sama dengan kebutuhan layanan air baku dan irigasi. Dimana $IN + S_n \leq IR_n$.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Hidrologi

Analisis hidrologi secara umum dilakukan guna mendapatkan karakteristik hidrologi daerah tangkapan air embung. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik hujan, debit atau potensi air yang akan digunakan sebagai dasar analisis selanjutnya. Dalam analisis hidrologi, kelengkapan dan ketersediaan data hidrologi akan sangat berpengaruh terhadap keakuratan hasil perhitungan.

1) Ketersediaan Air

a) Data Hujan

Data hujan yang dianalisis pada kajian ini adalah data curah hujan yang berpengaruh pada DTA Embung Kawari yaitu stasiun Topa/Toju dan stasiun Paladingan. Data yang digunakan adalah hasil pencatatan dari tahun 1995 sampai dengan tahun 2019.

b) Rekapitulasi Hasil Perhitungan Debit Andalan

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Dalam perencanaan proyek-proyek penyediaan air terlebih dahulu harus dicari debit andalan (*dependable flow*), yang tujuannya adalah untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai [17].



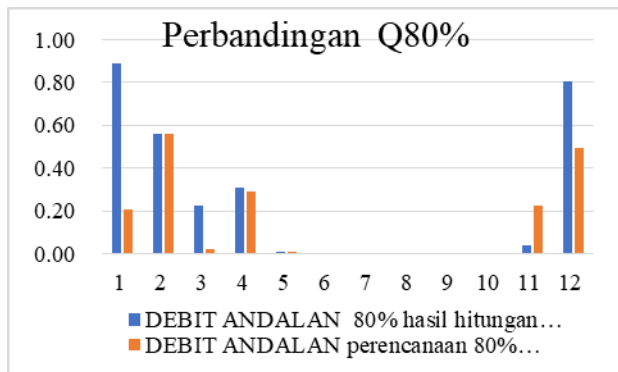
Gambar 3. Debit andalan embung kawari

Debit tersebut digunakan sebagai patokan ketersediaan debit yang masuk ke waduk/embung pada saat pengoperasiannya. Untuk menghitung debit andalan tersebut, dihitung peluang 80 % dari debit infow sumber air pada pencatatan debit pada periode tertentu. Hasil rekapitulasi debit bulanan dapat dilihat pada Gambar 3.

3.2. Validasi Data Debit

Validitas data adalah serangkaian bentuk ketepatan atas derajat dalam variabel penelitian yang menghubungkan antara proses penelitian pada obyek penelitian dengan data-data yang dilaporkan oleh seorang peneliti [18].

Dalam hal ini kami selaku penulis memvalidasi data dari hasil penelitian kami dan data dari laporan perencanaan BBWS Pompengan Jeneberang, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan debit andalan hasil olahan data dan perencanaan

3.3. Kebutuhan Air

1) Kebutuhan air baku

Kebutuhan layanan air baku pada rencana pembangunan Embung Kawari berdasarkan hasil perhitungan proyeksi penduduk tahun 2029 adalah 55.45 l/detik yang melayani 37.967 masyarakat di kecamatan Bontoramba.

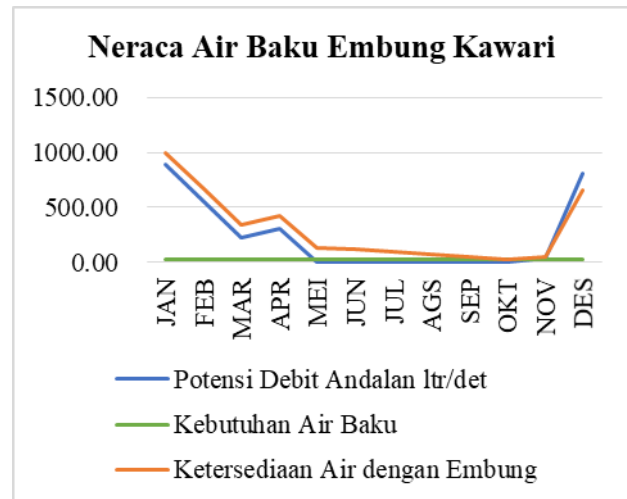
2) Kebutuhan air irigasi

Analisa kebutuhan air irigasi dimaksudkan untuk menentukan besarnya debit air yang dibutuhkan untuk daerah irigasi dalam rangka pemenuhan kebutuhan tanaman agar dapat tumbuh maksimal.

Curah hujan efektif adalah curah hujan yang jatuh pada suatu daerah dan dapat dipergunakan oleh tanaman untuk pertumbuhannya.

3.4. Neraca Air Embung Kawari

Neraca air dimaksudkan untuk menghitung besarnya aliran air yang masuk dan keluar dari sebuah sistem. Sistem tersebut dapat berupa kolam tanah atau wilayah aliran sungai [19]. Dalam perhitungan ini maka konsep perhitungan didasarkan pada debit masuk (*infow*). Yang berasal dari debit andalan sungai Kawari dan debit keluar untuk kebutuhan air baku. Neraca air dengan embung yang mampu melayani 15.778 penduduk dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Neraca air baku embung kawari

3.5. Model Optimasi

Berdasarkan data Neraca air diatas terdapat kelebihan air pada bulan desember sampai dengan bulan april sehingga kelebihan air tersebut dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan layanan irigasi. Kelebihan air pada bulan desember yaitu 658,07 l/ detik, januari 1101,92 l/ detik, february 669,92 l/ detik, maret 336 l/ detik, dan april 421,24 l/ detik. Kelebihan air tersebut akan dioptimasi dengan menggunakan 2 kriteria yaitu kriteria A dengan batasan luas layanan dan kriteria B tanpa batasan luas layanan.

Dan yang menjadi variabel A_1 adalah luas layanan irigasi untuk tanaman Padi dan Variabel A_2 adalah luas layanan irigasi untuk tanaman jagung. Yang menjadi fungsi tujuan adalah keuntungan bersih dari tanaman padi dan jagung. Untuk formula dari Z_{max} adalah (Fungsi tujuan untuk tanaman padi x A_1) + (Fungsi tujuan untuk tanaman jagung x A_2), dan Untuk formula dari fungsi kendala adalah sebagai berikut:

1. ((Jumlah kebutuhan air bulanan untuk tanaman padi x A₁) + (Jumlah Kebutuhan air bulanan untuk tanaman jagung x A₂)) ≤ Surplus Air bulanan (desember sampai april).
2. Jumlah Kapasitas tampungan bulanan (januari sd desember) ≥ 0
3. Luas layanan untuk Kriteria A yaitu: (A₁+A₂) ≤ 380 Ha

3.6. Hasil Optimasi

Berdasarkan hasil analisa debit andalan, kebutuhan air baku dan kebutuhan irigasi kami melakukan optimasi untuk mengetahui kemampuan embung dalam memaksimalkan

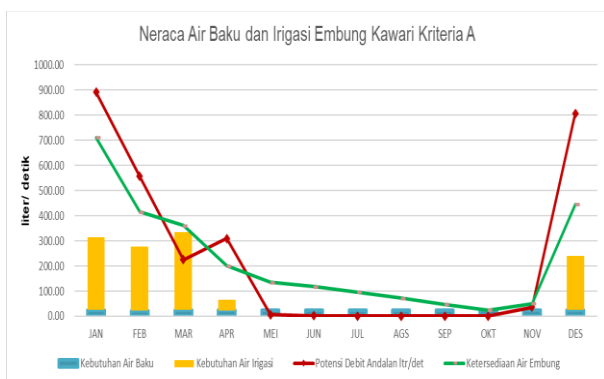
pelayanan terhadap irigasi. Dalam melakukan optimasi kami menetapkan dua Kriteria yaitu Kriteria A dengan tambahan batasan luas layanan irigasi dan Kriteria B tanpa batasan luas layanan irigasi.

1) Optimasi Kriteria A

Untuk memaksimalkan penggunaan lahan pada layanan irigasi maka dibuat pemodelan layanan optimasi kriteria A dengan tambahan batasan luas area layanan yaitu maksimal penggunaan lahan 380 Ha. Hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 1 dan neraca air embung kawari kriteria A pada Gambar 6.

Tabel 1. Hasil optimasi kriteria A

	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
Potensi Debit Andalan ltr/det	891.31	556.96	225.39	309.85	6.49	2.59	0.02	0.00	0.00	0.00	36.67	806.12
Kebutuhan Air Baku dan Irigasi	315.41	277.20	334.84	65.55	24.25	23.47	24.25	24.25	23.47	24.25	23.47	238.84
Kebutuhan Air Irigasi	291.16	255.29	310.59	42.08								214.58
Kebutuhan Air Baku	24.25	21.91	24.25	23.47	24.25	23.47	24.25	24.25	23.47	24.25	23.47	24.25
Ketersediaan Air Embung	710.76	414.63	360.25	200.41	134.86	117.09	96.21	71.98	47.72	24.25	49.86	445.62
Surplus/ Defisit	575.90	279.77	25.41	134.86	117.09	96.21	71.98	47.72	24.25	0.00	13.20	567.28



Gambar 6. Neraca air embung kawari kriteria A

Berdasarkan Tabel 1 maka diperoleh tambahan luas layanan irigasi untuk tanaman padi

yaitu 316.13 Ha, dan untuk tanaman jagung yaitu 63.87 Ha, dan keuntungan dari sektor pertanian sebesar Rp 7.447.434.604,00. Hasil optimasi menunjukkan bahwa intensitas tanam terjadi sebesar 100%.

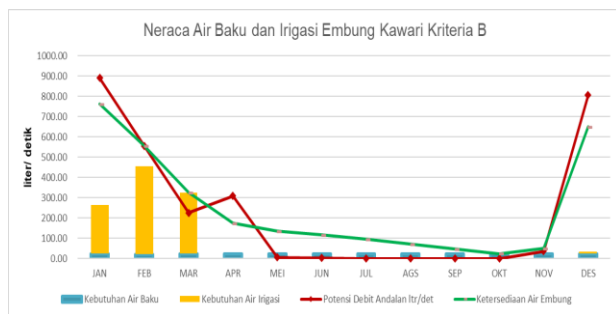
2) Optimasi Kriteria B

Untuk memaksimalkan Ketersediaan air pada embung maka dibuat pemodelan layanan optimasi kriteria B dengan menghilangkan batasan luas area layanan, Hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 2 dan neraca air Embung Kawari kriteria B pada Gambar 7.

Tabel 2. Hasil optimasi kriteria B

	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
Potensi Debit Andalan ltr/det	891.31	556.96	225.39	309.85	6.49	2.59	0.02	0.00	0.00	0.00	36.67	806.12
Kebutuhan Air Baku dan Irigasi	263.87	456.77	325.59	23.47	24.25	23.47	24.25	24.25	23.47	24.25	23.47	33.79
Kebutuhan Air Irigasi	239.62	434.86	301.33	0.00								9.54
Kebutuhan Air Baku	24.25	21.91	24.25	23.47	24.25	23.47	24.25	24.25	23.47	24.25	23.47	24.25
Ketersediaan Air Embung	762.30	556.96	325.59	174.99	134.86	117.10	96.21	71.98	47.73	24.26	49.86	650.66
Surplus/ Defisit	627.44	100.19	0.00	151.52	117.10	96.21	71.98	47.73	24.26	0.00	13.20	772.33





Gambar 7. Neraca air embung kawari kriteria B

Berdasarkan Tabel 2 maka diperoleh tambahan luas layanan irigasi untuk tanaman jagung yaitu 697,35 Ha, dan keuntungan dari sektor pertanian sebesar Rp 11.694.575.287,00. Hasil optimasi menunjukkan bahwa intensitas tanam terjadi sebesar 184%.

3.7. Pembahasan

Setelah melakukan optimasi dengan 2 (dua) kriteria, kami mendapatkan hasil sebagai berikut:

- 1) Kriteria A: Multi Purposes (Irigasi untuk layanan tanaman padi dan jagung 1 MT seluas 640 Ha; 316,13 Ha untuk padi dan 63,87 Ha untuk jagung dengan intensitas tanam sebesar 100% dan layanan air baku untuk 15.778 orang.
- 2) Kriteria B: Multi Purposes (Irigasi untuk layanan tanaman jagung 1 MT seluas 697,35 Ha dengan intensitas tanam sebesar 184%, dan layanan air baku untuk 15.778 orang.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

- 1) Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan dapat disimpulkan Embung Kawari mampu memenuhi layanan kebutuhan air baku sebesar 15.778 orang atau 42% dari jumlah penduduk di tahun 2029 yaitu 37.967 orang.
- 2) Berdasarkan hasil optimasi, terdapat tambahan layanan irigasi pada Embung Kawari yang memberikan intensitas tanam terbesar yaitu pada kriteria B dengan tanaman Jagung seluas 697,35 Ha dengan intensitas tanam sebesar 184%.

4.2. Saran

- 1) Dalam melakukan penelitian data-data yang diperlukan sebaiknya diperoleh terlebih dahulu agar tidak menghambat dan penelitian dapat dilakukan dengan waktu yang singkat.

- 2) Untuk memenuhi kebutuhan air di kecamatan bontoramba tahun 2029 agar memanfaatkan potensi air yang lain.

Referensi

- [1] P. S. Nurjannah, "Analisis Kapasitas Tampungan Embung Muaro Jambi," Universitas Islam Indonesia, 2015.
- [2] Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2005, "Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum," Jakarta, 2005.
- [3] L. W. Mays, *Water Resources Systems Management Tools*. New York: McGraw-Hill Education.
- [4] Soedibyo, *Perencanaan Bendungan*. Jakarta: Pradnya Paramita, 1998.
- [5] A. Prawito, "Studi optimasi Embung Tlogo di Kabupaten Rembang," *Neutron*, vol. 10, no. 2, pp. 32–41, 2010.
- [6] S. Ginting, "Optimasi Pemanfaatan Air Embung Kasih Untuk Domestik Dan Irigasi Tetes," *J. Irig.*, vol. 13, no. 1, pp. 41–54, 2018.
- [7] M. Zakwan and M. Muzzammil, "Developing stage-discharge relations using optimization techniques," *Aquademia Water, Environ. Technol.*, vol. 1, no. 2, 2017.
- [8] M. Zakwan, "Application of optimization technique to estimate IDF parameters," *Water Energy Int.*, vol. 59, no. 5, pp. 69–71, 2016.
- [9] A. F. Azis, "Optimasi Pola Operasi Waduk Bili-Bili dan Model Simulasi Untuk Memenuhi Kebutuhan PLTA," Universitas Hasanuddin, 2019.
- [10] Br. Sri Harto, *Analisis Hidrologi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 1993.
- [11] S. Imam, *Hidrologi untuk Perencanaan Bangunan Air*. Bandung: Idea Dharma, 1980.
- [12] Muliakusuma, *Proyeksi Penduduk*. Jakarta: Lembaga Demografi FEUI, 1981.
- [13] Anonim, *Kriteria Perencanaan Pengolahan Air*. Ditjen Cipta Karya DinasPekerjaan Umum, 1996.
- [14] S. N. Putri, "Tinjauan Ulang Optimasi Tampungan Embung Bisok Bokah Untuk Keperluan Air Irigasi di Kecamatan Kopang Kabupaten Lombok Tengah," Universitas Mataram, 2016.
- [15] A. Bagiawan, "Perhitungan Kebutuhan Kapasitas Tampung Bagi Rencana Pengembangan Areal Layanan Irigasi Dari Bendung Perjaya-Sumatera Selatan Dengan Metode Numerik dan 'Sequent Peak,'" *J. Irig.*, vol. 8, no. 1, 2013.
- [16] D. Yulianto and H. Satupa, *Riset Operasi Dengan Excel*. Yogyakarta: Andi, 2005.
- [17] C. Soemarto, *Hidrologi Teknik*. Jakarta: Erlangga, 1995.
- [18] Sugiyono, *memahami penelitian kualitatif*. Bandung: Alfabeta, 2012.
- [19] B. Triatmodjo, *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset, 2008.



Pengaruh Kemiringan Struktur Plat Segitiga Terhadap Kecepatan Gesek Dasar pada Saluran Terbuka

Yunarto Rombebunga^{1*}, Rita Tahir Lopa¹, Bambang Bakri¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: yunartorb@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.05

Abstrak

Pada aliran saluran terbuka, distribusi kecepatan seringkali dibedakan sebagai distribusi kecepatan di daerah *inner region*, yang berada di dekat dasar dimana distribusi kecepatan logaritmik berlaku, dan di daerah *outer region*, yang berada jauh dari dasar dimana distribusi kecepatan menyimpang secara jelas dan sistematik terhadap hukum logaritmik. Tujuan penelitian adalah struktur mampu meredam energi aliran dasar sehingga kecepatan yang terjadi dapat diminimalisir. Percobaan dilakukan pada saluran *flume* dengan Panjang 8,00 m, lebar 0,40 m dan tinggi 0,40 m. Untuk kemiringan saluran yang digunakan 0,05% dan 0,10% pada bidang licin. Tipe aliran adalah aliran seragam, menggunakan 3 (tiga) variasi debit inlet (Q). Untuk Struktur berupa model plat segitiga, menggunakan variasi stuktur dengan kemiringan 30° (M_1), 45° (M_2) dan 60° (M_3) dengan kemiringan saluran 0.05%. Adapun tinggi plat segitiga ditentukan berdasarkan tinggi rerata kecepatan maksimum sebesar $0,6D$. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan gesek yang terjadi sebelum melewati plat segitiga akan membesar dengan nilai rerata 53% (kecepatan gesek (u_*) menurun) dan sesaat setelah melewati plat segitiga menjadi kecil (kecepatan gesek (u_*) meningkat) dengan rerata 26% seiring bertambah besarnya kemiringan plat segitiga dan konstantan integrasi (C) berupa perubahan kecepatan aliran semakin meningkat. Namun trend kecepatan gesek yang ditunjukkan untuk setiap model akan terlihat semakin menurun pada saat menjauhi plat segitiga dan hal ini mengindikasikan kecepatan gesek (u_*) akan mengalami kondisi rezim aliran yang baru. Selain itu secara kuantitatif terkonfirmasi bahwa dengan adanya struktur plat segitiga maka nilai *Froude* yang terjadi sebelum melewati struktur akan mengalami penurunan kecepatan aliran seiring bertambah besarnya kemiringan struktur dan setelah melewati struktur, kecepatan aliran akan meningkat dan terjadi intensitas turbulen disepanjang saluran.

Abstract

The Effect the Triangular Plate Structure Slope on the Frictional Velocity in the Open Channel. In open channel flow, velocity distribution is often distinguished as velocity distribution in the inner region, which is near the base where the logarithmic velocity distribution applies, and in the outer region, which is far from the bottom where the velocity distribution deviates clearly and systematically from the logarithmic law. The purpose of the research is the structure is able to reduce the base flow energy so that the velocity that occurs can be minimized. The experiment was carried out on a flume channel with a length of 8.00 m, a width of 0.40 m and a height of 0.40 m. For the slope of the channel used 0.05% and 0.10% on a slippery surface. The type of flow is uniform flow, using 3 (three) variations of inlet discharge (Q). For the structure in the form of a triangular plate model, using a variation of the structure with a slope of 30° (M_1), 45° (M_2) and 60° (M_3) with a channel slope of 0.05%. The height of the triangular plate is determined based on the average height of the maximum speed of $0.6D$. The results of the analysis show that the frictional speed that occurs before passing through the triangular plate will increase with an average value of 53% (friction speed (u_*) decreases) and immediately after passing through the triangular plate becomes small (friction speed (u_*) increases) with an average of 26% along with As the slope of the triangular plate increases, the integration constant (C) in the form of a change in flow velocity increases. However, the frictional velocity trend shown for each model will appear to be decreasing as it moves away from the triangular plate and this indicates that the frictional velocity (u_*) will experience a new flow regime. In addition, it is quantitatively confirmed that with the triangular plate structure, the *Froude* value that occurs before passing through the structure will experience a decrease in flow velocity as the slope of the structure increases and after passing through the structure, the flow velocity will increase and turbulence intensity occurs along the channel.

Kata Kunci: Angka *Froude*, kecepatan gesek, konstanta integrasi, struktur plat segitiga

1. Pendahuluan

Saluran terbuka adalah dimana air mengalir dengan muka air bebas (*free surface*) [1]. Salah

satu contoh saluran terbuka adalah sungai. Sungai adalah torehan permukaan Bumi yang merupakan penampung dan penyalur alamiah aliran air dan material yang dibawanya dari



bagian hulu ke hilir, atau dari tempat tinggi ke tempat yang rendah kemudian bermuara di laut, menurut Soewarno [2]. Tipe aliran saluran terbuka adalah turbulen [3], karena kecepatan aliran dan kekasaran dinding relatif besar. Kecepatan aliran dalam saluran biasanya sangat bervariasi dari titik lainnya yang disebabkan adanya tegangan geser di dasar dan dinding saluran dan keberadaan permukaan bebas [4]. Menurut ilmu mekanika fluida, aliran diklasifikasikan berdasarkan perbandingan antara gaya-gaya inersia (*inertial forces*) dan gaya-gaya kekentalan (*viscous forces*) menjadi tiga yaitu aliran laminar, aliran transisi, dan aliran turbulen [5]. Umumnya aliran pada saluran terbuka mempunyai $Re > 12.500$ sehingga alirannya termasuk dalam kategori turbulen [6].

Kecepatan aliran sangat penting dari berbagai perspektif karena memainkan peran penting dalam pengangkutan sedimen di dasar saluran, danau, laut dan laut dalam dan dengan demikian kendali kecepatan aliran sangat signifikan terutama yang terjadi didasar saluran berupa kecepatan gesek dasar [7]. Kecepatan gesek yang terjadi di dasar saluran merupakan perlawanan aliran yang dimaksud berupa konfigurasi kekasaran dasar yang mempengaruhi kecepatan gesek di dasar saluran. Menurut Richardson [8], perlawanan terhadap aliran pada sungai-sungai aluvial adalah sangat kompleks karena banyak variabel tidak begitu diketahui secara baik.

Adanya struktur plat segitiga pada dasar saluran dapat mewakili kecepatan aliran di sekitarnya. Perubahan aliran dapat diamati secara visual atau berdasarkan bilangan Froude [9] dan kecepatan aliran pada struktur merupakan pengaruh aliran turbulen yang dipengaruhi oleh gaya hambat gesekan akibat viskositas fluida. Tarikan gesekan bergantung pada bilangan Reynold aliran berdasarkan kecepatan aliran (U) dan panjang aliran yang mendekat (L) [10]. Oleh karena itu, penting juga untuk mengungkapkan pengaruh struktur tersebut terhadap aliran turbulen karena aliran turbulen dapat mempengaruhi perilaku pengendapan sedimen.

Adapun parameter utama yang perlu diperhatikan adalah besarnya kecepatan gesek dasar akibat adanya struktur plat segitiga. Fokus utama berupa kecepatan aliran dan efek dari

bilangan Froude. Selain itu, akibat adanya struktur, maka terjadi perubahan viskositas aliran. Data pendukung yang dapat digunakan untuk menentukan nilai viskositas aliran adalah debit, tinggi muka air, kualitas air dan temperatur [11].

2. Landasan Teori

2.1. Distribusi Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran dalam saluran terbuka biasanya sangat bervariasi dari satu titik ke titik yang lain. Kecepatan aliran memiliki tiga komponen arah menurut koordinat kartesius. Namun komponen arah vertikal dan lateral biasanya kecil dan dapat diabaikan. Sehingga hanya kecepatan aliran yang searah dengan arah aliran yang diperhitungkan [12]. Karakteristik aliran yang melewati hambatan sangat susah dianalisis maka pendekatan empiris perlu diperhitungkan dengan menentukan pembagian kecepatan aliran pada daerah *inner region* dan *outer region*. Pada daerah dasar, kecepatan dikontrol oleh kecepatan gesek dan distribusi kecepatan sesungguhnya dapat dinyatakan dengan persamaan empiris:

$$\frac{u(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{D_m} \right)^{\alpha_v} \quad (1)$$

dimana,

$u(z)$ = kecepatan rerata sejauh z dari dasar (cm/dtk)

U_m = Kecepatan aliran maksimum (cm/dtk)

D_m = Batas tinggi dari kecepatan maksimum ($z = D_m$)

α_v = Nilai koefisien energi arah vertikal

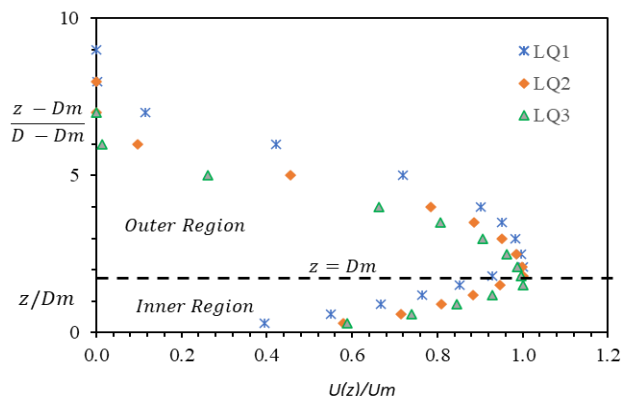
Untuk daerah *outer region*, dikendalikan oleh kecepatan gesek yang terjadi di antara batas muka air. Distribusi kecepatan didefinisikan dengan menggunakan hubungan semi-Gaussian [13].

$$\frac{u(z)}{U_m} = \exp \left[-\beta_v \left(\frac{z - D_m}{D - D_m} \right)^{\gamma_v} \right] \quad (2)$$

Dalam persamaan ini, β_v adalah koefisien momentum energi dan γ_v merupakan nilai didasarkan pada hasil pengukuran yang mengikuti fungsi eksponensial yang variabelnya merupakan basis logaritma. Juga, D adalah batas



rata-rata tinggi aliran. Profil kecepatan aliran non- dimensi tanpa struktur plat segitiga yang didapatkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Profil kecepatan aliran non-dimensi tanpa Struktur plat segitiga

2.2. Kecepatan Gesek (u_*) dan Konstanta Integrasi (C)

Diketahui bahwa

$$S_f = \frac{\tau_0}{\gamma R} = \frac{u_*^2}{gR} = \frac{u^2}{C_*^2 gR} \tag{3}$$

dimana,

- τ_0 = tegangan geser
- u_* = kecepatan geser
- γ = berat jenis fluida (air)
- ρ = kerapatan fluida (air)
- C_* = koefisien Chezy tak berdimensi
- g = gravitasi
- R = radius hidrolis

maka besarnya kecepatan geser dan tegangan geser dapat diketahui :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \tag{4}$$

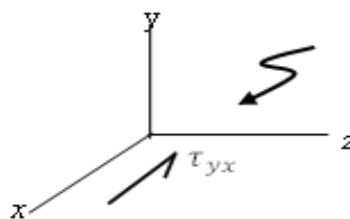
Karakteristik aliran saluran terbuka akan mengalami tahanan geser dan hampir selalu turbulen sehingga unsur laminar dapat diabaikan. Hanya sebagian kecil di dekat batas-batasnya (dasar saluran dan tebing) aliran bisa bersifat laminar. Dengan prinsip tegangan Reynolds dari hasil perataan waktu (*time averaging*) Persamaan Navier-Stoke, diketahui bahwa besarnya tegangan :

$$\tau_{yx} = \underbrace{\mu \frac{dv_x}{dy}}_{\text{laminar}} + \underbrace{\rho l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^2}_{\text{turbulen}} \tag{5}$$

laminar turbulen

dimana,

- τ_{yx} = tegangan dasar saluran
- u = kecepatan kearah x
- μ = kekentalan dinamik fluida (air)
- l = Panjang campur Prandtl (*Prandtl mixing length*)



Gambar 2. Tegangan geser aliran kearah sumbu x menurut Kodoatie [8]

Menurut Von-Karman [8] pada Gambar 2, besarnya l adalah proposional dengan jarak y dari batas (dasar saluran), yaitu : $l = \kappa y$, dimana κ = konstanta Von Karman ($\kappa=0,4$). Dengan $\tau_0 \approx \tau_{yx}$, maka didapat hubungan (4) dan (5) adalah:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \kappa y \frac{dv_x}{dy} \tag{6}$$

Hubungan kecepatan U dan u_* dengan mengacu pada Persamaan (6) adalah:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + c \tag{7}$$

Harga c dapat dievaluasi pada jarak y_0 , sehingga

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \tag{8}$$

dimana y_0 = konstanta dari integrasi persamaan (5) atau ketinggian dari dasar saluran yang secara hipotesis kecepatan alirannya adalah nol. Konstanta integrasi y_0 mempunyai urutan besaran yang sama dengan tebal lapisan laminar (δ) yang merupakan fungsi yang tergantung dari kondisi batas halus sampai kasar [5].

Pada kondisi halus (*smooth*), maka $y_0 = \frac{m\nu}{u_*}$, dimana $m = 10^{-0,96} = 1/9$, ν = viskositas kinematik, u_* = kecepatan geser. Pada kondisi kasar (*rough*), y_0 tergantung dari ketinggian kekasaran pada dasar saluran k_s maka $y_0 = mk_s$ [8].



3. Metode Penelitian

Percobaan dilakukan pada saluran flume dengan Panjang 8,00 m, lebar 0,40 m dan tinggi 0,40 m. Kondisi aliran menggunakan 3 (tiga) variasi debit (Q), tanpa struktur dan dengan Struktur berbentuk plat segitiga dengan variasi sudut kemiringan plat 30° (M_1), 45° (M_2), dan 60° (M_3), dapat dilihat pada Gambar 3. Tinggi plat ditentukan berdasarkan besarnya rata-rata kecepatan maksimum yang terjadi yaitu $0,6D$ dari rata-rata tinggi muka air yang adalah setinggi 0.06 m dari dasar saluran dengan kemiringan dasar saluran 0.05%.

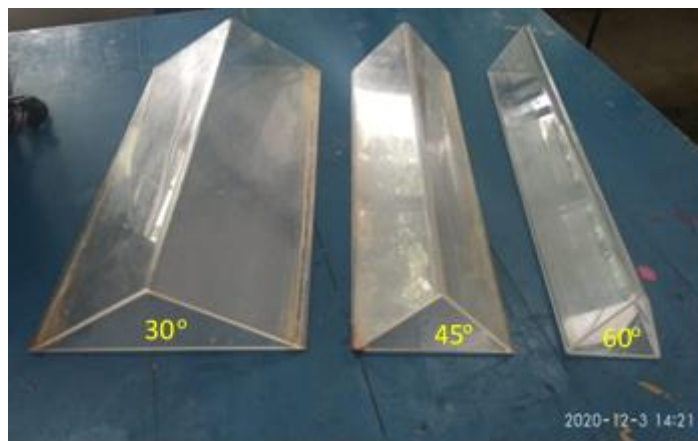
Data pengukuran distribusi kecepatan, yang meliputi distribusi kecepatan pada aliran seragam tanpa struktur (6 distribusi kecepatan), dan dengan struktur (24 distribusi kecepatan). Pada pengukuran distribusi kecepatan dengan struktur, dilakukan pengukuran di daerah hulu dan hilir struktur, dimana struktur diletakkan pada jarak $x = 4,00$ m. Setiap pengukuran masing-masing dilakukan pada jarak $x = 3,50$

m; $x = 4,25$; $x = 4,50$; $x = 5,00$ dan $x = 5,50$. Skema pengukuran pada flume/saluran dapat dilihat pada Gambar 4.

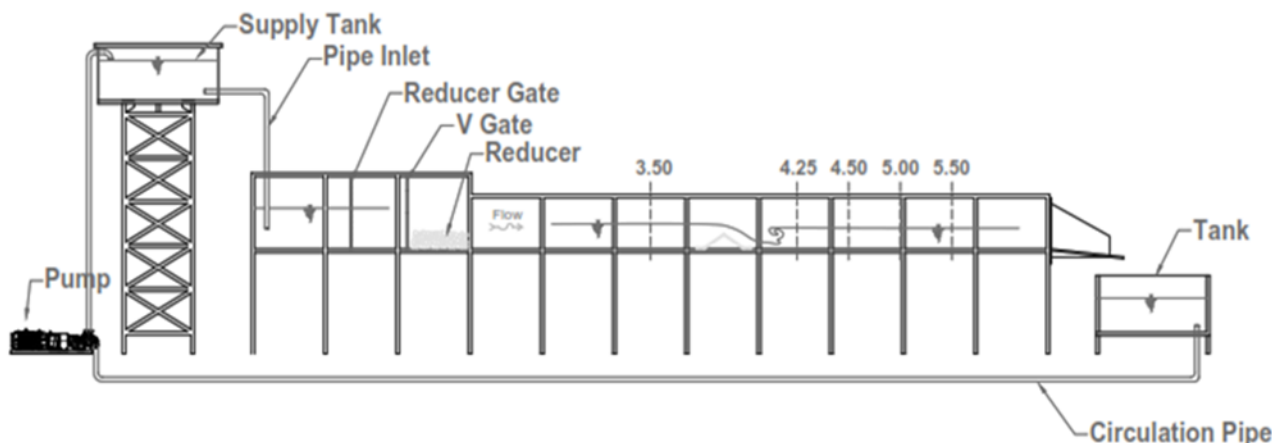
Pengukuran distribusi kecepatan aliran menggunakan alat ukur Pitot Tube Portable Automatic [14], yaitu alat yang mengukur tekana aliran (P) pada suatu titik kedalaman dan selanjutnya nilai beda tekanan dikonversi menjadi kecepatan aliran menggunakan persamaan berikut:

$$u = \sqrt{4.24\Delta h} \tag{9}$$

Parameter utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu debit aliran terukur (Q), kemiringan dasar saluran (S_0), kedalaman aliran (D), lebar flume ($b = 40$ cm), aspek rasio (b/D), viskositas kinematis (ν), jari-jari hidraulis (R), bilangan Reynolds (Re), bilangan Froude (Fr), dan kecepatan aliran (U). Perhitungan untuk setiap parameter dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Variasi kemiringan struktur plat segitiga



Gambar 4. Skema percobaan pada saluran terbuka

Tabel 1. Parameter utama aliran tanpa struktur

Run	Q (ltr/dtk)	S ₀ (%)	D (cm)	b (cm)	A (cm ²)	b/D (-)	R (cm)	$\vartheta \times 10^{-3}$ (cm ² /dtk)	U (cm/dtk)	R _e x 10 ⁻⁵ (-)	F _r (-)
LQ1	6.41		8.70	40	348	4.60	6.06	8.28	18.43	0.540	0.200
LQ2	7.75	0.05	9.30	40	372	4.30	4.30	8.39	20.84	0.631	0.218
LQ3	9.97		11.00	40	440	3.64	3.64	8.39	22.67	0.767	0.218

Untuk setiap *running* aliran, data memiliki nomenklatur yang terdiri atas lima digit berupa huruf dan angka. Kode huruf pertama, **L** dan **M**, menggambarkan bahwa aliran diperoleh pada kondisi tanpa struktur plat segitiga (*Loss*) dan dengan struktur plat segitiga (*Model*) dengan variasi kemiringan plat berupa angka dibelakangnya. Kode digit kedua menunjukkan debit (**Q**), dengan variasi debit diberikan angka dibelakangnya.

4. Hasil dan Pembahasan

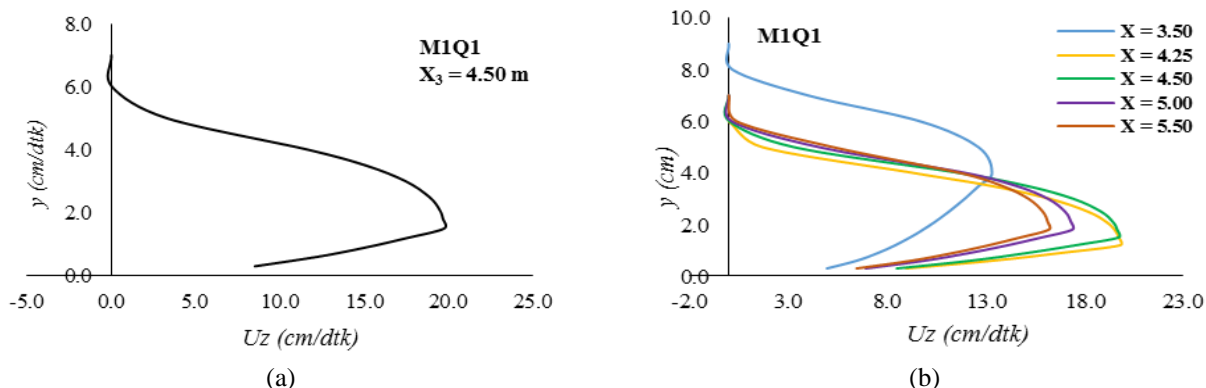
4.1. Kecepatan Aliran

Berdasarkan Persamaan (1) dan (2), pembagian rasio kecepatan dan distribusi kecepatan (U_z) berdasarkan daerah yang pengukurannya dilakukan di tengah bentang ($X_3 = 4.50$ m untuk M_1) dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 5.

Tabel 2. Kecepatan aliran berdasarkan pembagian daerah

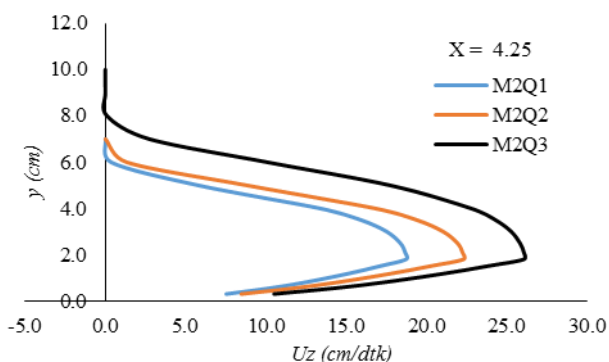
Pembagian Daerah Kecepatan	Data ukur M1Q1S0 $X_3 = 4.50$ m			Rasio kecepatan terhadap muka air yang ditinjau							V_z (Cm/dtk)		
	y (cm)	D (cm)	U (cm/dtk)	y/H_m	γ_v	ϵ	β	α	Inner region	Outer region		$V(z)/V_m$	
y/H _m	0.30	8.15	17.02	0.200						0.431	0.431	8.508	
	0.60	8.15	18.80	0.400						0.619	0.619	12.223	
	0.90	8.15	19.71	0.600						0.766	0.766	15.108	
	1.20	8.15	20.59	0.800						0.890	0.890	17.560	
H _m	1.50	8.15	21.76	1.000						1.000	1.000	19.732	
	1.80	8.15	21.43	0.047							0.997	0.997	19.668
(y-H _m)/(D-H _m)	2.10	8.15	21.60	0.099	2	1.162	1.450	1.913			0.986	0.986	19.452
	2.50	8.15	21.10	0.177							0.956	0.956	18.856
	3.00	8.15	20.07	0.291							0.884	0.884	17.448
	3.50	8.15	18.98	0.430							0.765	0.765	15.090
	4.00	8.15	18.61	0.602							0.591	0.591	11.659
	5.00	8.15	18.42	1.111							0.167	0.167	3.295
	6.00	8.15	19.17	2.093							0.002	0.002	0.034
	7.00	8.15	18.96	4.783							0.000	0.000	0.000
	Rerata			19.73									





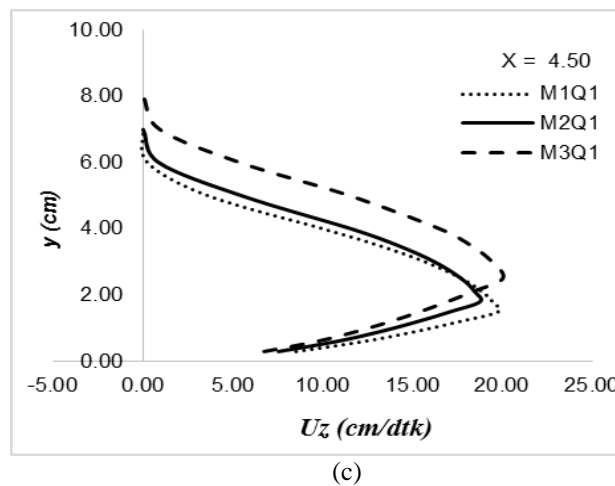
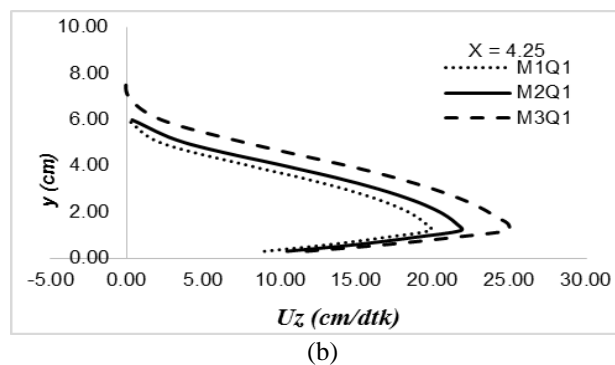
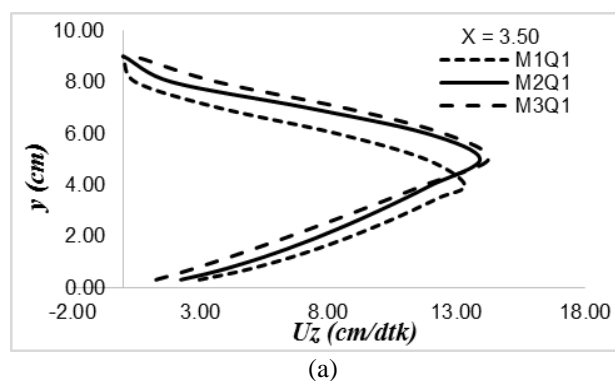
Gambar 5. (a) Distribusi kecepatan aliran pada plat M1, $X_3 = 4.50$
 (b) Rekapitulasi distribusi kecepatan untuk model plat M1Q1

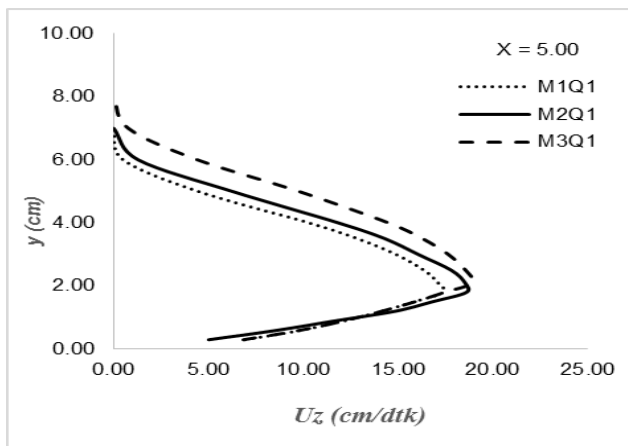
Gambar 5(b) menunjukkan bahwa distribusi kecepatan yang terjadi di dasar saluran (*inner region*) sebelum melewati plat segitiga akan mengalami kenaikan muka dan mengakibatkan kecepatan aliran di daerah dasar saluran akan berkurang. Bentuk lengkung dari grafik pada jarak $X_1 = 3.50$ m, yang membesar di bagian dasar dan mengindikasikan nilai kecepatan gesek (u^*) menjadi besar. Gambar 5 (a), jarak $X_2 = 4.50$ m (sesaat setelah melewati plat) di titik $y = 1.80$ cm terjadi momentum balik (*outer region*), dimana kecepatan aliran akan mulai mengalami rata-rata penurunan kecepatan hingga ke permukaan aliran.



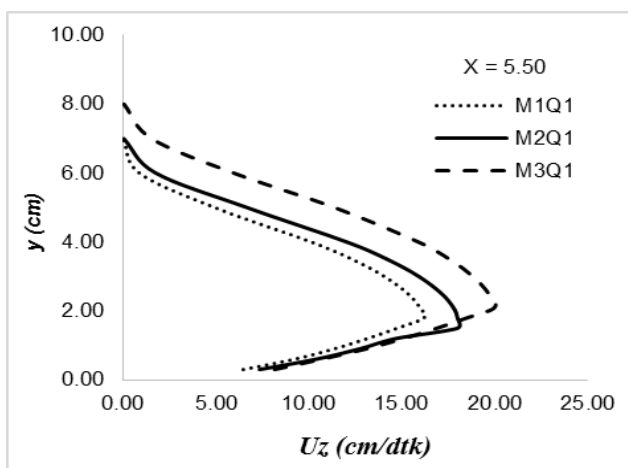
Gambar 6. Pengaruh kecepatan aliran (U) terhadap plat segitiga (M2)

Gambar 6 menunjukkan hubungan yang terjadi antara kecepatan terhadap plat segitiga, dimana semakin besar kecepatan aliran yang melewati plat segitiga maka kecepatan di dasar saluran semakin besar sehingga nilai kecepatan gesek yang terjadi mengecil, namun kecepatan rerata (U_m) yang terjadi semakin besar hingga ke permukaan aliran.





(d)



(e)

Gambar 7. Pengaruh plat segitiga (M) Vs kecepatan aliran (U)

Pada Gambar 7(a), kondisi debit aliran yang sama (Q1) sebelum aliran melewati plat segitiga, terlihat lengkung grafik daerah *inner region* semakin membesar, maka perubahan energi di tiap titik tinjau memiliki selisih nilai kecepatan aliran semakin besar yang mengakibatkan kecepatan yang terjadi didasar saluran semakin kecil/melambat. Hal ini

dikarenakan plat segitiga memiliki kemiringan yang semakin besar namun dari hasil pengukuran, kecepatan aliran akan menjadi cenderung konstan dan cepat setelah aliran berada pada batas tinggi plat 6.00 cm.

Sesaat aliran melewati plat segitiga pada jarak $x = 4.25$ m (Gambar 7(b)), kecepatan aliran akan besar dan terjadi aliran turbulensi di sekitar plat menunjukkan energi aliran yang melewati plat semakin besar karena tinggi jatuh aliran (muka air) yang semakin meninggi. Kondisi ini membuat kecepatan yang terjadi di daerah *inner region* akan semakin besar sehingga kecepatan gesek (u^*) yang terjadi semakin mengecil seiring perubahan kemiringan plat yang semakin besar.

Setelah terjadi turbulensi disekitar plat, maka kecepatan aliran rerata akan menurun setelah menjauhi plat segitiga, $x = 4.50$ m, namun perubahan kecepatan yang terjadi di daerah *inner region* masih dipengaruhi oleh plat segitiga, dapat di lihat pada Gambar 7(c), dimana semakin besar kemiringan plat maka semakin besar lengkung α yang dibentuk.

Selanjutnya aliran akan semakin menjauhi plat segitiga dan perlahan akan membentuk regime aliran yang baru (Gambar 7(d)), dimana pada jarak $x = 5.00$ m, nilai kecepatan rerata hampir sama. Kondisi ini akan terus berlanjut mendekati kecenderungan kondisi normal kembali. Hal ini dapat di lihat Gambar 7 (e).

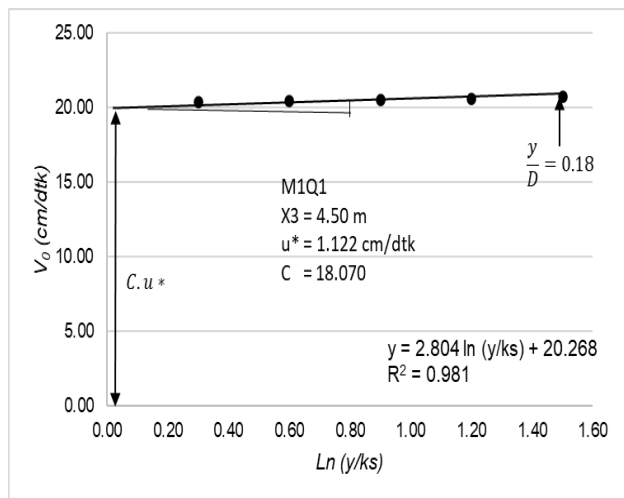
4.2. Kecepatan Gesek dan Konstanta Integrasi

Perhitungan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi percobaan M1Q1S0 pada $x = 4.50$ m dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan kecepatan gesek (u^*) dan Konstanta Integrasi (C) M1Q1S0, $x = 4.50$

Data ukur M1Q1S0				Analisa Metode Logaritmik					
$X_3 = 4.50$ m				$\frac{U_0}{U^*} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{K_s} \right) + C$					
y (cm)	D (cm)	V (cm/dtk)	y/D	ks	$\ln (y/ks)$	K	$\tan \alpha$	u^*	C
0.30	8.15	17.02	0.04		3.136				
0.60	8.15	18.80	0.07		3.829				
0.90	8.15	19.71	0.11	0.0016	4.234	0.4	2.804	1.122	18.070
1.20	8.15	20.59	0.15		4.522				
1.50	8.15	21.76	0.18		4.754				





Gambar 8. Penentuan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C)

Gambar 8 menunjukkan bahwa sudut α yang dibentuk oleh kecepatan aliran setelah melewati plat segitiga akan mengecil akibat loncatan hidrolis dan mengakibatkan nilai kecepatan gesek akan kecil, hal ini disebabkan karena garis pembentuk logaritmik berkurang yaitu $y/D = 0.18$, namun nilai pengukuran kecepatan aliran di setiap titik yang tinjau perubahan kecepatannya lebih rapat dikarenakan kecepatan aliran yang tiba-tiba dan cepatnya laju aliran sehingga konstanta integrasi (C) akan menjadi lebih besar.

Adapun rekapitulasi kecepatan gesek dari hasil analisis logaritmik pada setiap kondisi aliran, jarak terhadap variasi kemiringan model plat dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi perhitungan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta Integrasi (C)

Run	u^*					C				
	3.50	4.25	4.50	5.00	5.50	3.50	4.25	4.50	5.00	5.50
M1Q1	2.913	0.813	1.122	1.222	1.238	2.429	28.654	18.070	13.860	12.543
M1Q2	2.814	0.968	1.162	1.326	1.491	1.641	30.070	17.598	13.491	11.859
M1Q3	3.320	1.056	1.645	1.662	1.736	1.633	30.230	17.087	11.719	9.659
M2Q1	2.921	0.832	1.285	1.548	1.473	2.260	29.196	13.987	11.052	10.520
M2Q2	2.940	0.913	1.728	1.823	1.947	2.168	30.872	13.321	10.152	9.144
M2Q3	3.429	0.914	1.943	2.148	2.110	2.191	34.853	12.646	9.291	8.992
M3Q1	3.329	0.871	1.314	1.716	1.722	2.676	33.014	14.356	10.340	9.511
M3Q2	3.334	0.787	1.697	1.939	2.171	2.437	36.442	12.360	8.890	7.639
M3Q3	3.487	0.789	2.413	2.590	2.546	2.646	37.722	11.868	8.683	7.295

Tabel 4, memperlihatkan nilai kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C) yang terjadi di sekitar daerah plat ($x = 4.25$ m), sesaat setelah aliran melewati plat segitiga akan mengalami kecepatan aliran yang sangat besar, yang di sebut loncatan hidraulik namun berbanding terbalik dengan kecepatan gesek (u^*) yang terjadi yaitu akan semakin kecil. Hal ini di

karenakan besarnya nilai energi berupa perubahan kecepatan di ditiap titik tinjau memiliki nilai yang besar dan rapat dan selanjutnya secara perlahan aliran akan menjadi normal kembali setelah menjauhi plat segitiga akibat nilai energi pembentuk lengkung (α) akan naik/membesar.

Tabel 5. Persentase (%) perubahan kecepatan gesek (u^*)

Model	Jarak (x)				
	3.50	4.25	4.50	5	5.50
M1	43.510	-55.424	-38.166	-35.676	-31.969
M2	47.313	-58.126	-21.976	-15.542	-15.728
M3	61.306	-61.452	-14.993	-4.821	-2.012
Rerata nilai lokal	53.110	-59.304	-20.672	-13.014	-11.436
Rerata	53.110			-26.106	

Jika $x < 4.00$ m, mengalami perubahan kecepatan gesek (u^*) akan membesar dengan rata-rata 53% (kecepatan gesek (u^*) menurun)

dan memiliki trend yang sama untuk setiap model. Sedangkan bila $x > 4.00$ m, setelah aliran melewati plat segitiga untuk kecepatan gesek



akan mengecil (kecepatan gesek (u_*) meningkat) dengan rerata 26%, namun trend kecepatan gesek yang ditunjukkan untuk setiap model akan terlihat semakin menjauhi plat maka kecepatan yang terjadi di dasar saluran akan semakin menurun dan hal ini mengindikasikan kecepatan gesek (u_*) akan mengalami kondisi rezim aliran yang baru.

4.3. Bilangan Froude (Fr)

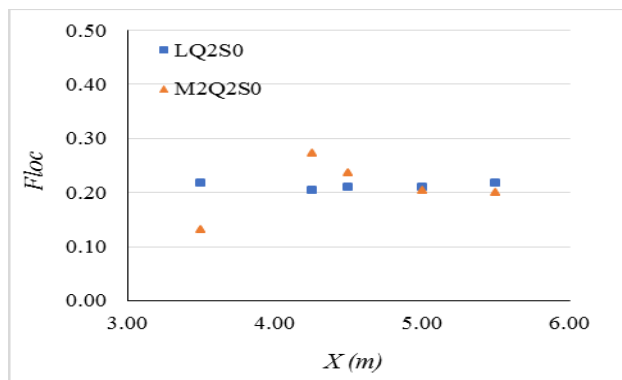
Angka Froude merupakan parameter non-dimensional yang menunjukkan efek relative

dari efek inersia terhadap efek gravitasi. Sebuah kondisi yang mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air dan membandingkan benda-benda dengan ukuran berbeda berdasarkan pada kecepatan atau beda jarak [15].

Berikut adalah contoh grafik yang menggambarkan karakteristik aliran bilangan Froude pada kondisi sebelum ada plat segitiga dan setelah ada plat segitiga dengan masing-masing jarak tinjau.

Tabel 6. Perhitungan bilangan Froude lokal

LQ ₂ S0 (tanpa struktur)				M ₂ Q ₂ (dengan struktur)			
X	U	D	F	X	U	D	F
3.50	20.41	8.90	0.218	3.50	14.08	11.70	0.131
4.25	19.36	9.10	0.205	4.25	25.08	8.65	0.272
4.50	19.88	9.20	0.209	4.50	22.30	9.05	0.237
5.00	20.17	9.40	0.210	5.00	19.55	9.30	0.205
5.50	21.05	9.60	0.217	5.50	19.42	9.50	0.201



Gambar 9. Profil distribusi lokal bilangan Froude

Kondisi aliran yang terbentuk disemua percobaan berada pada rezim subkritis dan bergerak menuju plat segitiga. Sesaat aliran melewati plat segitiga terjadi aliran turbulente di sekitar plat dan densitas bilangan Froude meningkat.

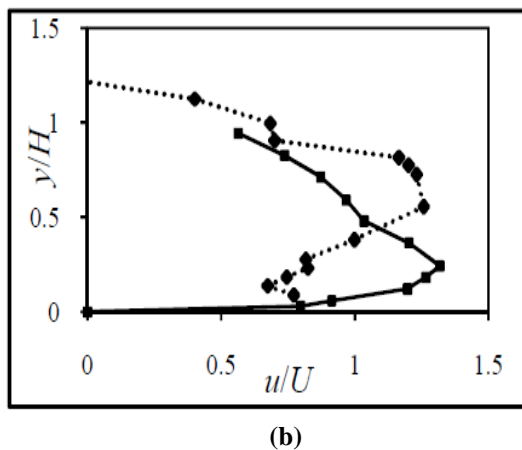
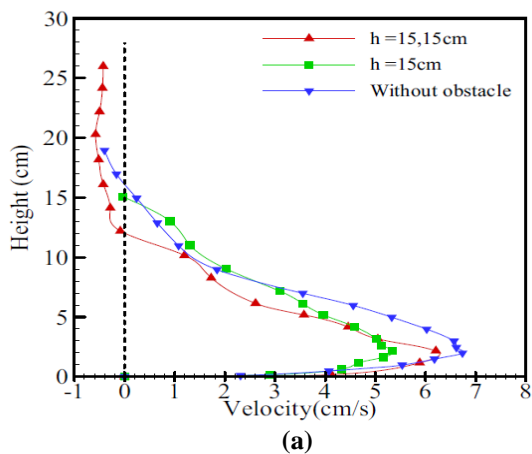
Gambar 9 menunjukkan perubahan angka Froude setelah melewati plat segitiga. Perilaku ini terjadi hampir sama ketika aliran melewati struktur bahwa aliran cenderung mengalami kenaikan berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aliran.

4.4. Validasi Distribusi Kecepatan Aliran pada Plat Segitiga

Kecepatan aliran yang diukur pada titik tinjau dan berada pada tengah saluran arah longitudinal telah digambarkan pada analisis sebelumnya. Hasil perhitungan pada penelitian ini dapat dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu oleh Sina Yaghoubi, dkk [15] serta E. Khavasi, dkk [7]. Berikut adalah perbandingan grafik yang dihasilkan oleh masing-masing peneliti dapat dilihat pada Gambar 10.

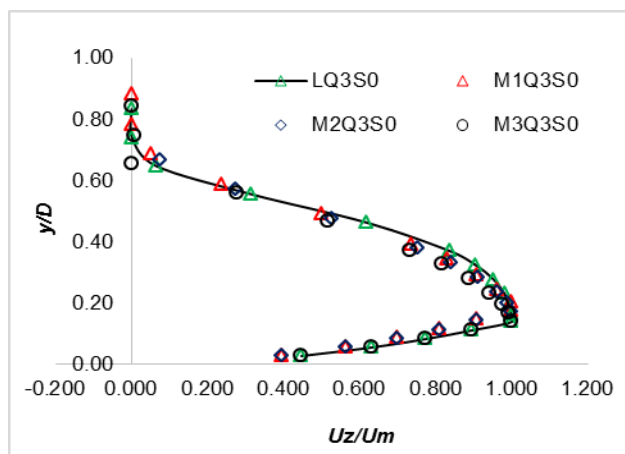
Gambar 10 menunjukkan hasil pembagian distribusi kecepatan pada penelitian terdahulu [15]. Perhitungan distribusi kecepatan didasarkan pada daerah *inner region* dan *outer region*. Terlihat pada gambar 10 (a), lengkung logaritmik yang terjadi setelah melewati plat segitiga pada daerah *inner region* dekat/rapat dengan dasar saluran, hal ini dikarenakan tinggi muka air yang terjadi jauh dari dasar saluran. Untuk gambar 10 (b), grafik penelitian [7] menunjukkan hubungan tak berdimensi antara perbandingan kecepatan di titik tinjau (u/U) Vs (y/H), dimana grafik yang dibentuk adalah distribusi kecepatan sebelum ada plat dan sesudah ada plat pada titik yang sama.





Gambar 10. (a) Distribusi kecepatan pada plat segitiga oleh Yaghoubi, dkk [15]. (b) Distribusi kecepatan pada plat segitiga oleh Khavasi, dkk [7]

Pada penelitian eksperimental ini, hasil perhitungan distribusi kecepatan mengikuti pembagian daerah *inner region* dan *outer region*.



Gambar 11. Distribusi kecepatan aliran pada jarak $X = 4.25$

Terlihat pada Gambar 11, grafik yang dibentuk menggunakan metode pembagian daerah *inner region* dan *outer region*, sama

halnya dengan penelitian [15]. Namun grafik penelitian ini memiliki lengkung di daerah *inner region* yang kecenderungan garis lengkungnya tidak rapat di dasar saluran. Hal ini mengindikasikan bahwa tinggi muka air tidak terlalu jauh dari dasar saluran dan memiliki kecepatan merata yang tinggi.

5. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan gesek (u^*) yang terjadi sebelum melewati plat segitiga akan mengalami rata-rata penurunan kecepatan aliran, dimana semakin kecil sudut kemiringan plat segitiga maka kecepatan yang tereduksi akan semakin besar dengan nilai rerata $\pm 53\%$. Namun apabila sesaat aliran melewati plat segitiga maka terjadi intensitas aliran yang meningkat seiring besarnya sudut kemiringan sebesar yaitu dengan nilai rerata $\pm 26\%$ dan aliran akan terus menurun pada saat menjauhi plat segitiga dan selanjutnya akan mengalami rezim kecepatan yang baru. Kondisi perubahan aliran sangat mirip dengan perubahan lokal bilangan Froude dan dapat diprediksi secara proporsi bahwa Angka Froude dengan kekuatan inersia membuat aliran lebih banyak tidak stabil. Dalam aliran yang tidak ada struktur, perubahan di Froude lokal jumlahnya tampak tidak terlalu banyak tetapi untuk percobaan dengan adanya struktur plat segitiga, variasi bilangan Froude lokal tampaknya mengalami kenaikan.

Referensi

- [1] B. Triatmojo, *Soal dan Penyelesaian Hidraulika I*, Cetakan ke. Yogyakarta: BETA OFFSET Perum. FT-UGM No. 3, 2017.
- [2] E. Prasetyo, "Pengendalian Gerusan Local di Pilar dengan Chasing Pengaman," UNNES, 2006.
- [3] B. Triatmojo, *Hidraulika II*, Cetakan ke. Yogyakarta: BETA OFSET Perum. FT-UGM No. 3, 2017.
- [4] Suripin, *Mekanika Fluida dan Hidrolika Saluran Terbuka Untuk Teknik Sipil*. Yogyakarta: Andi, 2019.
- [5] R. H. French, *Open Chanel Hydraulics*. New York: McGraw Hill Book Company, 1985.
- [6] N. Ratjaratman, *Engineering Fluid Mechanics*. Civil Eng. Dept Faculty of Engineering: Alberta Edmonton Canada, 1987.
- [7] E. Khavasi, H. Jamshidnia, B. Firoozabadi, and H. Afshin, "Experimental investigation of flow structure of a density current encountering a basal obstacle Experimental investigation of flow structure of a density current encountering a basal obstacle," in *ISUD8*, 2012, pp. 2–6.



- [8] Kodoatie. J. R, *Hidrolika Terapan Aliran pada Saluran Terbuka dan Pipa*, Revisi, 20. Yogyakarta: Andi Yogyakarta, 2001.
- [9] A. A. Latif, M. S. Pallu, F. Maricar, and M. P. Hatta, "Study of the scour model around the sluice gate of open channel," *Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 239–247, 2020.
- [10] V. T. Chow, *Hidrolika Saluran Terbuka (Open Channel Hydraulics)*, 1985th ed. Jakarta: Erlangga, 1997.
- [11] M. Hasbi, M. S. Pallu, R. Lopa, M. P. Hatta, and Z. Zetiawan, "Effect of velocity flow patterns on viscosity in Saddang River," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, p. 419.
- [12] Rinaldi and B. Yulistiyanto, "Model Fisik Pengendalian Gerusan di Sekitar Abutmen Jembatan." *Forum Teknik Sipil* No. X, pp. 139–149, 2001.
- [13] S. Altinakar, W. H. Graf, and E. Hopfinger, "Weakly depositing turbidity current on a small slope," *J Hydraul. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 55–80, 1996.
- [14] Armfield Engineering Teaching & Research Equipment, "Pitot Tubes Portable Operating Instruction and Experiment." *Instruction Manual Book*, 2002.
- [15] S. Yaghoubi, H. Afshin, and A. Farizan, "Experimental Investigation of the Effect of Inlet Concentration on the Behavior of Turbidity Currents in the Presence of Two Consecutive Obstacles," *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, vol. 143, no. 2, 2017.



Studi Eksperimental Kecepatan Aliran *Slurry* pada Saluran Tertutup

Muhammad Taufiq Akbar^{1*}, Sulhairi¹, Muhammad Arsyad Thaha¹, Bambang Bakri¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: taufiq.m4@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.06

Abstrak

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi jaringan pipa air limbah akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan oleh faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti perubahan kecepatan, perubahan penampang (dimensi pipa, belokan, sambungan) dan perubahan kekasaran permukaan. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan. Sumber dari *self head loss* dan *limit deposit velocity* (DHLLDV) yaitu (1) kehilangan energi pada regime fixed atau stationary flow yang di sebabkan oleh turbulensi aliran bed; (2) kehilangan energi pada regime sliding bed yang di sebabkan oleh sliding friction benda padat pada dinding pipa; (3) kehilangan energi pada regime heterogeneous akibat energi potensial (gravitasi) dan energi kinetik (tumbukan benda padat dengan dinding pipa); (4) kehilangan energi pada regime homogen disebabkan oleh turbulensi partikel besar; (5) kehilangan energi pada regime sliding yang disebabkan oleh sliding friction, energi potensial dan energi kinetik. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mendapatkan besaran pengaruh parameter aliran slurry terhadap regime aliran pada pipa lurus dan pipa belok. Pengambilan data primer secara analisis kuantitatif dengan pengumpulan data utama melalui pengukuran dengan menggunakan rangkain pipa sebagai model pengujian, serta didahului dengan pengumpulan data pendukung yaitu analisis karakteristik sampel air. Variasi debit yang digunakan ada 3 yaitu 0,004 m³/det, 0,003m³/det, dan 0,002 m³/det serta tinggi jatuh (head) 0,5 meter. Air yang mengandung partikel padat atau sedimen (*slurry*) yang mengandung sedimen seragam berupa pasir dengan ukuran 0,15 mm, 0,25 mm dan 0.42 mm.

Abstract

Experimental Study of Slurry Flow Velocity in Closed Channels. In a flow that passes through the system or installation of a wastewater pipeline network, there will be flow resistance caused by factors such as changes in velocity, changes in cross-section (pipe dimensions, bends, connections) and changes in surface roughness. The flow resistance will cause a decrease in energy and pressure. The sources of self head loss and limit deposit velocity (DHLLDV), namely (1) energy loss in fixed or stationary flow regimes caused by bed flow turbulence; (2) loss of energy in the sliding bed regime caused by sliding friction of solid objects on the pipe wall; (3) energy loss in heterogeneous regimes due to potential energy (gravity) and kinetic energy (collision of solid objects with pipe walls); (4) energy loss in the homogeneous regime is caused by large particle turbulence; (5) loss of energy in the sliding regime caused by sliding friction, potential energy and kinetic energy. The purpose of this study is to obtain the magnitude of the influence of slurry flow parameters on the flow regime in straight pipes and curved pipes. The primary data collection is quantitative analysis with the main data collection through measurements using a series of pipes as a test model, and is preceded by the collection of supporting data, namely the analysis of the characteristics of the water sample. There are 3 variations of discharge used, namely 0.004 m³/s, 0.003m³/s, and 0.002 m³/s and a 0.5 meter head fall Water containing solid particles or sediment (*slurry*) containing uniform sediment in the form of sand with sizes 0.15 mm, 0.25 mm and 0.42 mm.

Kata Kunci: Debit, kehilangan energi, tinggi jatuh (head)

1. Pendahuluan

Aliran dalam fluida pada saluran tertutup merupakan hal yang penting sehingga dibutuhkan proses perancangan dan perencanaan yang optimal. Pipa sebagai media distribusi telah banyak digunakan di industri dan distribusi air PDAM. Kelebihan saluran tertutup (pipa) sebagai pendistribusi air diantaranya kehilangan air sedikit, pemeliharaan juga mudah ketika

terjadi penyumbatan, kelebihan lainnya adalah dapat lebih mudah digunakan pada daerah yang sumbernya lebih tinggi dibanding tempat tujuan, aliran perpipa tidak dipengaruhi oleh udara secara langsung tetapi oleh tekanan hidrolis, lahan yang digunakan tidak luas dan tidak mengganggu aktivitas (*less disruption to current activities*), aman (*safety*) karena saluran tersebut tertutup maka resiko terhadap manusia sedikit jika dibanding saluran terbuka saat cuaca buruk,



ukurannya lebih kecil dari saluran terbuka sehingga saluran tertutup lebih fleksibel penempatannya, kualitas air lebih baik dibanding saluran terbuka karena air yang dialirkan terlindung oleh permukaan pipa.

Dalam instalasi jaringan pipa akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti kecepatan aliran, perubahan dimensi pipa dan adanya belokan, serta perubahan kekasaran material pipa. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan.

Proses perancangan dan perencanaan saluran tertutup (jaringan perpipaan) adalah aspek yang sangat luas dan membutuhkan analisa yang saling terkait satu sama lain antara kebutuhan air (debit), kecepatan, diameter pipa, tinggi jatuh (*head*) tekanan dan sebagainya. Akibat kurang diperhatikannya kehilangan energi ini, beberapa jaringan perpipaan yang ada tidak bekerja secara maksimal atau dengan kata lain jaringan tersebut tidak berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Kehilangan energi adalah salah satu faktor yang mempengaruhi kapasitas pipa sebagai sarana pendistribusi aliran air.

Salah satu hal penting yang mempengaruhi kinerja jaringan adalah kehilangan energi. Akibat kekeliruan dalam memperhitungkan kehilangan energi ini dapat menyebabkan permasalahan yaitu terkadang apa yang direncanakan kurang sesuai dengan apa yang terjadi di lapangan terutama terkait dengan kapasitas dan tekanan pada jaringan perpipaan sehingga berdasarkan hal-hal tersebut di atas maka kami melaksanakan penelitian ini yang difokuskan pada Pengaruh Perubahan Debit dan Tinggi Jatuh terhadap Kehilangan Energi pada Jaringan Perpipaan.

2. Landasan Teori

2.1. Aliran pada Saluran Tertutup

Saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tampang aliran penuh [1]. Fluida yang dialirkan melalui pipa bisa berupa zat cair atau gas dan tekanan bisa lebih besar atau lebih kecil dari tekanan atmosfer. Apabila zat cair di dalam pipa tidak penuh maka aliran termasuk dalam aliran saluran terbuka atau karena tekanan di dalam pipa sama dengan tekanan atmosfer, aliran

termasuk dalam pengaliran terbuka. Tekanan dipermukaan zat cair di sepanjang saluran terbuka adalah tekanan atmosfer.

Perbedaan mendasar antara aliran pada saluran terbuka dan aliran pada saluran tertutup adalah adanya permukaan yang bebas yang (hampir selalu) berupa udara pada saluran terbuka. Jadi jika pada pipa alirannya tidak penuh sehingga masih ada rongga yang berisi udara maka sifat dan karakteristik alirannya sama dengan aliran pada saluran terbuka [2].

2.2. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds (Re) merupakan bilangan yang tidak memiliki dimensi yang menjadi faktor penting dalam menganalisa jenis aliran (laminar, turbulen atau transisi) [3]. Re adalah perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskositas.

Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{v\rho d}{\mu} \quad (1)$$

$$= \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{viskositas}}$$

dimana,

- Re = Bilangan Reynolds
- v = kecepatan rata-rata aliran di dalam pipa (m/s)
- d = diameter dalam pipa (m)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- μ = viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

2.3. Kehilangan Energi

Kehilangan energi (*Headloss*) merupakan faktor yang mempengaruhi kapasitas pipa sebagai sarana penghantar aliran baik air maupun pipa [4].

Headloss terdiri dari :

a) *Mayor Headloss (major losses)*

Major Losses adalah kehilangan pada aliran dalam pipa yang disebabkan oleh friksi yang terjadi disepanjang aliran fluida yang mengalir terhadap dinding pipa.

b) *Minor Headloss (minor losses)*

Kehilangan-kehilangan yang terjadi dalam sistem pipa dikarenakan oleh *bends* (tekukan-tekukan), *elbows* (siku-siku), *joints* (sambungan-sambungan), *valves* (klep-klep). Dan Lain-lain disebut kehilangan minor [5].



2.4. Viskositas

Viskositas suatu fluida adalah ukuran resistensi terhadap laju depormasi [6]. Viskositas atau kekentalan suatu fluida sangat penting dalam analisa kondisi dan gerakan fluida. Zat cair riil adalah zat yang memiliki kekentalan, sedangkan zat cair ideal tidak memiliki kekentalan. Hal ini terjadi karena adanya sifat kohesi antara partikel zat cair.

Perbedaan kecepatan partikel dalam medan aliran terjadi karena adanya kekentalan zat cair. Partikel zat cair yang berdampingan dengan dinding batas memiliki kecepatan nol atau diam, sedang yang terletak pada jarak tertentu dari dinding akan bergerak. Perubahan kecepatan tersebut merupakan fungsi jarak dinding batas. Aliran zat cair riil disebut aliran viskos.

Aliran ini dapat dibedakan menjadi 2 (dua). Apabila pengaruh kekentalan (viskositas) adalah cukup dominan sehingga partikel-partikel zat cair bergerak secara teratur menurut lintasan lurus maka aliran disebut laminar. Aliran laminar terjadi apabila kekentalan besar dan kecepatan kecil. Dengan berkurangnya pengaruh kekentalan atau aliran bertambah kecepatan maka aliran akan berubah dari laminar menjadi turbulen [7].

2.5. Tekanan

Fluida memegang peranan penting dalam penyelesaian permasalahan. Tinjauan fluida statis dan fluida dinamis mutlak diperlukan untuk mencari berbagai solusi yang diperlukan. Salah satu hal yang diperhatikan dalam fluida statis adalah tekanan (*pressure*).

Fluida didefinisikan sebagai zat yang mengalami perubahan bentuk bila mendapat tekanan, meskipun tekanan tersebut sangat kecil [8].

Tekanan merupakan perkalian antara gaya kompresif yang bekerja pada satuan luas. Satuan tekanan dihasilkan dibagi satuan luas atau N/m^2 , yang adalah pascal, Pa. Namun satuan pascal sangatlah kecil, sehingga lebih sering diekspresikan dalam kilo Pascal (kPa).

$$\rho = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (2)$$

Tekanan pada fluida dipancarkan dengan kekuatan sama besar ke semua arah dan bekerja tegak lurus pada suatu bidang. Pada bidang datar

yang sama kekuatan tekanan dalam suatu cairan sama. Pengukuran-pengukuran satuan tekanan yaitu menggunakan berbagai bentuk meteran.

2.6. Kecepatan pada Tabung Pitot

Pernyataan Hukum Bernoulli adalah jumlah dari tekanan, energi kinetik tiap volume, dan energi potensial tiap volume di setiap titik sepanjang aliran fluida adalah sama. Artinya, saat aliran fluida meningkat, tekanan fluida tersebut akan turun. Dengan demikian, energi potensial yang dimiliki fluida juga akan turun. Sebaliknya, saat kecepatan aliran fluida turun, tekanan fluida akan naik [9].

Hukum ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis aliran fluida dengan beberapa asumsi, sebagai berikut:

- Fluida tidak dapat dimampatkan (*incompressible*).
- Fluida tidak memiliki kekentalan (*inviscid*).
- Aliran Fluida tidak berubah terhadap waktu (*steady*).
- Aliran fluida laminar (bersifat tetap, tidak ada pusaran).
- Tidak ada kehilangan energi akibat gesekan antara fluida dan dinding. Serta tidak ada kehilangan energi akibat turbulen.
- Tidak ada energi panas yang ditransfer pada fluida baik sebagai keuntungan ataupun kerugian panas.

Persamaan Bernoulli sebagai berikut:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (3)$$

dimana,

- P = Tekanan (Pascal)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
- v = Kecepatan Fluida
- g = gaya gravitasi ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
- h = ketinggian (m)

Hukum Bernoulli sangat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari dan dimanfaatkan pada aplikasi berikut :

a) Tabung Pitot (*Pitot tube*)

Tabung pitot adalah instrumen untuk melakukan pengukuran tekanan pada aliran fluida. Tabung pitot ditemukan oleh insinyur berkebangsaan Perancis, Henry Pitot [10] dan dimodifikasi oleh ilmuwan berkebangsaan Prancis, Henry Darcy [11].



Tabung pitot telah digunakan secara luas untuk menentukan kecepatan dari pesawat terbang dan mengukur kecepatan udara dan gas pada aplikasi industri [12]. Kelajuan udara pada pipa dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$v = \sqrt{2gh} \tag{4}$$

b) Venturimeter

Pada keadaan ideal dalam dinamika fluida persamaan bernoulli dan persamaan kontinuitas merupakan persamaan dasar yang digunakan oleh pipa venturimeter, melalui penjabaran dan substitusi persamaan diperoleh rumus menentukan kelajuan aliran pada pipa venturi meter. Berdasarkan teori kontinuitas bahwa lubang masuk dan keluaran pipa venturimeter yang mempunyai perbedaan ukuran penampang sedemikian teratur maka debit diantara lubang tersebut adalah sama [13].

2.7. Model dan Analisa Dimensi

Dengan dibuatnya model akan dapat diprediksi kelakuan dan kerja dari suatu bangunan. Beberapa kekurangan yang tidak diperkirakan akan terjadi dapat segera diketahui dan dihindari pada prototip yang direncanakan.

Bentuk sesungguhnya dari bangunan yang diselidiki disebut prototip, dan model bisa lebih besar, sama besar atau yang biasa dilakukan adalah lebih kecil dari prototip.

3. Metode Penelitian

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil dan

Laboratorium Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

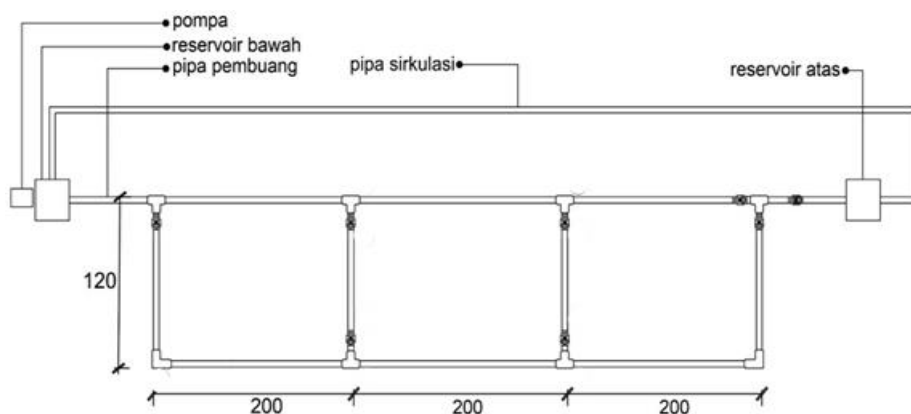
3.2. Jenis Penelitian

Penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Untuk memperoleh data penelitian, maka sumber data yang di gunakan berasal dari data primer yaitu data yang di peroleh langsung dari simulasi model fisik dilaboratorium dan data sekunder di peroleh dari *literature* dan hasil penelitian yang sudah ada baik yang telah dilakukan di laboratorium maupun dilakukan ditempat lain yang berkaitan dengan penelitian distribusi kecepatan

3.3. Rancangan Alat Uji

Untuk melakukan penelitian ini alat uji dirancang berdasarkan teori dan jurnal terdahulu. Alat uji ini dengan skala laboratorium, yaitu penggunaan alat yang hanya ditunjukkan untuk pengambilan data dari sampel sedimen yang akan dilakukan penelitian. Rancangan alat uji berupa jaringan pipa lurus panjang 600 cm dan diameter pipa acrylic 6,4 cm.

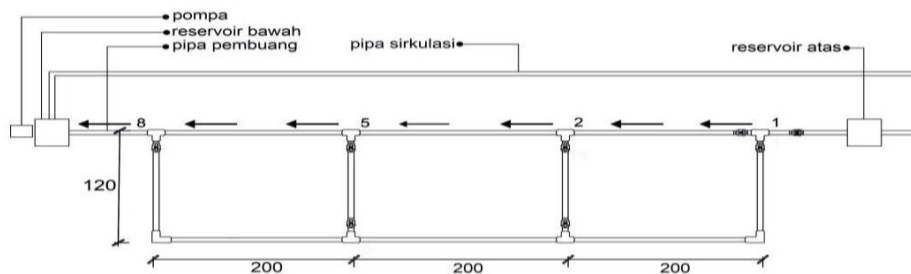
Gambar 1 menunjukkan model set up alat uji berbentuk persegi panjang. Jaringan ini dilengkapi bak penampungan air bawah dan bak penampungan air atas sebagai tempat sirkulasi air, katub sebagai pengatur debit, mesin pompa air yang mengatur suplai air dari bak penampungan bawah ke penampungan bak atas dan alat ukur kecepatan aliran.



Gambar 1. Set up alat uji

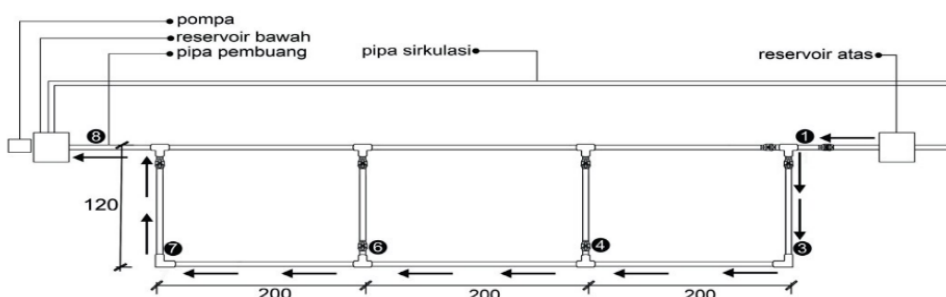
Pengujian dilakukan meliputi 2 (dua) kelompok, sebagai berikut :

a) Pengujian dengan arah aliran pipa lurus



Gambar 2. Arah aliran pipa lurus

b) Pengujian pada pipa belok



Gambar 3. Arah aliran pada pipa belok

Pengujian pipa ini dimaksudkan untuk mengamati karakteristik aliran yang terjadi dari awal pengaliran (hulu) sampai dengan akhir (hilir) dengan variasi debit (Q).

Tahap awal meliputi persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan selama penelitian. Kalibrasi peralatan dilakukan pada tabung pitot manual dan tabung pitot digital untuk mendapatkan hubungan nilai pembacaan alat tersebut.

Kalibrasi tabung pitot manual dilakukan dengan tabung pitot digital serta memasang tabung pitot pada Titik Pegukuran (TP) di pipa pengujian. Dan pitot diletakkan dengan ketinggian yang sama yaitu 2 cm dari dasar pipa pengujian. Catat tinggi tekanan (h) pada kedua tabung pitot dengan beberapa kali perubahan debit (Q).

Pengujian ini dilakukan berdasarkan tinggi jatuh air atau head yaitu 0,5 meter, 1 meter dan 2 meter. Prosedur pengambilan data sebagai berikut;

a) Penyiapan rangkaian pipa sebagai alat pengujian. Pengujian tahap awal dengan kondisi tinggi jatuh air atau head, yaitu 50

cm digunakan air bersih dan pengujian pada jaringan pipa.

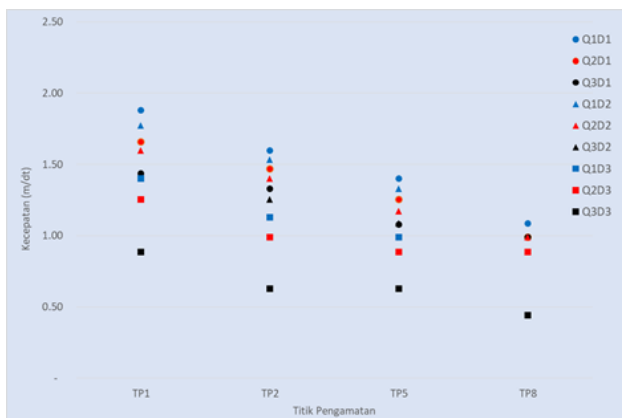
- b) Siapkan air pada reservoir bawah. Mengatur bukaan katub pengaliran sebelum air masuk ke reservoir atas. Katub ini dimaksudkan untuk mendapatkan variasi debit (Q) yang digunakan,
- c) Jalankan pompa untuk mensuplai air dari reservoir bawah ke reservoir atas dan dari reservoir atas akan mengalir secara gravitasi ke pipa pengujian dan berakhir ke reservoir bawah. Aliran air akan terus bersirkulasi sampai air di pipa pengujian menjadi konstan atau stabil,
- d) Pada saat aliran telah konstan, ambil debit aliran (Q) pada outlet/hulu pipa pengujian dengan cara menampung air selama beberapa waktu yang diinginkan debit aliran (Q) diatur dengan bukaan katub sesuai dengan debit aliran (Q) yang diinginkan,
- e) Baca penunjukan nilai tinggi tekanan (h) pada manometer yang terpasang, kecepatan (v) pada tabung pitot dan tinggi muka air (m) pada titik titik pengamatan di pipa jaringan.

- f) Ulangi Percobaan prosedur (a) sampai (e) untuk tiap perubahan debit (Q), perubahan model pengujian aliran pipa lurus dan pipa belokan.
- g) Data yang diperoleh dari eksperimen dianalisis.
Data yang diperoleh dari percobaan selanjutnya dianalisis dan disimpulkan hasilnya

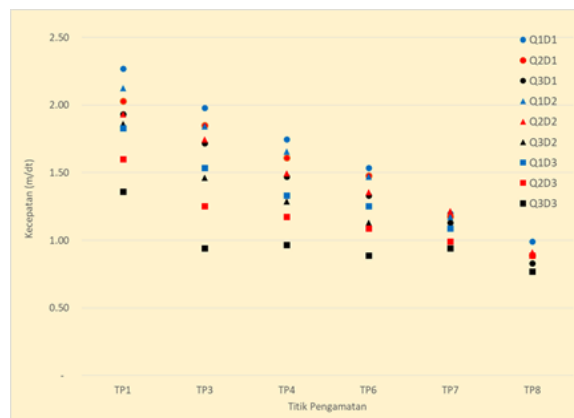
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pengaruh Parameter Aliran Slurry

Pengaruh Kecepatan pada pipa lurus maupun pipa belok dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar 4(a) menunjukkan total penurunan kecepatan pipa lurus pada setiap titik pengamatan.



(a)



(b)

Gambar 4. Pengaruh kecepatan pada (a) Pipa lurus (b) Pipa belokan

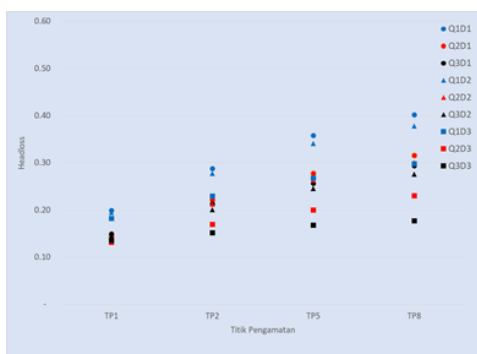
Besarnya simulasi penurunan kecepatan yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu tiap titik pengamatan untuk pipa lurus untuk Q1 ke Q2 dan Q2 ke Q3 secara berturut-turut untuk TP1 dengan D1 (0,15 mm) adalah 11,81% dan 13,36%. TP2 adalah 8,01% dan 9,55%, TP5 adalah 10,56% dan 13,90%, serta TP8 adalah 8,71% dan 1,01%.

Sedangkan Gambar 4(b) menunjukkan penurunan kecepatan pipa belok pada setiap titik pengamatan pada D1 (0,15 mm). TP1 adalah 10,56% dan 4,88%, TP3, TP4, TP6, TP7 dan TP8 juga terjadi penurunan kecepatan akibat penurunan debit Q1, Q2, dan Q3. Demikian juga penurunan kecepatan yang diakibatkan karena

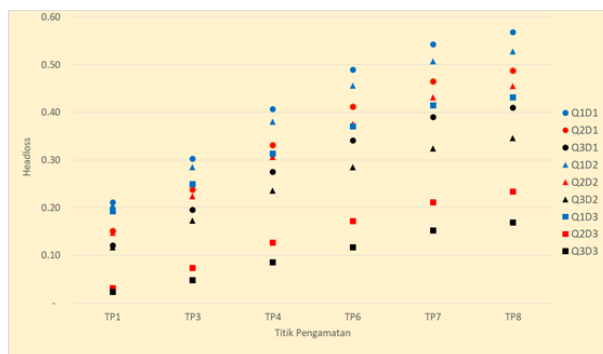
penurunan debit terjadi pada pipa D2= 0,25mm dan D3 =0,42 mm

Berdasarkan nilai presentase penurunan ini dapat disimpulkan bahwa akibat perubahan debit pada jaringan mempengaruhi besarnya penurunan kecepatan.

Hal ini disebabkan karena debit yang meningkat menyebabkan massa zat cair yang bergesekan atau berkonstraksi dengan dinding pipa semakin besar jumlahnya sehingga dengan debit yang besar menghasilkan Bilangan Reynold yang besar seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



(a)



(b)

Gambar 5. Hubungan debit terhadap kehilangan energi akibat perubahan debit (a) Pipa lurus (b) Pipa belokan

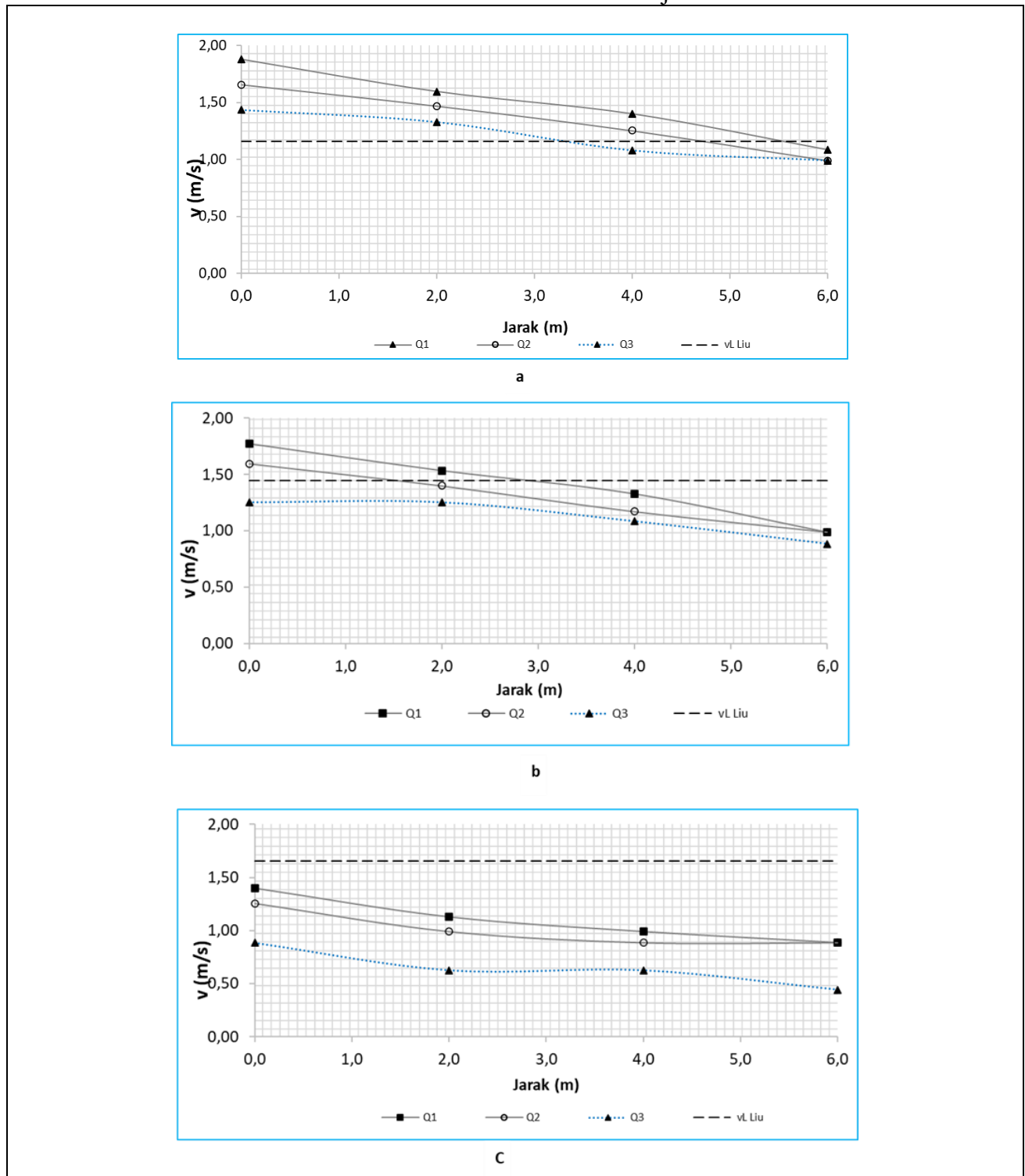


Gambar 5 juga menunjukkan bahwa kehilangan energi di pipa belok lebih besar jika dibandingkan kehilangan pipa lurus hal ini disebabkan karena disamping jaringan pipa lurus lebih panjang jalur gesekan antara air dengan pipa lebih jauh yang menyebabkan kehilangan energi mayor semakin meningkat, juga jumlah belokan dan kontraksi tiba-tiba

lebih banyak sehingga menghasilkan kehilangan energi minor lebih besar.

4.2. Regime Aliran Pipa Belok

Gambar 6 menunjukkan kondisi kecepatan aliran slurry (V_s) dan kecepatan aliran pengendapan (V_L) pada perubahan laju aliran masuk (Q) pada setiap titik pengamatan yang diwakili oleh jarak.



Gambar 6. Distribusi V_s dan V_L (a) $d_{0,15}$, (b) $d_{0,25}$ dan (c) $d_{0,42}$ pada Pipa lurus

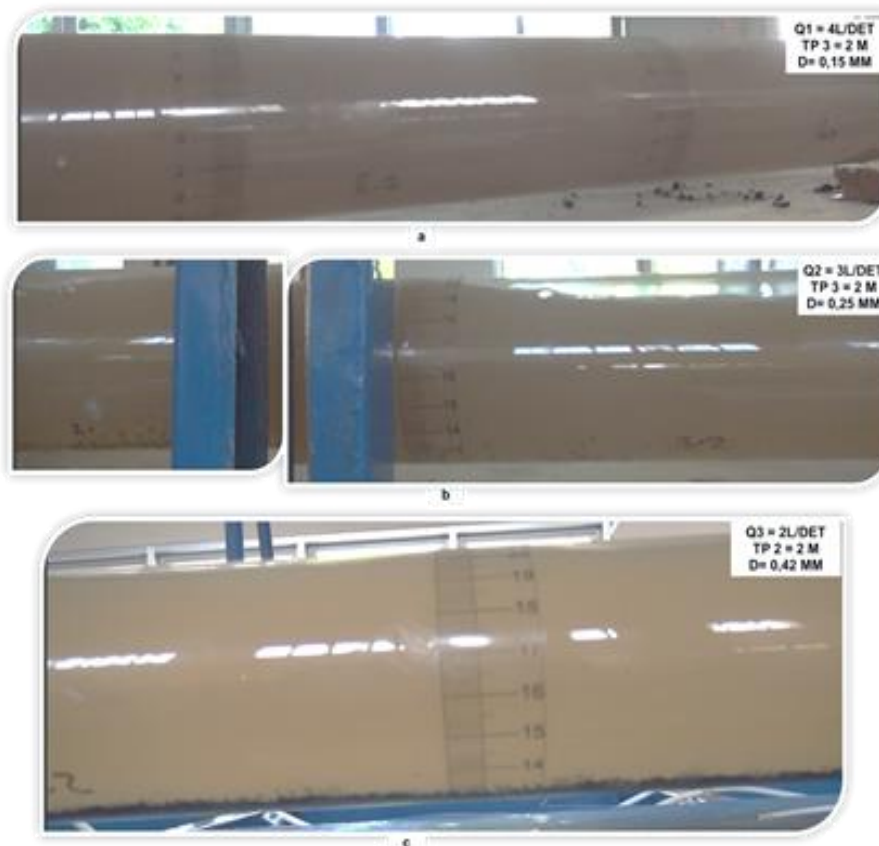


Gambar 6.a sedimen $d_{0,15}$ v_s slurry berada pada 1,88 m/sec- 0,63 m/sec. Kecepatan laju aliran Q1 berada regime *heterogeneous* dimana kecepatan awal pada pengaliran dalam pipa masih cukup tinggi atau turbulennya masih mampu mensuspensi aliran sedimen tersebut sampai di akhir pengaliran. Laju aliran aliran Q2 dan Q3 dari regime *heterogeneous* ke regime *moving bed flow* pada L 5 m (segmen 3) dan jarak 3,5 m (segmen 2), dan bergerak dengan cara *sliding* sampai di akhir pengaliran.

Sedangkan Gambar 6.b sedimen $d_{0,25}$ mm laju aliran berada pada 1,77 m/sec - 0,89 m/sec (Gambar 4.10.b) Laju aliran Q1 dan Q2 terjadi perubahan regime dari regime *heterogeneous* ke regime *moving bed flow* pada jarak 3 m (segmen 2) dan jarak 2 m (segmen 1), dan bergerak

dengan cara *sliding* sampai di akhir pengaliran. Laju aliran Q3 berada pada *moving bed flow* bergerak dengan cara *sliding* sampai di akhir pengaliran.

Pada Gambar 6.c, pada sedimen $d_{0,42}$ laju aliran berada pada 1,47 m/s - 0,44 m/s, laju aliran berada *moving bed flow* pada Q1 dan Q2 transpor sedimen dengan cara *sliding* tidak menghasilkan regime *stationary bed flow*, tetapi durasi waktu yang lebih lama di dibutuhkan untuk sampai ke pengaliran akhir. Laju aliran Q3 berada pada regime aliran dasar tetap atau regime *stationary bed flow*. Regime *stationary bed flow* dapat menyebabkan sedimen tinggal yaitu endapan sedimen yang terjadi karena ketidak mampuan kecepatan aliran (V_s) membawa sedimen yang terkandung dalam aliran.

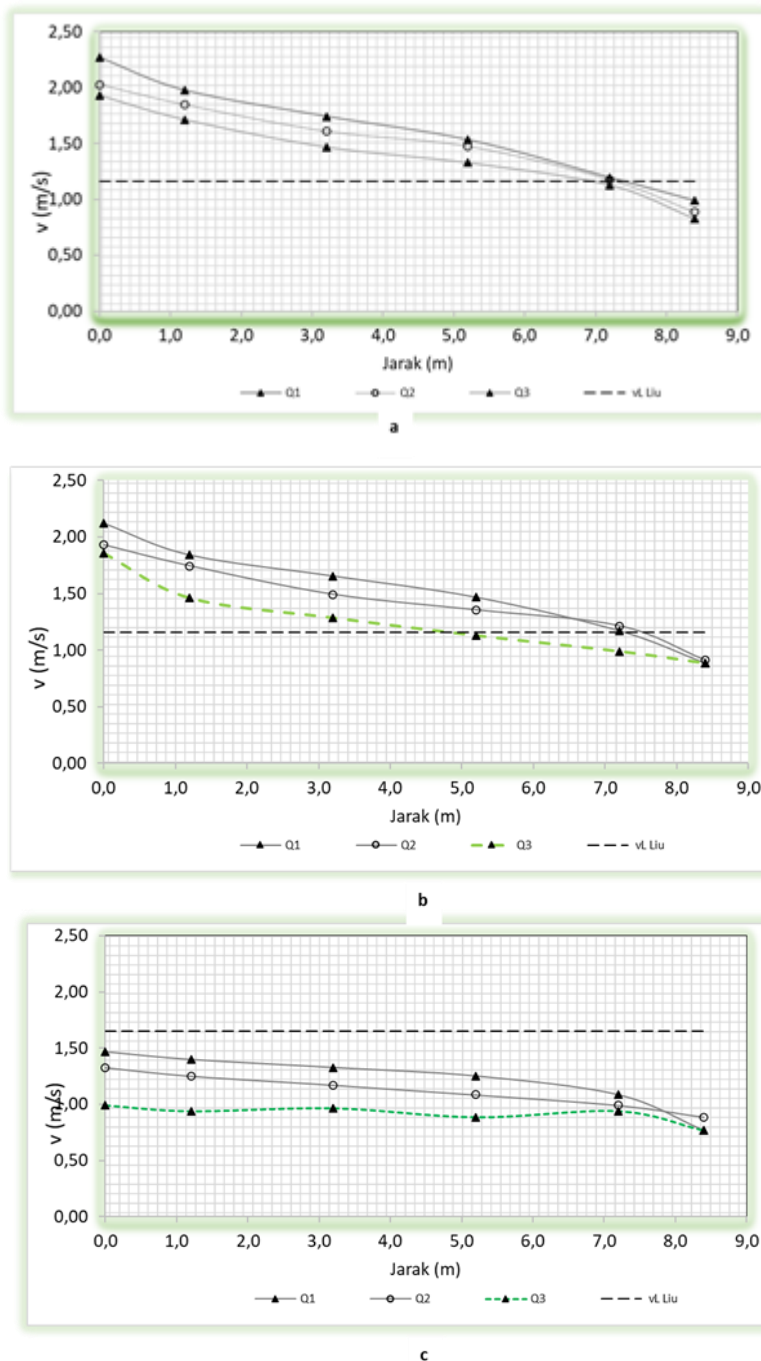


Gambar 7. Kondisi Pengaliran pada pipa lurus (a) $d_{0,15}$, (b) $d_{0,25}$ dan (c) $d_{0,42}$

4.3. Regime Aliran pada Pipa Belok

Gambar 6 menunjukkan kondisi kecepatan aliran slurry (V_s) dan kecepatan aliran pengendapan (V_L) pada perubahan laju aliran

masuk (Q) pada setiap titik pengamatan yang diwakili oleh jarak. Jarak 0,0 mewakili Titik Pengamat TP1. Jarak 2,0 TP2. Jarak 4,0 mewakili TP5 dan Jarak 6,0 mewakili TP8.



Gambar 8. Distribusi V_s dan V_L (a) $d_{0,15}$, (b) $d_{0,25}$ dan (c) $d_{0,42}$ pada pipa belok

Gambar 8.a sedimen $d_{0,15}$ v_s slury berada pada 2,27 m/sec - 0,83 m/sec. Kecepatan laju aliran Q1 berada regime *heterogeneous* dimana kecepatan awal pada pengaliran dalam pipa masih cukup tinggi atau turbulennya masih mampu mensuspensi aliran sedimen tersebut sampai di akhir pengaliran. Laju aliran aliran Q2 dan Q3 dari regime *heterogeneous* ke regime *moving bed flow* pada L 7 m.

Sedangkan pada Gambar 8.b sedimen $d_{0,25}$ mm laju aliran berada pada 2,12 m/sec - 0,89 m/sec, laju aliran Q1 dan Q2 terjadi perubahan

regime dari regime *heterogeneous* ke regime *moving bed flow* pada jarak 7,2 m. Laju aliran Q3 berada pada *heterogeneous ke regime moving bed flow* pada L 5 m.

Pada Gambar 8.c, Pada sedimen $d_{0,42}$ laju aliran berada pada 1,47 m/s - 0,44 m/s (Gambar 4.10.c) Laju aliran berada *moving bed flow* pada Q1 dan Q2 transpor sedimen dengan cara *sliding* tidak menghasilkan *regime stationary bed flow*, tetapi durasi waktu yang lebih lama di butuhkan untuk sampai ke pengaliran akhir. Laju aliran Q3 berada pada regime aliran dasar tetap atau *regime stationary bed flow*.

Regime stationary bed flow dapat menyebabkan sedimen tinggal yaitu endapan sedimen yang terjadi karena ketidak mampuan kecepatan aliran (V_s) membawa sedimen yang terkandung dalam aliran. Gambar 4.13 menunjukkan limit deposit velocity pada beberapa perubahan laju aliran masuk. Selama pengaliran terjadi perubahan regime dari regime heterogeneous ke regime moving bed flow dan regime stationary bed flow. Laju aliran Q1, Q2 dan Q3 terjadi perubahan regime dari regime pengaliran terjadi perubahan regime dari regime heterogeneous ke regime moving bed flow

Sama halnya pada Gambar 7 juga menunjukkan kondisi V_s dan V_L pada aliran belok, terjadi menggambarkan perubahan regime heterogeneous ke regime moving bed flow dan regime stationary bed flow. atas memberikan pengaruh atas regime $d_{0,15}$, $d_{0,25}$, $d_{0,42}$. Perubahan regime yang terjadi dari Semakin besar ukuran butiran pasir semakin besar limit deposit velocity atau LDV (V_L) sehingga semakin besar kebutuhan kecepatan alirannya (V_s) untuk tidak mencapai (V_L).

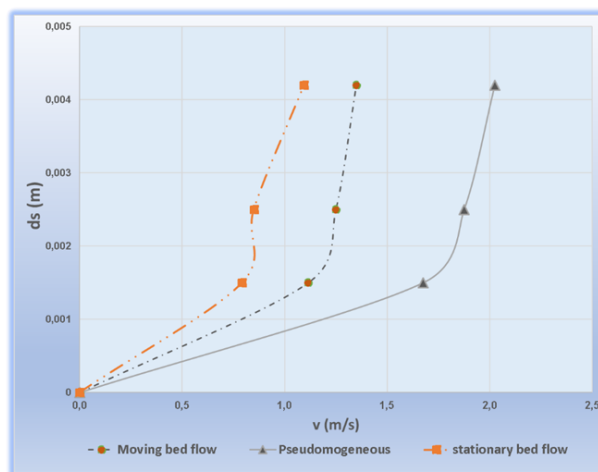
Parameter yang sangat penting dari aliran slurry adalah kecepatan pengendapan atau limit deposit velocity. Limit deposit velocity atau LDV yang di maksud dalam eksperimen ini adalah kecepatan yang tidak adanya pengendapan termasuk *slidding*, *salting bed* dan tidak termasuk *stationary bed*. Kecepatan slurry yang di diharapkan adalah kecepatan yang berada dalam regime heterogeneous. Analisa limit deposit velocity (V_L) bertujuan untuk mengetahui kecepatan minimum yang di butuhkan untuk mensuspensi partikel sedimen dari awal sampai di akhir pengaliran.

Secara eksperimental nilai limit deposit velocity atau LDV di tandai berupa mulai mengendapnya sedimen di pipa pada saat berlangsung simulasi dan transport selanjutnya di lakukan secara *sliding* atau *salting bed* dan tidak terjadi *stationary bed*. Limit deposit velocity (V_L) di pengaruhi oleh ukuran, bentuk kekasaran permukaan dan jaran tempuh aliran.

Secara teoritis Limit deposit velocity (V_L) di hitung menggunakan Persamaan Liu. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan V_L untuk ukuran sedimen diameter 0,15 mm adalah 1,16 m/s, diameter 0,25 mm adalah 1,45 m/s dan diameter 0,42 mm 0,65 m/s. Nilai V_L tersebut berasal dari *desimetric froud number* (F_L) dari

aliran slurry dan ukuran diameter sedimen. Berdasarkan nilai ini dapat dilihat bahwa semakin besar diameter butiran diperlukan batas kecepatan pengendapan semakin besar pula hal ini disebabkan karena diameter yang semakin besar mengakibatkan gaya atau berat sedimen semakin besar sehingga diperlukan kecepatan yang semakin besar untuk mengangkat sedimen tersebut.

4.4. Validasi Data

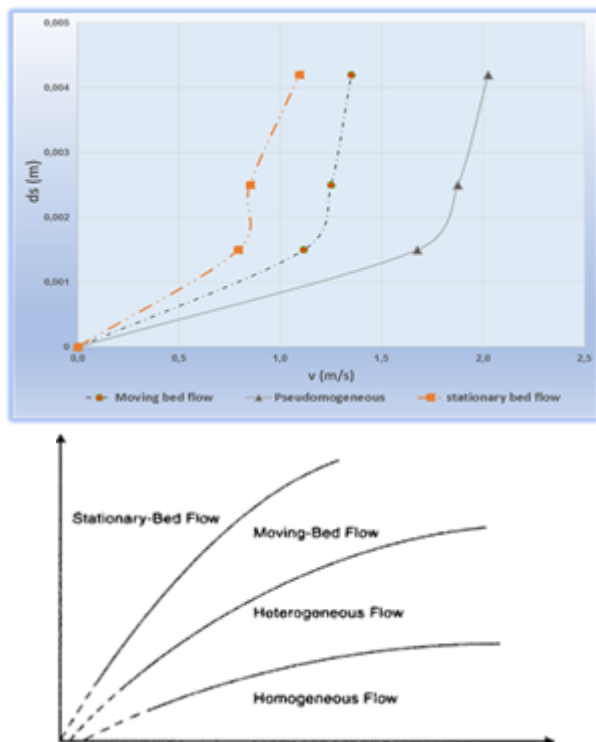


Gambar 9. Hubungan kecepatan pengendapan terhadap ukuran sedimen

Gambar 9 menunjukkan V_L pada persamaan Liu lebih besar dari hasil pengukuran pada ukuran sedimen yang sama, akan tetapi masih menunjukkan trend data yang sama yaitu garis linear. Semakin besar ukuran sedimen (d_s), limite deposit velocity (V_L) semakin besar pula. Hal ini juga menunjukkan kesesuai yang sama atas konsep Liu bahwa ukuran partikel (d_s) dan kecepatan slurry (v) sangat berpengaruh dalam klasifikasi regime aliran slurry. Nilai V_L persamaan Liu menunjukkan untuk sedimen ukuran 0,15 mm adalah 1.16 m/s, sedimen ukuran 0,25 mm adalah 1,45 m/s dan 0,42 adalah 1,65. Sedangkan nilai kecepatan V_L penelitian ini menunjukkan sedimen ukuran 0,15 mm adalah 1,13 m/s, untuk ukuran 0,25 mm adalah 1,32 m/s dan 0,42 adalah 1,40 mm.

Gambar 10 menunjukkan hasil penelitian dimana trend dari regime sejalan dengan yang ditunjukkan pada grafik liu, yaitu semakin besar diameter sedimen atau kecepatan aliran semakin kecil maka regime yang akan dituju adalah

regime Moving Bed Flow/ stationary bed flow demikian pula sebaliknya semakin kecil diameter sedimen atau kecepatan aliran semakin besar maka regime yang akan dituju adalah regime heterogeneus/homogeneous.



Gambar 10. Perbandingan grafik hasil penelitian dengan grafik Liu

5. Kesimpulan

Berdasarkan tujuan penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal dari hasil penelitian yang telah dilakukan, yaitu :

- Semakin besar debit maka kecepatan dan Bilangan Reynolds juga makin meningkat, demikian juga sebaliknya.
- Pada sedimen $d_{0,15}$ vs slury berada pada 1,83 m/sec - 0,63 m/sec. Kecepatan laju aliran Q1 berada regime heterogeneous dimana kecepatan awal pada pengaliran dalam pipa masih cukup tinggi atau turbulennya masih mampu mensuspensi aliran sedimen tersebut sampai di akhir pengaliran.
- Pada sedimen $d_{0,25}$ mm laju aliran berada pada 1,77 m/sec - 0,63 m/sec Laju aliran Q1 dan Q2 terjadi perubahan regime dari regime heterogeneous ke regime moving bed

flow pada jarak 3,5 m (segmen 2) dan jarak 2 m (segmen 1), dan bergerak dengan cara sliding sampai di akhir pengaliran. Laju aliran Q3 berada pada moving bed flow bergerak dengan cara sliding sampai di akhir pengaliran

- Pada sedimen $d_{0,42}$ laju aliran berada pada 1,47 m/s - 0,44 m/s (Gambar 8 (c)) Laju aliran berada moving bed flow pada Q1 dan Q2 transpor sedimen dengan cara sliding tidak menghasilkan regime stationary bed flow, tetapi durasi waktu yang lebih lama di dibutuhkan untuk sampai ke pengaliran akhir.

Referensi

- T. Bambang, *Mekanika Fluida*. Yogyakarta: Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, 1992.
- K. J. Robert, *Hidrolika Terapan Aliran pada Saluran Terbuka dan Pipa*, Revisi, 20. Yogyakarta: Andi, 2001.
- J. Dake, *Hidrolika Teknik*. Jakarta: Erlangga, 1983.
- Waspo, "Analisa Head Loss Sistem Jaringa Pipa pada Sambungan Kombinasi Diameter Berbeda," *J. Suara Tek. Fak. Tek. UM Pontianak*, 2017.
- M. Orianto and P. W.A., *Mekanika Fluida I*. Surabaya: Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November.
- J. R. Welty and Dkk, *Dasar-dasar Fenomena Transport Volume 1 Transfer Momen*, Edisi ke-4. Jakarta: Erlangga, 2000.
- T. Bambang, *Hidrolika II*. Yogyakarta: Beta Offset, 2003.
- Chorlton, *Fluida Mechanics*. London: Van Nostrand, 1967.
- E. Viandai, "Belajar Fluida, Ingat Hukum Bernoulli," *Hukum Bernoulli*, 2019. [Online]. Available: <http://www.quipper.com>. [Accessed: 25-Jan-2021].
- H. Pitot, "Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux," *ans Hist. l'Académie R. des Sci. avec les mémoires mathématique Phys. tirés des Regist. cette Académie*, pp. 363–376, 1732.
- H. Darcy, "Note relative à quelques modifications à introduire dans le tube de Pitot," *Ann. des Ponts Chaussées*, pp. 351–359, 1858.
- C. J. Geankoplis, *Transport processes and separation process principles (include unit operations)*, 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- S. R. Pudjiwahyuni, "Mengukur Besar Debit Aliran Fluida pada Pipa Venturimeter," Universitas Katolik Widya Mandala, 1999.

Analisis Kehilangan Air Irigasi Saluran Sekunder pada Daerah Irigasi Dakaino

Irvan Hamid^{1*}, Muhammad Saleh Pallu¹, Mukhsan Putra Hatta¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: ippank.sipolemajupi78@gmail.com

DOI: 10.25042/jpe.052021.07

Abstrak

Saluran D.I. dakaino terbagi atas 2 jenis, yaitu saluran pasangan batu dengan panjang 1848 m dan saluran beton pracetak dengan Panjang 617 m. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan pengukuran lapangan, rumus empiris dan simulasi dengan menggunakan HEC-RAS, parameter yang menjadi pembanding dalam tiap analisa antara lain ada tinggi muka air, debit pada saluran, kekasaran saluran, kehilangan energi pada saluran dan efisiensi. Berdasarkan hasil pengukuran lapangan diketahui nilai manning untuk saluran beton pracetak adalah 0.011 dan saluran pasangan batu adalah 0.048. analisa Kehilangan Energi air karena gesekan dan belokan pada saluran Beton Pracetak diketahui Kehilangan Energi air sebesar 0.39 meter dari panjang saluran 617 meter sedangkan pada saluran pasangan batu dengan panjang 1848 meter diketahui terdapat Kehilangan Energi air sebesar 19.84 meter. Pasangan batu memiliki kehilangan energi yang besar karena kekasaran saluran pasangan batu. Bentuk permukaan yang kasar akan memberikan kehilangan energi yang besar karena mempunyai nilai tahanan yang besar. Dari pengukuran di lapangan, terdapat kehilangan air sebesar 0.03 m³/det pada saluran Beton Pracetak sepanjang 617 meter, Sedangkan dari hasil analisa empiris kehilangan air karena evaporasi sebesar 0.00000323 m³/det, sedangkan pada saluran pasangan batu sepanjang 1848 m terdapat kehilangan air sebesar 0,07 m³/det dan dari hasil analisa empiris kehilangan air karena evaporasi sebesar 0.0000126 m³/det. Efisiensi saluran di D.I. Dakaino, dari hasil tersebut diketahui efisiensi saluran beton pracetak sepanjang 617 meter adalah 66.39% sedangkan pada saluran pasangan batu sepanjang 1848 meter diketahui efisiensinya adalah 66.87%.

Abstract

Analysis of Secondary Irrigation Water Loss in the Dakaino Irrigation Area. D.I Dakaino divided into 2 types, namely, masonry drain with a length of 1848 meters and precast concrete drain with a length of 617 meters. This research is conducted by comparing the field measurement, empiric formula and simulation by using HEC-RAS, parameters that are compared in each analysis include water level, discharge in the drain, roughness of the drain, loss of energy in the drain and efficiency. Based on the results of field measurements, it is known that the manning value for precast concrete drain is 0.011 and masonry drain is 0.048. Analysis of Water Energy Loss due to friction and bends in the Precast Concrete drain is known to have a water energy loss of 0.39 meters from a drain length of 617 meters, while in a masonry drain with a length of 1848 meters it is known that there is a water energy loss of 19.84 meters. The masonry has a large loss of energy because the roughness of the masonry drain is also inversely proportional to the precast concrete drain. A rough surface shape will provide a large energy loss because it has a large resistance value and vice versa with a smooth surface shape the energy loss is quite small. measurements in the field, there is a water loss of 0.03 m³/s in the Precast Concrete drain with a length of 617 meters, while from the results of empirical analysis the water loss due to evaporation is 0.00000323 m³/s, while in the masonry drain along 1848 m there is a water loss of 0.07 m³/s and from the results of empirical analysis the water loss due to evaporation is 0.0000126 m³/s. Drain efficiency in D.I. Dakaino, from these results it is known that the efficiency of the 617 meter long precast concrete drain is 66.39% while the 1848 meter masonry drain is known to have 66.87% efficiency.

Kata Kunci: Evaporasi, kehilangan energi, kehilangan air, saluran beton pracetak, saluran pasangan batu

1. Pendahuluan

Air yang mengalir dari saluran primer menuju ke sawah sering terjadi kehilangan air sehingga dalam perencanaan selalu dianggap bahwa seperempat sampai sepertiga dari jumlah air yang diambil akan hilang sebelum air itu sampai di sawah. Kehilangan air yang terjadi

erat hubungannya dengan efisiensi. Besaran efisiensi dan kehilangan air berbanding terbalik. Bila angka kehilangan air naik maka efisiensi akan turun dan begitu pula sebaliknya. Sedangkan kehilangan air adalah selisih antara jumlah air yang diberikan dengan jumlah air yang digunakan [1], untuk mengetahui kebutuhan air pengairan (irigasi bagi lahan-



lahan pertanian), debit air di daerah bendung harus lebih cukup untuk disalurkan ke saluran-saluran induk (sekunder tersier) yang disiapkan di lahan-lahan pertanian [2].

Saluran sekunder pada umumnya terletak pada punggung mengairi daerah sisi kanan dan kiri saluran tersebut sampai saluran drainase yang membatasinya. Saluran sekunder juga dapat direncanakan sebagai saluran garis tinggi yang mengairi lereng medan yang lebih rendah [3].

Saluran buatan merupakan saluran buatan manusia yang bertujuan untuk mempermudah pengaliran air sesuai dengan kepentingan tertentu. Saluran buatan memiliki penampang yang teratur dan lebih mudah dianalisa dibandingkan dengan saluran alami. Saluran buatan juga meliputi saluran pracetak yang menggunakan beton [4].

Besarnya kehilangan air pada saluran selain dipengaruhi oleh musim, jenis tanah, keadaan dan panjang saluran juga dipengaruhi oleh karakteristik saluran, diantaranya kekasaran saluran. Sistem penyaluran air ke areal persawahan menggunakan saluran tanah, dan mengakibatkan rendahnya efisiensi pengairan. Pendugaan besarnya kehilangan air pada saluran merupakan langkah awal dalam usaha pemanfaatan air secara efisiensi [5].

2. Landasan Teori

2.1. Saluran Irigasi

Jaringan irigasi yaitu prasarana irigasi yang pada pokoknya terdiri dari bangunan dan saluran pemberi pengairan beserta perlengkapannya, dan berdasarkan pengelolaannya dikenal dengan jaringan irigasi utama dan jaringan irigasi tersier. Jaringan irigasi adalah satu kesatuan saluran dan bangunan yang diperlukan untuk pengaturan air irigasi, mulai dari penyediaan, pengambilan, pembagian, pemberian dan penggunaannya. Secara hirarki, jaringan irigasi dibagi menjadi jaringan utama dan jaringan tersier. Jaringan utama meliputi bangunan, saluran primer dan saluran sekunder. Tujuan perencanaan saluran-saluran irigasi adalah untuk mendapatkan bentuk saluran yang stabil, murah dan memenuhi persyaratan hidrolis. Rumus-rumus pendekatan didasarkan atas percobaan ataupun penelitian dalam jangka waktu yang lama. Sebagai contoh, salah satu penelitian

untuk mendapatkan kecepatan aliran yang optimum, telah dilakukan oleh Steevensz dengan rumus $V = 0.45 \times Q \times 0.225$, dimana $Q =$ debit aliran dalam $m^3/detik$ [6]. Fortier dan Scobey juga membuat daftar kecepatan maksimal untuk berbagai jenis tanah atau lahan dengan debit yang direncanakan. Ada lagi pendekatan lain, dengan membatasi kecepatan aliran tidak lebih dari 0,75 m/detik agar rumput-rumput tidak tumbuh, atau kecepatan aliran tidak lebih dari 0,40 m/detik agar nyamuk-nyamuk tidak berkembang [7].

Saluran Primer (Saluran Induk) terdiri dari beberapa bagian petak sekunder yang mengambil langsung air dari saluran primer [3]. Saluran Sekunder yaitu terdiri dari beberapa petak tersier yang kesemuanya dilayani oleh satu saluran sekunder. Biasanya petak sekunder menerima air dari bangunan bagi yang terletak di saluran primer atau sekunder [3]. Saluran Tersier yaitu terdiri dari beberapa petak kuarter masing-masing seluas kurang lebih 8 sampai dengan 15 hektar [8]. Bila bahan pembentuknya halus, maka nilai hambatan menjadi rendah dan relatif tidak terpengaruh dengan perubahan taraf aliran. Sebaliknya bila bahan pembentuk saluran dari pasangan batu atau kerikil, maka nilai hambatan tinggi dan terjadi baik pada pada taraf air tinggi maupun rendah [9].

2.2. Kekasaran Saluran

Sebenarnya sangat sulit untuk menentukan faktor Kekasaran (n) sebab tidak ada cara tertentu untuk pemilihan nilai n . Pada tingkat pengetahuan sekarang ini, memilih n sebenarnya berarti memperkirakan hambatan aliran pada saluran tertentu, yang benar – benar tidak dapat diperhitungkan.

Untuk penentuan nilai n yang wajar diperlukan:

- 1) Memahami faktor – faktor yang mempengaruhi nilai n ;
- 2) Mencocokkan tabel dari nilai – nilai n untuk berbagai tipe saluran;
- 3) Memeriksa dan memahami sifat beberapa saluran yang koefisien kekasarnya telah diketahui;
- 4) Menentukan n dengan cara analitis berdasarkan distribusi kecepatan teoritis pada penampang saluran dan data



pengukuran kecepatan maupun pengukuran kekasaran.

2.3. Kehilangan Energi

Kehilangan air pada tiap ruas pengukuran debit masuk (*Inflow*) – debit keluar (*Outflow*) diperhitungkan sebagai selisih antara debit masuk dan debit keluar [10].

$$h_n = In - Out \quad (1)$$

dimana,

h_n : kehilangan air pada ruas pengukuran/bentang saluran ke n (m^3/det)

In : debit masuk ruas pengukuran ke n (m^3/det)

Out : debit keluar ruas pengukuran ke n (m^3/det)

Penyebab terjadinya kehilangan energi antara lain adalah Evapotranspirasi. Evapotranspirasi merupakan faktor dasar untuk menentukan kebutuhan air dalam rencana pengairan bagi lahan-lahan pertanian dan merupakan proses yang penting dalam siklus hidrologi [4].

$$ETc = ETo \times Kc \quad (2)$$

dimana,

ETc : Evapotraspirasi Tanaman (mm)

ETo : Evapotraspirasi Potensial (mm)

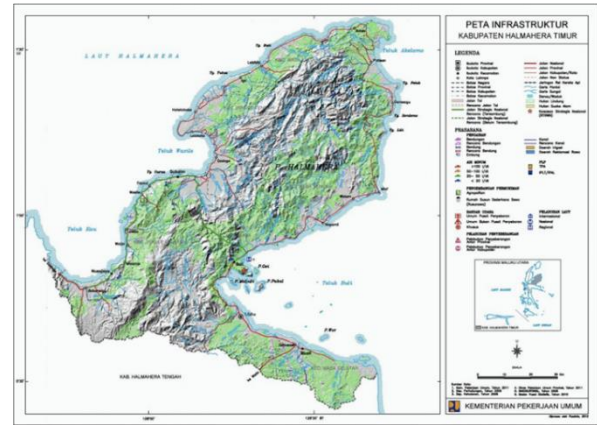
Kc : Keofisien Tanaman

Evaporasi, kadang-kadang disebut juga penggunaan konsumtif atau penguapan total, menunjukkan jumlah keseluruhan air yang dipindahkan dari satu daerah oleh transpirasi dan oleh penguapan dari permukaan tanah, salju dan air satu perkiraan tentang evaporasi yang sebenarnya dari satu daerah itu (permukaan atau bawah permukaan) dari persediaan air keseluruhan (presipitasi, aliran masuk di permukaan atau di bawah permukaan, serta air yang dikirim dari luar). Perubahan dari simpanan air di atas maupun di bawah tanah harus diperhitungkan juga bila jumlahnya cukup besar [11].

3. Metode Penelitian

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Daerah Irigasi Dakaino yang merupakan salah satu Daerah Irigasi yang masuk dalam Wilayah Sungai Halmahera Timur seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Kabupaten Halmahera Timur

3.2. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah studi lapangan, dimana data-data pada kondisi tersebut dikumpulkan lalu diolah dengan mengacu pada literatur-literatur yang berkaitan dengan penelitian tersebut, serta adanya kontrol, dengan tujuan untuk menyelidiki ada tidaknya hubungan sebab akibat serta berapa besar hubungan sebab akibat tersebut dengan cara memberikan perlakuan-perlakuan tertentu dan menyediakan kontrol untuk perbandingan.

3.3. Perhitungan dan Analisis

a. Perhitungan penampang, dalam penelitian ini bentuk saluran adalah trapesium. Perhitungan Luas penampang basah menggunakan rumus:

$$A = h \times \frac{(b_1 + b_2)}{2} \quad (4)$$

dimana,

A : luas penampang basah (m^2)

h : kedalaman air (m)

b_1 : lebar dasar saluran (m)

b_2 : lebar permukaan air (m)

b. Pengukuran debit, Pada penelitian ini dilakukan pengukuran kecepatan aliran dengan current meter. Setelah mendapatkan kecepatan aliran, maka debit aliran dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = A \times V \quad (4)$$

dimana,

Q : debit aliran (m^3/dt)

A : luas penampang basah saluran (m^2)

V : kecepatan aliran (m/dt)



- c. Perhitungan Kehilangan air akibat rembesan, Krantz mengemukakan metode menetapkan kehilangan air akibat rembesan (seepage) pada saluran yang dilapisi, yang ditemukan oleh Davis dan Wilson, dengan rumus:

$$Si = 0.4 \times C \frac{P \times L}{4 \times 106 \times 650 \times \sqrt{V}} \quad (5)$$

dimana,

Si : kehilangan air akibat rembesan ($m^3/m.hari$)

C : koefisien bahan pelapis saluran (m/dt)

P : keliling basah (m)

L : Panjang saluran (m)

V : Kecepatan aliran rata-rata (m/dt)

- d. Keofisien permeabilitas tanah (k) digunakan untuk mengetahui besarnya rembesan pada permasalahan bendungan, saluran irigasi, tanggul tanah, sumur resapan dan lainnya. Dengan mengkomparasi nilai keofisien rembesan antara data lapangan dengan nilai kisaran literatur, maka diharapkan hasilnya dapat digunakan memprediksi nilai awal keofisien rembesan [12].

Perhitungan Kehilangan air akibat rembesan Evaporasi, dihitung menggunakan rumus Penman. Rumus ini memberikan hasil yang baik bagi besarnya evaporasi air bebas, jika

di tempat itu tidak ada panci penguapan (evaporation pan) atau tidak ada studi neraca air (*water balance study*). Hasil perhitungan rumus ini lebih dapat dipercaya dengan memasukkan faktor-faktor energi [13]. Adapun rumus empiris Penman yang digunakan, yaitu :

$$E^n = 0.35 \times (ea - ed) \times 1 + \frac{V}{100} \quad (6)$$

dimana,

E : Evaporasi ($mm/hari$)

ea : tekanan uap jenuh pada suhu rata-rata harian (mm/Hg)

ed : tekanan uap sebenarnya (mm/Hg)

V : kecepatan angin pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah ($mil/hari$).

- e. Perhitungan Kehilangan total, Kehilangan air pada tiap ruas pengukuran debit masuk (*Inflow*) – debit keluar (*Outflow*) diperhitungkan sebagai selisih antara debit masuk dan debit keluar [14].

4. Hasil dan Pengukuran

4.1. Pengukuran Debit Sesaat

Pengukuran debit sesaat dilakukan di 2 titik yang lokasinya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. a) Pengukuran geometri saluran dan debit pada saluran irigasi D.I Dakaino b) Peta lokasi

4.2. Hasil Survei Pengukuran Arus dan debit

Kecepatan aliran sungai diukur dengan current meter. Penampang sungai dibagi dalam pias-pias, dan setiap pias dilakukan pengukuran arus selama 10 detik. Pengukuran dibuat pada berbagai level muka Penampang sungai dibagi dalam pias-pias, Kecepatan aliran sungai diukur

dengan current meter dan setiap pias dilakukan pengukuran arus selama 10 detik. Pengukuran dibuat pada berbagai level muka air sungai. Hasil perhitungan debit untuk saluran beton dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2 serta hasil pengukuran debit pada saluran pasangan baru dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 1. Pengukuran debit sesaat di awal saluran sekunder dengan beton pracetak Daerah Irigasi Dakaino pada tanggal 8 Juli 2021 Pukul 08.58 WIT

No	Jarak	Kedalaman (m)	Dalam Kincir		Jumlah putaran	Waktu (detik)	N	Kecepatan		Tampang Tengah	
			Titik ukur	(m)				Pada titik	Rata-Rata	Luas	Debit
1	0	0									
2	0	0.2	0.6	0.12	147	40	3.675	1.004	1.004	0.04	0.04
3	0.35	0.2	0.6	0.12	173	40	4.325	1.181	1.181	0.01	0.01
4	0.7	0.2	0.6	0.12	173	40	4.325	1.181	1.181	0.04	0.05
											0.10
										0.09	0.10
Pengukuran di saluran precast awal											
Debit		0.10 m ³ /detik									
Luas		0.09 m ²									
Kecepatan		0.10 m/detik									

Tabel 2. Pengukuran debit sesaat di akhir saluran sekunder dengan beton pracetak Daerah Irigasi Dakaino pada tanggal 8 Juli 2021 Pukul 09.30 WIT

No	Jarak	Kedalaman (m)	Dalam Kincir		Jumlah putaran	Waktu (detik)	N	Kecepatan		Tampang Tengah	
			Titik ukur	(m)				Pada titik	Rata-Rata	Luas	Debit
1	0	0									
2	0	0.2	0.6	0.12	88	40	2.200	0.601	0.601	0.04	0.02
3	0.35	0.2	0.6	0.12	173	40	3.325	0.908	0.908	0.01	0.01
4	0.7	0.2	0.6	0.12	119	40	2.975	0.812	0.812	0.04	0.03
											0.07
										0.09	0.07
Pengukuran di saluran precast akhir											
Debit		0.07 m ³ /detik									
Luas		0.09 m ²									
Kecepatan		0.73 m/detik									

Tabel 3. Pengukuran debit sesaat di awal saluran sekunder dengan pasangan batu di Daerah Irigasi Dakaino pada tanggal 7 Juli 2021 Pukul 10.43 WIT

Persamaan current meter

V = N<0.20 0.2281 0.0298 N
 N>0.2 0.2471 0.026 N

No	Jarak	Kedalaman (m)	Dalam Kincir		Jumlah putaran	Waktu (detik)	N	Kecepatan		Tampang Tengah	
			Titik ukur	(m)				Pada titik	Rata-Rata	Luas	Debit
1	0	0									
2	0	0.3	0.6	0.18	161	40	4.025	1.099	1.099	0.08	0.08
3	0.35	0.3	0.6	0.18	159	40	3.975	1.086	1.086	0.03	0.03
4	0.7	0.3	0.6	0.18	144	40	3.600	0.983	0.983	0.08	0.07
											0.11
											0.07
											0.19
										0.09	0.19
Pengukuran di saluran pratekan awal											
Debit		0.19 m ³ /detik									
Luas		0.18 m ²									
Kecepatan		1.05 m/detik									



Tabel 4. Pengukuran debit sesaat di akhir saluran sekunder dengan pemasangan batu di Daerah Irigasi Dakaino pada tanggal 7 Juli 2021 Pukul 10.43 WIT

Persamaan current meter
 $V = \begin{matrix} N < 0.20 & 0.2281 & 0.0298 N \\ N > 0.2 & 0.2471 & 0.026 N \end{matrix}$

No	Jarak	Kedalaman (m)	Dalam Kincir		Jumlah putaran	Waktu (detik)	N	Kecepatan		Tampang Tengah	
			Titik ukur	(m)				Pada titik	Rata-Rata	Luas	Debit
1	0	0									
2	0	0.4	0.6	0.24	79	40	1.975	0.539	0.539	0.10	0.05
3	0.35	0.4	0.6	0.24	63	40	1.575	0.430	0.430	0.04	0.02
4	0.7	0.4	0.6	0.24	80	40	2.000	0.546	0.546	0.10	0.05
										0.09	0.12

Pengukuran di saluran pemasangan batu akhir
 Debit 0.12 m³/detik
 Luas 0.24 m²
 Kecepatan 1.05 m/detik

4.3. Data Klimatologi

Uraian data klimatologi berikut ini untuk memberikan gambaran awal atas kondisi hidroklimatologi lokasi studi. Klimatologi dan

Geofisika (BMKG) Tutiling adalah seperti pada di bawah ini.

Data Klimatologi rata-rata Stasiun Meteorologi Tutiling pada tanggal 7 dan 8 Juli 2021 seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Data klimatologi rata-rata stasiun meteorologi tutiling pada tanggal 7 dan 8 Juli 2021

Tanggal	RH (%)	Temperatur Udara (°C)			Temp. Air Pan "A" (°C)	Kec. Angin (km/hari)	Penyinaran Matahari (jam)	Hujan (mm)
		Max	Min	Rata-Rata				
7	81	32.00	13.00	22.5	17.8	56.9	6.0	3.2
8	77	32.10	13.00	22.6	17.8	86.3	5.5	0.5

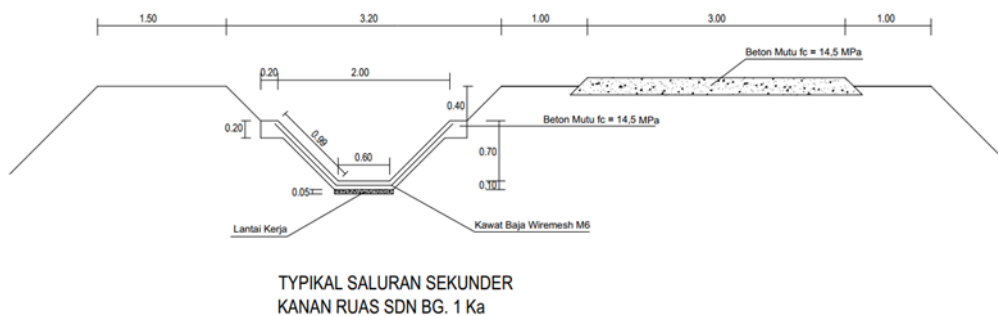
Sumber: BMKG Stasiun Klimatologi Tutiling

4.4. Analisa Hidraulika Saluran Irigasi Beton Pracetak D.I. Dakaino

Geometri saluran sekunder Beton Pracetak D.I. Dakaino ditampilkan dalam desain pada Gambar 3 dengan uraian sebagai berikut:

Elevasi dasar, $B.L_1 = 48.80$ m
 Debit desain, $Q_D = 0.10$ m

Lebar dasar, $b = 0.60$ m
 Kedalaman air, $y = 0.20$ m
 Free board, $F.B. = 0.50$ m
 Panjang Saluran (Δx), $L = 617.0$ m
 Kemiringan memanjang, $S = 0.0006$ m/m
 Kemiringan samping, $z = 1:0:1$ v:z:h
 Manning 'n' $n = 0.011$



Gambar 3. Geometri saluran beton pracetak D.I. Dakaino



Perhitungan hidraulik saluran beton pracetak D.I. Dakaino

- Area basah, $A = (b + zy)y = 0.16 \text{ m}^2$
- Keliling Basah, $Perimeter = b + 2y\sqrt{1+z^2} = 1.17 \text{ m}$
- Lebar Atas, $Topwidth = b + 2zy = 1.00 \text{ m}$
- Kedalam hidraulik, $D = \frac{A}{T} = 0.16 \text{ m}$
- Radius hidrolik, $R = \frac{A}{P} = 0.14 \text{ m}$
- Kecepatan aliran, $R = 0.63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Debit, $Q = 0.10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Debit persegi, $q = \frac{Q}{h} = 0.17 \text{ m}$
- Kedalaman kritis, $Y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.14 \text{ m}$
- Froude number, $Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} = 0.50$

4.5. Kehilangan Tinggi Energi Air karena Belokan Saluran Beton Pracetak

Rumus perhitungan kehilangan ketinggian karena belokan pada saluran beton pracetak adalah sebagai berikut:

$$H_L = K \frac{v^2}{2g} \tag{8}$$

dimana,

$$K = 2(B/R_c)$$

R_c = Radius tengah saluran

B = lebar saluran

$$K = 0.40$$

Jumlah belokan = 1

Kehilangan karena belokan $h_{LB} = 0.01 \text{ m}$

4.6. Total Kehilangan Tinggi Energi dari Saluran Beton Pracetak

Total kehilangan tinggi energi dari saluran beton pracetak adalah jumlah kehilangan tinggi energi karena gesekan dan belokan, sehingga total kehilangan tinggi energi pada saluran pasangan batu adalah:

$$h_{LT} = 0.388 \text{ m}$$

4.7. Kehilangan Air karena Evaporasi Saluran Beton Pracetak

Evaporasi dihitung menggunakan rumus Penman [14]. Rumus ini memberikan hasil yang baik bagi besarnya evaporasi air bebas, jika

ditempat itu tidak ada panci penguapan (evaporation pan) atau tidak ada studi neraca air (water balance study). Hasil perhitungan rumus ini lebih dapat dipercaya dengan memasukkan faktor-faktor energi. Adapun rumus empiris Penman yang digunakan yaitu:

Kehilangan di belokan

$$h_L = K \frac{V_2}{2g} \tag{9}$$

dimana,

$$K = 2 \times \left(\frac{B}{R_c}\right),$$

R_c : radius tengah saluran

: $5 \times T$

B : lebar saluran

Koefisien, K : 0.4

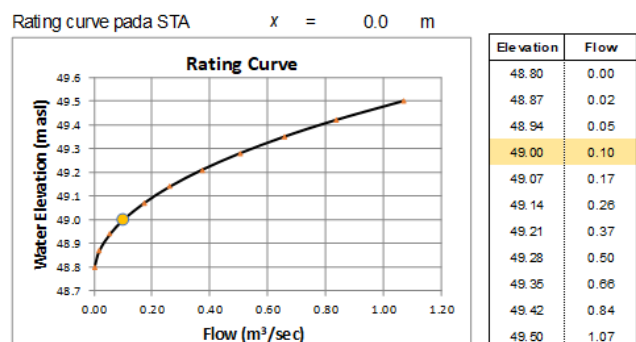
Jumlah belokan : 1

Kehilangan di belokan : 0.01 m

Dari hasil perhitungan diketahui kehilangan air di saluran beton pracetak karena evaporasi pada tanggal 7 Juli 2021 adalah 0.00000323 m³/det, kondisi kehilangan air ini sangat berpengaruh terhadap kondisi klimatologi daerah D.I. Dakaino, geometri saluran dan hidraulika.

4.8. Lengkung Debit Saluran Beton Pracetak

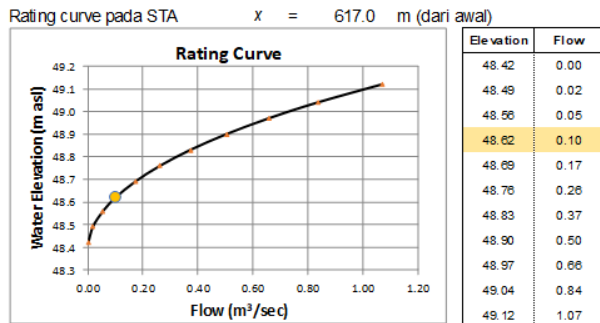
Lengkung Debit adalah hubungan grafis antara tinggi muka air dan debit. Dibuat berdasarkan data pengukuran debit dari berbagai ketinggian muka air, yang mencakup keadaan tinggi muka air rendah sampai tinggi. Jumlah dan sebaran data pengukuran debit yang dapat menggambarkan hubungan antara tinggi muka air dan debit dari muka air terendah sampai tertinggi harus cukup mewakili keadaan sebenarnya kejadian di lapangan [15].



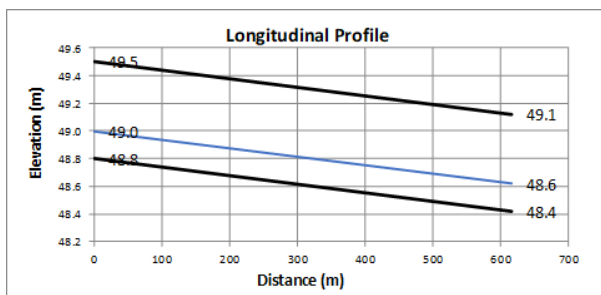
Gambar 4. Lengkung debit awal saluran (STA 0) saluran beton pracetak D.I. Dakaino



Gambar 4 merupakan lengkung debit pada awal saluran dan Gambar 5 merupakan lengkung debit pada akhir saluran beton pracetak, kondisi ini dihasilkan dari pengukuran lapangan pada saluran yang kemudian dianalisis dengan analisa hidraulika sehingga menghasilkan lengkung debit.



Gambar 5. Lengkung debit akhir saluran (STA 0+617) saluran beton pracetak D.I. Dakaino



Gambar 6. Penampang memanjang saluran beton pracetak D.I Dakaino

4.9. Nilai Manning Saluran beton pracetak D.I. Dakaino

Berdasarkan perbandingan analisa hidraulik dengan rumus empiris dan kondisi debit sesaat di lapangan dapat diketahui bahwa nilai kekasaran manning pada saluran beton pracetak D.I. Dakaino adalah:

$$\text{Rumus Manning } V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}$$

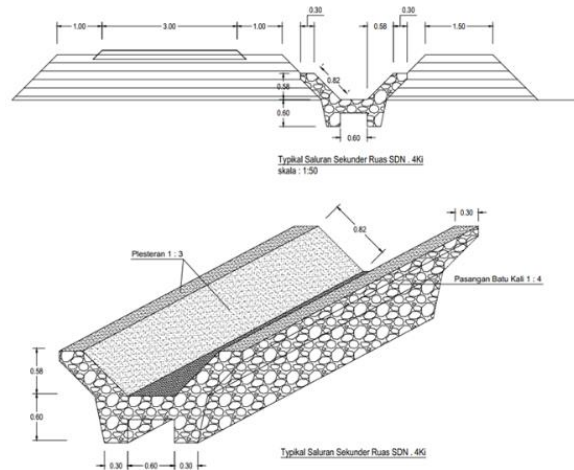
Mannings 'n' = 0.011

Nilai manning ini akan digunakan dalam simulasi HEC-RAS untuk mengetahui perubahan hidraulika saluran berdasarkan simulasi HEC-RAS.

4.10. Analisa Hidraulika Saluran Irigasi Pasangan Batu D.I. Dakaino

Geometri saluran sekunder pasangan batu D.I. Dakaino seperti pada desain di Gambar 7 dengan uraian sebagai berikut:

- Elevasi dasar (Awal), $B.L1$ = 48.42 m
- Debit Desain, Qd = 0.19 m³/s
- Lebar dasar, B = 0.60 m
- Kedalaman air, y = 0.60 m
- Free bord, $F.B.$ = 0.28 m
- Panjang Sakuran (Δx), L = 1848 m
- Kemiringan memanjang, S = 0.0107m/m
- Kemiringan Samping, z = 1.0 1v : zh
- Mannings 'n', n = 0.048



Gambar 7. Geometri saluran pasangan batu D.I. Dakaino

Perhitungan Hidraulik Saluran Pasangan Batu D.I. Dakaino seperti yang ditampilkan di Tabel 8.

- Area basah : $A = 0.27 \text{ m}^2$
- Keliling Basah : $Perimeter = b + 2y\sqrt{1+z^2}$
- Lebar Atas $Topwidth = b + 2zy$
- Kedalam hidraulik $D = \frac{A}{T} = 0.23 \text{ m}$
- Radius hidrolis $R = \frac{A}{P} = 0.19 \text{ m}$
- Kecepatan aliran $V = 0.70 \text{ m/s}$
- Debit $Q = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}$
- Debit persegi $q = \frac{Q}{b} = 0.32 \text{ m}$
- Kedalaman kritis $Y_c = v\left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} = 0.22 \text{ m}$
- Froude number $Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} = 0.47$



4.11. Kehilangan Tinggi Energi karena Gesekan pada Saluran Pasangan Batu

Kehilangan akibat fraksi (Manning)

$$h_f = n^2 = \frac{L V^2}{R^{4/3}} = 19.82 \text{ m}$$

4.12. Kehilangan Tinggi Energi karena Belokan pada Saluran Pasangan Batu

$$\text{Kehilangan di belokan } h_L = K \frac{vv^2}{2g}$$

dimana,

$$K = 2 (B/Rc)$$

Rc = radius tengah saluran = 5T

B = lebar saluran

K = 0,40

Jumlah belokan = 2

Kehilangan Karena belokan $h_{LB} = 0.02 \text{ m}$

4.13. Total Kehilangan Tinggi Energi dari Saluran Pasangan Batu

Total kehilangan tinggi energi dari saluran pasangan batu adalah jumlah kehilangan tinggi energi karena gesekan dan belokan, sehingga total kehilangan tinggi energi pada saluran pasangan batu adalah:

$$h_{LT} = 19.84 \text{ m}$$

4.14. Kehilangan Air karena Evaporasi pada Saluran Pasangan Batu

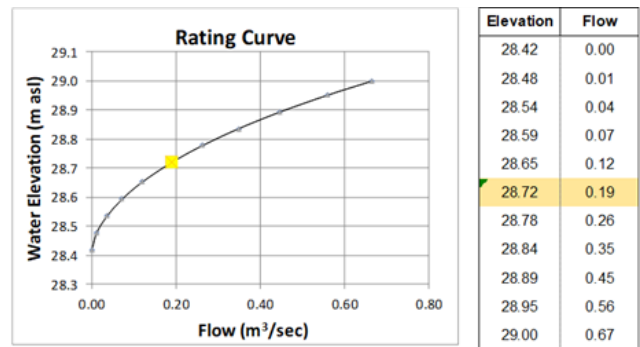
Evaporasi dihitung menggunakan rumus Penman. Rumus ini memberikan hasil yang baik bagi besarnya evaporasi air bebas, jika ditempat itu tidak ada panci penguapan (*evaporation pan*) atau tidak ada studi neraca air (*water balance study*). Hasil perhitungan rumus ini lebih dapat dipercaya dengan memasukkan faktor-faktor energi [6].

Pada kondisi perubahan geometri dan hidraulika saluran, semakin panjang saluran dan semakin dalam air maka kehilangan debit karena evaporasi akan semakin banyak karena penambahan area basah.

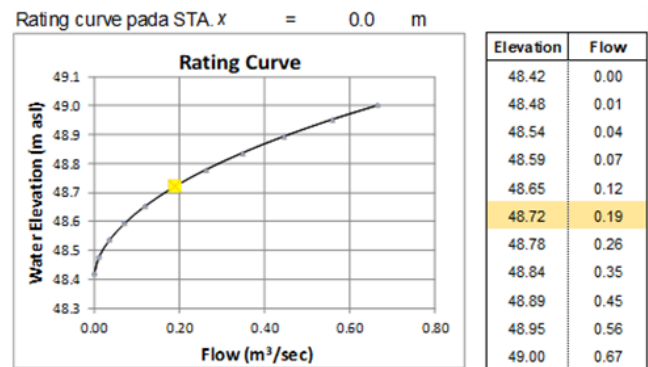
4.15. Lengkung Debit Debit pada Saluran Pasangan Batu

Pada Gambar 8 merupakan lengkung debit pada awal saluran dan Gambar 9 merupakan

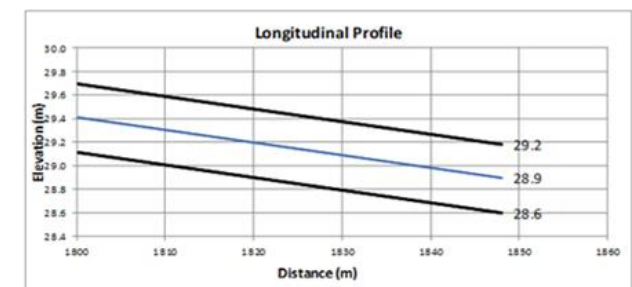
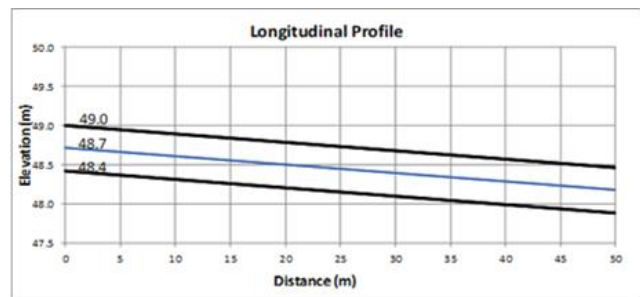
lengkung debit pada akhir saluran pasangan batu, kondisi ini dihasilkan dari pengukuran lapangan pada saluran yang kemudian dianalisis dengan analisa hidraulika sehingga menghasilkan lengkung debit.



Gambar 8. Lengkung debit awal saluran (STA 0) saluran pasangan batu D.I. Dakaino



Gambar 9. Lengkung debit akhir saluran (STA 1+848) saluran pasangan batu D.I. Dakaino



Gambar 10. Penampang memanjang saluran pasangan batu D.I Dakaino

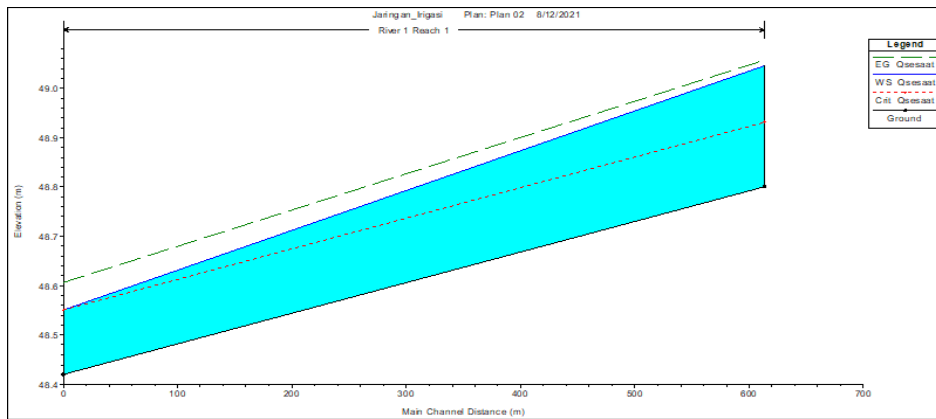


4.16. Nilai Manning Saluran Pasangan Batu D.I. Dakaino

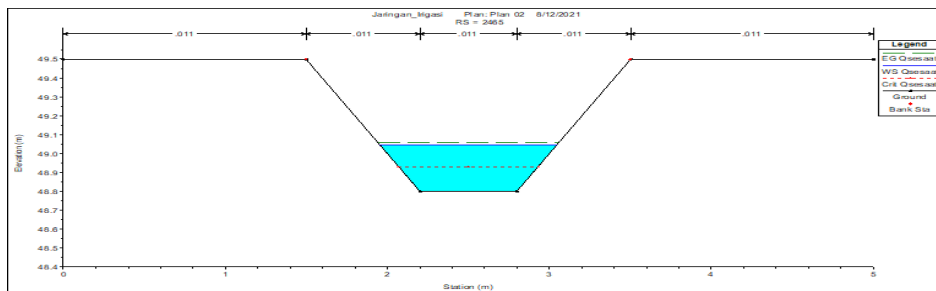
Berdasarkan perbandingan analisa hidraulik dengan rumus empiris dan kondisi debit sesaat di lapangan dapat diketahui nilai kekasaran manning pada saluran pasangan batu D.I. Dakaino adalah 0.48.

4.17. Simulasi HEC RAS pada Saluran Beton Pracetak

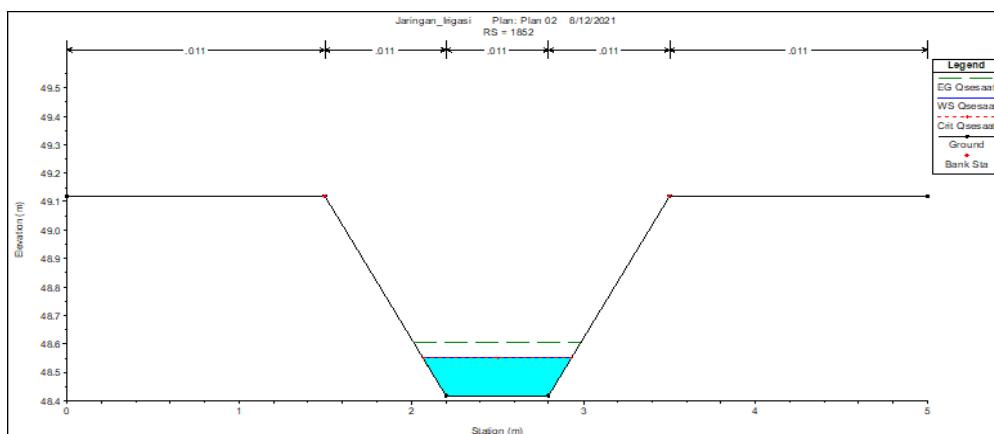
Dari hasil simulasi HEC-RAS menunjukkan adanya perubahan elevasi muka dasar air dari 49.05 m ke 48.55 m (Gambar 11) yang terjadi karena percepatan air dari hulu ke hilir. Adapun perubahan kecepatan terjadi dari 0.48 m/det ke 1.10 m/det seperti yang ditampilkan pada perbandingan simulasi HEC-RAS.



Gambar 11 Profil memanjang saluran beton pracetak dari simulasi HEC-RAS



Gambar 12 Profil saluran beton pracetak pada awal saluran (STA 0+000)



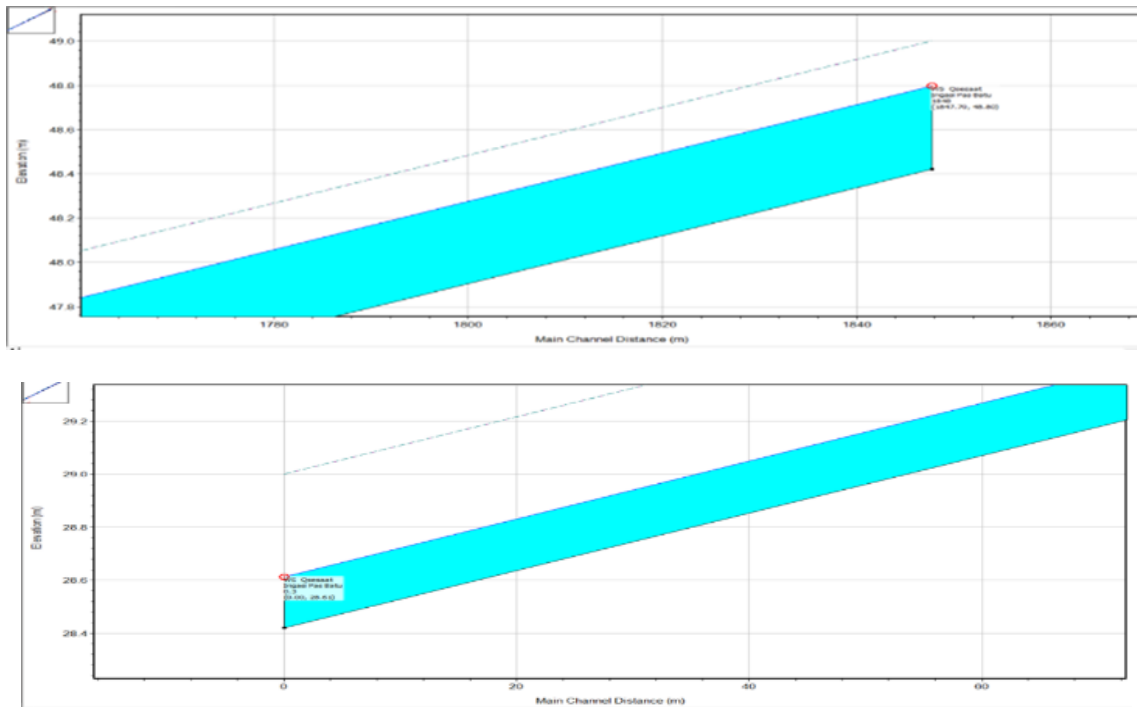
Gambar 13 Profil saluran beton pracetak pada awal saluran (STA 0+617)



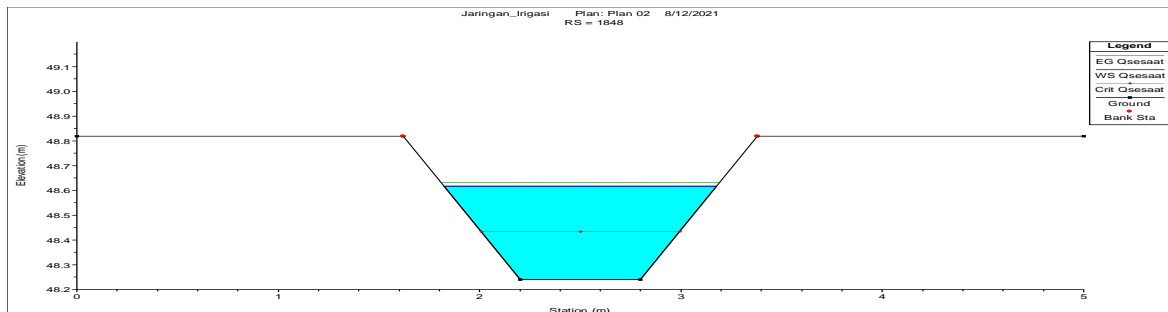
4.18. Simulasi HEC RAS pada Saluran Pasangan Batu

Dari hasil simulasi HEC-RAS menunjukkan adanya perubahan elevasi muka dasar air dari 48.8 m ke 28.61 m (Gambar 14), hal ini terjadi

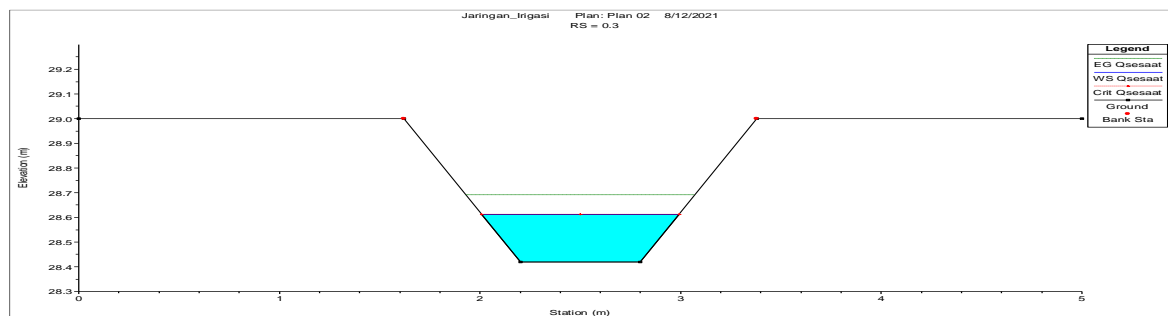
karena terjadinya percepatan air dari hulu ke hilir. Adapun perubahan kecepatan terjadi dari 0.52 m/det ke 1.24 m/det seperti yang ditampilkan pada perbandingan simulasi HEC-RAS.



Gambar 14 Penampang memanjang saluran pasangan batu



Gambar 15 Profil saluran pasangan batu pada awal saluran (STA 0+000)



Gambar 16 Profil saluran pasangan batu pada awal saluran (STA 1+848)

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan diketahui nilai Manning untuk saluran beton pracetak adalah 0.011 dan saluran pasangan batu adalah 0.048. Diketahui Kehilangan Energi air sebesar 0.39 meter dari panjang saluran 617 meter sedangkan pada saluran pasangan batu dengan panjang 1848 meter diketahui terdapat Kehilangan Energi air sebesar 19.84 meter. Pasangan batu memiliki kehilangan energi yang besar karena kekasaran saluran pasangan batu juga besar berbanding terbalik dengan saluran beton pracetak. Dari pengukuran di lapangan, terdapat kehilangan air sebesar 0.03 m³/det pada saluran Beton Pracetak sepanjang 617 meter, Sedangkan dari hasil analisa empiris kehilangan air karena evaporasi sebesar 0.00000323 m³/det, sedangkan pada saluran pasangan batu sepanjang 1848 m terdapat kehilangan air sebesar 0,07 m³/det dan dari hasil analisa empiris kehilangan air karena evaporasi sebesar 0.0000126 m³/det. Efisiensi saluran di D.I. Dakaino, dari hasil tersebut diketahui efisiensi saluran beton pracetak sepanjang 617 meter adalah 66.39% sedangkan pada saluran pasangan batu sepanjang 1848 meter diketahui efisiensinya adalah 66.87%.

Referensi

- [1] P. J. Wusunahardja, "Efisiensi dan Kehilangan Air Irigasi," *J. Inf. Tek.*, 1991.
- [2] A. G. Kartasapoetra and M. M. Sutedjo, *Teknologi Pengairan Pertanian Irigasi*. Jakarta: Bumi aksara, 1994.
- [3] Direktorat Jendral Pengairan DPU, "Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02," Bandung, 1986.
- [4] Sudjarwadi, "Teknik Sumberdaya Air," in *Diktat kuliah Jurusan Teknik Sipil*, 1987.
- [5] C. Asdak, *Hidrologi Pengolahan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gajah Mada University Prees, 1995.
- [6] C. D. Soemarto, *Hidrologi Teknik*. Jakarta: Erlangga, 1999.
- [7] V. Te Chow, *Hidrolika Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga, 1992.
- [8] V. E. Hansen, O. W. Israelsen, and G. E. Stringham, *Dasar-Dasar dan Praktek Irigasi diterjemahkan oleh Endang Pipin T.* Jakarta: Erlangga, 1986.
- [9] B. Triatmodjo, *Hidrolika II*. Yogyakarta: Beta Offset, 1993.
- [10] Tim Penelitian Water Management IPB, "Laporan Penelitian Management Tipe 'C' dan 'D' Mengenai Kehilangan Air Pada Jaringan Utama dan pada Petak Tersier Di Daerah Irigasi Manubulu Kabupaten Kupang," Bogor, 1993.
- [11] R. K. Linsley, *Hidrologi Untuk Insinyur*, Edisi Ketii. Jakarta: Erlangga, 1985.
- [12] N. Djarwanti, "Komprasi Koefisien Permeabilitas (k) Pada Tanah Kohesif," *Media Teknik Sipil*, Surakarta, 2008.
- [13] S. Wiganti, "Analisis Hubungan Debit dan Kehilangan Air pada Saluran Irigasi Tersier Di Daerah Irigasi Punggur Utara Ranting Dinas Pengairan Punggur Lampung Tenggara," *J. Teh. Pertan. Univ. Lampung*, 2006.
- [14] F. Yustiana and G. A. Sitohang, "Perhitungan Evapotranspirasi Acuan untuk Irigasi di Indonesia," *J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 2, 2018.
- [15] H. O. Togatrop, D. I. Kusumastuti, and S. Tugiono, "Analisis Sedimentasi Di Check Dam (Study Kasus : Sungai Air Anak dan Sungai Talang Bandung) Desa Talang Bandung, Kecamatan Sumber Jaya, Kabupaten Lampung Barat," *JRSDD*, vol. 4, pp. 435-446, 2016.



Estimasi Biaya *Disposal* PET 97 DP Menggunakan Metode *High and Low* di PT Vale Indonesia Tbk, Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan

Muhammad Abdi Dzil Ikram¹, Aryanti Virtanti Anas*¹, Rizki Amalia¹

¹Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Jl. Poros Malino km. 6 Bontomarannu, Gowa, Sulawesi Selatan, 92171

*Email: aryantiv@unhas.ac.id

DOI: 10.25042/jpe.052021.08

Abstrak

Area *disposal* merupakan sebuah lokasi pada tambang terbuka yang digunakan untuk menyimpan sementara tanah penutup maupun *waste rock* yang dihasilkan dari kegiatan pengupasan. Di PT Vale Indonesia terdapat tiga tipe *disposal* yang digunakan, yaitu *induced flow*, *semi-induced flow*, dan *finger flow*. Penelitian dilakukan pada *disposal* PET 97 DP yang termasuk tipe *semi-induced flow*. *Disposal* ini dikerjakan menggunakan dua unit *dozer* CAT D8R sebagai alat utama dan material sipil untuk meningkatkan stabilitas *disposal*. *Disposal* PET 97 DP memiliki empat *dumping point* dengan kapasitas 919.484,363 ton sehingga total kebutuhan material sipil 321.819,527 ton. Estimasi biaya produksi material sipil dilakukan menggunakan metode *high and low* dan menghasilkan total biaya sebesar \$1.186.777,53. *Disposal* PET 97 DP diperkirakan dapat digunakan hingga 12 minggu dengan target produksi 75.000 ton/minggu. Total biaya yang dibutuhkan dalam pengoperasian *disposal* PET 97 DP diperkirakan mencapai \$1.450.513,50.

Abstract

Cost Estimation of Disposal PET 97 DP at PT Vale Indonesia Tbk, East Luwu Regency, South Sulawesi. Disposal area is a location in an open pit mine that were used to temporarily keep waste rock or overburden that were produced during the stripping process. In PT Vale Indonesia, Tbk there were three types of disposal that were used, those are induced flow, semi-induced flow, and finger flow. This research was done at PET 97 DP disposal with the type of the disposal being semi-induced flow. This disposal was done using two units of CAT D8R dozers as the main equipment and civil material as the petrification materials to increase the stability of the disposal. PET 97 DP disposal has four dumping points and capacity of 919.484,363 ton so that the needs of 321.819,527 ton of civil materials. Civil material production cost was estimated using high-low method with the total cost was \$1.186.777,53. PET 97 DP disposal was expected to be used for 12 weeks with production target of 75.000 ton/week. The total operation cost that was needed for PET 97 DP disposal was estimated at \$1.450.513,50.

Kata Kunci: *Dozer CAT D8R, material sipil, metode high-low, semi-induced flow, tanah penutup*

1. Pendahuluan

Pertambangan merupakan sebuah kegiatan jangka panjang yang dilakukan dengan tujuan untuk mengambil mineral berharga termasuk mineral logam dari dalam bumi. Hampir semua bijih logam terletak di bawah lapisan tanah penutup (*overburden*) atau batuan (*waste rock*). Lapisan tersebut harus dikupas atau digali untuk menudahkan proses eksploitasi endapan bijih logam [1]. Tanah atau batuan penutup tersebut setelah dikupas diangkut ke lokasi penimbunan yang disebut *disposal*.

Disposal merupakan sebuah lokasi pada sebuah tambang terbuka yang digunakan untuk menyimpan sementara tanah penutup maupun *waste rock* yang dihasilkan selama proses

pengupasan [2]. *Disposal* terkadang dapat menjadi masalah pada proses penambangan antara lain karena perencanaan yang kurang sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Desain *disposal* dilakukan saat membuat desain tambang terbuka [3] dan perlu dilakukan secara matang agar target produksi dapat tercapai serta operasi pengerjaan aman dilakukan. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam mendesain *disposal* antara lain lokasi, kapasitas lahan yang akan digunakan, faktor keamanan dari lereng *disposal* [4], dan jumlah alat berat yang digunakan karena memengaruhi tingkat produksi serta lama penggunaan *disposal*.

Di PT Vale Indonesia (PTVI) terdapat tiga tipe *disposal* yang digunakan sebagai tempat penyimpanan tanah penutup, yaitu *induced flow*,



semi-induced flow, dan *finger flow* [2]. *Disposal* PET 97 DP termasuk tipe *semi-induced flow* yang dikerjakan menggunakan dua unit alat dorong (*dozer*) CAT D8R sebagai alat utama. Untuk meningkatkan stabilitas *disposal* digunakan material sipil yang terdiri dari material *slag*, *reject*, dan material kuari. Biaya yang digunakan untuk memproduksi material sipil bervariasi setiap bulan sehingga memengaruhi biaya *disposal*. Biaya *disposal* tipe *semi-induced flow* di PTVI seperti Watulabu 16C DP adalah \$51,841.49 dan Nickel Hill 15 DP sebesar \$138,061.15 [5].

Biaya *disposal* terdiri dari biaya penggunaan alat berat dan biaya produksi material sipil. Perhitungan biaya *disposal* di perusahaan umumnya menggunakan metode aritmatik. Selain metode aritmatik, terdapat metode lain yang juga dapat digunakan untuk menghitung biaya produksi seperti metode analisis akuntansi (AA), metode *high-low* (MHL) dan analisis regresi (AR) [6]. Salah satu metode yang paling sederhana untuk memisahkan biaya produksi menjadi biaya tetap dan biaya variabel adalah metode MHL. Metode ini mengidentifikasi tingkat aktivitas terendah dan tertinggi untuk jangka waktu tertentu [7]. Kelebihan metode ini adalah dapat digunakan pada data yang jumlahnya terbatas karena hanya memerlukan data pada titik tertinggi dan titik terendah dari data yang tersedia [8].

Oleh karena itu, penelitian ini mengestimasi biaya *disposal* PET 97 DP dimana perhitungan biaya produksi material sipil menggunakan metode *high-low*.

2. Metode Penelitian

Pada kegiatan penelitian ini dilakukan pengambilan data yang terdiri dari:

1. Data *dozer* CAT D8R; efisiensi kerja, waktu siklus, target produksi/minggu, dan biaya operasi dan biaya perbaikan.
2. Densitas material *disposal* sebesar 1,72 ton/m³.
3. Data topografi; untuk mendesain *disposal*.
4. Target produksi mingguan; rencana jumlah material yang akan ditimbun pada lokasi penelitian tiap minggu, yaitu 75.000 ton/minggu.
5. Data penggunaan material sipil sebagai bahan perkuatan sebesar 35%.

6. Biaya produksi material sipil bulan Januari-Juni 2019.

Keseluruhan data diolah untuk mendapatkan biaya *disposal* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mendesain *disposal*
Desain *disposal* dibuat menggunakan *Maptek Vulcan 7.5* untuk menentukan volume dan tonase *disposal*.
2. Menghitung produktivitas *dozer*.
3. Menghitung umur pada *disposal* yang ditentukan dari jumlah tonase yang dapat ditampung oleh *disposal* tersebut dan kemampuan produksi *dozer*.
4. Mengestimasi jumlah *dozer* yang digunakan pada *disposal* berdasarkan target produksi dan produktivitas *dozer*.
5. Menghitung biaya *disposal* yang merupakan jumlah dari biaya produksi material sipil dan biaya *dozer*.

Estimasi biaya produksi material sipil didasarkan pada data historis bulan Januari-Juni 2019 menggunakan metode *high-low*. Estimasi biaya penggunaan *dozer* dilakukan berdasarkan tingkat produktivitas alat, umur *disposal*, target produksi tanah penutup dalam satu minggu, dan data historis biaya *dozer*.

3. Hasil Penelitian

3.1 Desain *Disposal* PET 97 DP

Disposal PET 97 DP didesain menggunakan aplikasi *Vulcan 9.1* berdasarkan data topografi tahun 2018 pada area bekas penambangan. Pada *disposal* terdapat empat *dumping point* yang masing-masing berada pada ketinggian 895m, 890m, 887m, dan 884m. Titik terendah berada pada ketinggian 845m sehingga beda tinggi mencapai 50m.

Volume *disposal* yang diperoleh dari hasil desain adalah 528.439,289 m³. Tingkat densitas tanah pada area *Petea* sebesar 1,72 ton/m³ sehingga total tonase *disposal* PET 97 DP sebesar 919.484,36 ton.

3.2 Produktivitas *Dozer*

Perhitungan produktivitas aktual *dozer* dilakukan untuk mengetahui tingkat produksi tanah penutup yang dihasilkan oleh satu unit *dozer* dalam satu jam. *Dozer* yang digunakan



adalah CAT D8R tipe *semi universal* (SU) dengan kapasitas *blade* sebesar 8,7 m³ [9]. Material pada *disposal* PET 97 DP berupa tanah dengan kandungan air yang cukup tinggi sehingga termasuk dalam kategori agak sukar digusur. Oleh karena itu *blade fill factor* yang digunakan sebesar 0,65 [10].

Efisiensi kerja *dozer* pada *disposal* PET 97 DP dihitung berdasarkan tingkat ketersediaan penggunaan (UA) menggunakan Persamaan 1[11] yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

$$UA = \frac{W}{W+S} \quad (1)$$

dimana,

UA = Ketersediaan penggunaan

W = Jumlah waktu yang digunakan alat

untuk bekerja (Jam)
S = Jumlah waktu yang tidak digunakan alat
untuk bekerja (Jam)

Nilai rata-rata efisiensi kerja *dozer* selama pengamatan waktu siklus sebesar 0,55.

Produktivitas aktual dihitung menggunakan data waktu siklus aktual yang didapatkan melalui pengamatan aktivitas *dozer* pada selama lima hari. Data waktu siklus yang diperoleh terdiri dari rata-rata waktu maju, waktu mundur, dan waktu tetap (ganti *gear*) yang dibutuhkan *dozer* untuk melakukan pendorongan material secara maksimal dari batas *dumping* hingga ujung *crest*. Hasil pengamatan waktu siklus *dozer* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Efisiensi kerja *dozer* berdasarkan pengamatan lapangan

Hari/Tanggal	Waktu Pengamatan (WITA)	Dozer	Efisiensi Kerja
Rabu/28 Mei 2019	8.43 - 12.00	DZ 4044	0,30
Jumat/31 Mei 2019	8.26 - 11.08	DZ 4040	0,72
Senin/10 Juni 2019	8.18 - 11.26	DZ 4063	0,33
Rabu/12 Juni 2019	8.49 - 12.08	DZ 4063	0,65
Kamis/13 Juni 2019	8.05 - 11.57	DZ 4063	0,69
Jumat/14 Juni 2019	8.16 - 10.55	DZ 4051	0,64
Rabu/3 Juli 2019	8.27 - 12.03	DZ 4062	0,53
Rata-Rata			0,55

Tabel 2. Hasil Pengamatan Waktu Siklus *Dozer*

Kegiatan	Maju	Mundur	Ganti gigi
Rata-rata (s)	31,686	19,381	6,000
Rata-rata (menit)	0,528	0,323	0,100

Total waktu siklus aktual adalah 0,951 menit, sehingga tingkat produktivitas satu unit *dozer* dengan densitas material sebesar 1,74 ton/m³ adalah 9,84 ton. Faktor kemiringan pada *disposal* PET 97 DP diasumsikan satu, sehingga dengan efisiensi kerja sebesar 0,55 diperoleh tingkat produktivitas *dozer* dalam satu jam mencapai 341.971 ton.

3.3 Umur *Disposal*

Perkiraan umur *disposal* PET 97 DP dilakukan berdasarkan kapasitas desain *disposal*

dan target produksi tanah penutup mingguan yang ditetapkan oleh *disposal engineer*. Target produksi mingguan yang ditetapkan untuk *disposal* PET 97 DP adalah 75.000 ton/minggu. Kapasitas *disposal* sebesar 919.484,36 ton, sehingga *disposal* PET 97 DP diestimasi dapat digunakan hingga 12 minggu.

3.4 Estimasi Jumlah *Dozer*

Jumlah *dozer* yang diperlukan dalam pengoperasian *disposal* ditentukan berdasarkan tingkat target produksi yang ditetapkan dalam satu minggu dan tingkat produktivitas *dozer*. Target produksi mingguan *disposal* PET 97 DP adalah 75.000 ton/minggu dengan produktivitas aktual *dozer* sebesar 341,971 ton/jam, sehingga diperoleh tingkat produktivitas *dozer* dalam satu minggu yang dapat dilihat pada Tabel 3.



Tabel 3. Produktivitas aktual dozer dalam satu minggu

Jumlah Dozer	Produktivitas			
	Jam	Shift (7 Jam)	Hari	Minggu
1	341,97 ton	2.393,80 ton	7.181,39 ton	50.269,74 ton
2	683,94 ton	4.787,59 ton	14.362,78 ton	100.539,47 ton

Produktivitas satu unit *dozer* dalam satu minggu sebesar 50.269,74 ton/minggu. Jumlah tersebut belum mampu mencapai target produksi mingguan (75.000 ton/minggu) sehingga perlu ditambahkan satu unit *dozer*. Jumlah *dozer* yang diperlukan agar target produksi tercapai adalah dua unit *dozer* dengan tingkat produktivitas aktual sebesar 100.539,47 ton/minggu.

3.5 Biaya Disposal

Perhitungan biaya dilakukan untuk mengetahui total biaya yang diperlukan dalam pengerjaan *disposal* PET 97 DP. Perhitungan biaya dibagi menjadi dua bagian yaitu perhitungan biaya produksi material sipil dan biaya penggunaan alat.

1. Biaya Produksi Material Sipil

Material sipil merupakan material pembatuan yang digunakan untuk pengerasan landasan area kerja *dozer* pada *dumping point* yang dalam proses produksinya membutuhkan biaya.

Data historis biaya produksi material sipil pada periode Januari–Juni 2019 sangat bervariasi sehingga perlu dilakukan analisis biaya untuk menentukan biaya tetap dan biaya variabel dengan metode *high-low*. Pada metode ini ditentukan tingkat aktivitas tertinggi dan terendah pada periode tertentu dan membaginya dengan perubahan biaya yang dihasilkan dari dua tingkat tersebut [12]–[14].

Tabel 4. Biaya produksi material sipil pada bulan Januari dan Juni 2019

Aktivitas	Januari 2019		Juni 2019	
	Biaya (\$)	Ton	Biaya (\$)	Ton
Pengangkutan	505.346	134.057	2.708.477	1.143.814
Pemuatan	74.648	134.057	620.346	1.143.814
Pengeboran dan Peledakan	21.735	134.057	185.558	1.143.814

Biaya produksi material sipil terdiri dari biaya pengangkutan, pemuatan, dan pengeboran dan peledakan. Tingkat produksi tertinggi berada pada bulan Juni untuk ketiga aktivitas tersebut sebesar 1.143.814 ton dan tingkat produksi terendah berada pada bulan Januari sebesar 134.057 ton. Biaya produksi material sipil pada bulan Januari dan Juni 2019 dapat dilihat pada Tabel 4.

Data pada Tabel 4 digunakan untuk menghitung biaya variabel menggunakan Persamaan 2 [13]:

$$\text{Biaya variabel } (b) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

dimana,

y_2 = total biaya pada tingkat aktivitas tertinggi

y_1 = total biaya pada tingkat aktivitas terendah

x_2 = jumlah produksi pada tingkat aktivitas tertinggi

x_1 = jumlah produksi pada tingkat aktivitas terendah

Setelah mengetahui jumlah biaya variabel, maka biaya tetap dapat dihitung dengan mengurangi biaya variabel dari total biaya produksi [7] berdasarkan data historis yang tersedia dalam jangka waktu tertentu [15]. Hasil perhitungan biaya variabel dan biaya tetap material sipil dapat dilihat pada Tabel 5.



Tabel 5. Biaya variabel dan biaya tetap dengan metode *high-low*

Aktivitas	Biaya Variabel (\$/Ton)	Biaya Tetap pada Aktivitas Tertinggi (\$)	Biaya Tetap pada Aktivitas Terendah (\$)
Pengangkutan	2,18	212.855,02	212.855,02
Pemuatan	0,54	2.200,44	2.200,44
Pengeboran dan Peledakan	0,16	14,73	14,73

Berdasarkan data historis diketahui penggunaan material sipil pada *disposal* sebesar 35% dari total keseluruhan material dan sebanyak 65% berupa material tanah penutup (Tabel 6).

Pada Tabel 6 diketahui bahwa jumlah material sipil yang dibutuhkan yaitu 321.819,527 ton dari total kebutuhan seluruh material sebesar 919.484,363 ton.

Tabel 6. Penggunaan material sipil

Jenis	Persentase	Jumlah (ton)
Tanah penutup	65%	597.664,836
Material sipil	35%	321.819,527
Total Jumlah Material		919.484,363

Hasil perhitungan biaya produksi material sipil dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Total biaya produksi material sipil

Aktivitas	Biaya Variabel (\$/Ton)	Total Biaya Variabel (\$)	Biaya Tetap (\$)	Total Biaya (\$)
Pengangkutan	2,18	702.159,65	212.855,02	915.014,66
Pemuatan	0,54	173.919,36	2.200,44	176.119,80
Pengeboran dan peledakan	0,16	52.212,16	14,73	52.197,43
Total Biaya Produksi				1.143.331,89

Material sipil terbagi atas tiga jenis, yaitu material *slag*, *reject*, dan material kuari. Material *slag* merupakan limbah hasil pengolahan yang mengeras dan membentuk tekstur keras menyerupai batuan. Material kuari merupakan material batuan yang diambil secara khusus dari alam sehingga dalam penggunaannya dikenakan pajak. Pajak yang dikenakan sebesar Rp9.000/ton atau sekitar \$0,64/ton dengan kurs \$1 = Rp14.000. Sebanyak 21% dari total keseluruhan material sipil merupakan material kuari, yaitu 67.582,101 ton. Oleh karena itu, total pajak material kuari adalah \$43.445,64, sehingga total biaya yang dikeluarkan untuk penggunaan material sipil adalah \$1.186.777,53.

2. Biaya Alat

Jenis alat yang digunakan pada proses pengerjaan *disposal* adalah *dozer* CAT D8R dengan detail biaya per unit yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Total biaya yang diperlukan untuk mengoperasikan satu unit *dozer* dalam satu jam adalah \$64,02, sehingga total biaya yang diperlukan untuk mengoperasikan satu unit *dozer* dalam satu hari sebesar \$1.536,69/hari. Jumlah

dozer yang digunakan diestimasi sebanyak dua unit dengan total waktu pengerjaan mencapai 12 minggu, sehingga total biaya yang diperlukan adalah \$263.735,97.

Tabel 8. Estimasi Biaya *Dozer* D8R

Aktivitas	Biaya/Jam
Biaya Operasi	\$28,66
Biaya Perbaikan	\$35,36
Total Biaya/jam	\$64,02

Biaya produksi material sipil diestimasi sebesar \$1.186.777,53 dan biaya penggunaan alat \$263.735,97, sehingga total biaya untuk pengerjaan *disposal* PET 97 DP adalah \$1.450.513,50.

3. Kesimpulan

Disposal PET 97 DP termasuk jenis *disposal semi-induced flow* dengan tonase sebesar 919.484,363 ton. *Disposal* diperkirakan dapat digunakan hingga 12 minggu dengan target produksi 75.000 ton/minggu. Proses pengerjaan *disposal* membutuhkan material sipil sebesar 321.819,527 ton dan dua unit *dozer* agar target



produksi tercapai. Total biaya yang dibutuhkan dalam pengerjaan *disposal* PET 97 DP diestimasi sebesar \$1.450.513,50.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Vale Indonesia Tbk, serta seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini terutama pada proses pengambilan data.

Referensi

- [1] Z. Lua and M. Cai, "Disposal Methods on Solid Wastes From Mines In Transition From Open-Pit To Underground Mining," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 16, pp. 715 – 721, 2012.
- [2] W. R. Mulyanti, Yuliadi, and Maryanto, "Analisa Teknis dan Ekonomis Strategi Short Distance Disposal West Block (Anoa South) Studi Kasus Oleh Section Short Term Planning, Departemen Mines and Exploration Di Pt. Vale Indonesia, Tbk. Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur Propinsi Sulawesi Selatan," in *Pros. Tek. Pertamb.*, vol. 3, no. 1, 2017.
- [3] C. A. Ozturk, S. Ercelebi, I. E. Onsel, and M. Ozkan, "Open Pit Mine Waste Dump Area Design based on Stability Principles," in *International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2015)*, 2015.
- [4] A. Selyukov, V. Ermolaev, and I. Kostinez, "Efficiency of Low-Profile External Dumping at Open Pit Coal Mining in Kemerovo Region," *Second Int. Innov. Min. Symp.*, vol. 21, no. 01027, 2017.
- [5] D. Fajrin, A. V. Anas, R. Amalia, and A. H., "Perencanaan Disposal Semi Induced Flowdan Finger Flow di PT Vale Indonesia Tbk, KabupatenLuwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan," *J. Penelit. Enj.*, vol. 23, no. 2, pp. 170–176, 2019.
- [6] C. E. Stoenoiu and C. Cristea, "Comparative Analysis for Estimating Production Costs," *MATEC Web Conf.*, vol. 184, no. 04004, pp. 1–6, 2018.
- [7] L. M. Walther and C. J. Skousen, *Managerial and Cost Accounting*. Christopher J. Skousen & Ventus Publishing ApS., 2009.
- [8] N. R. Puti, "Analisis Perilaku Biaya pada Percetakan Total Print Pekanbaru," *Res. Account. J.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [9] Caterpillar, "D8R Track-Type Tractor," Amerika, 2009.
- [10] Komatsu, *Specifications and Application Handbook, Edition 27*. Japan, 2006.
- [11] R. Silalahi, Zaenal., and D. Guntoro, "Evaluasi Produktivitas Alat Angkut untuk Mengoptimalkan Controlling Muatan pada Kegiatan Penambangan Batugamping, di PT Semen Bosowa Maros, Desa Baruga, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan," *Pros. Tek. Pertamb.*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [12] C. Drury, *Management and Cost Accounting 10th Edition*. United Kingdom: Cengage Learning EMEA, 2018.
- [13] I. O. Ajao, A. A. Abdullahi, and I. I. Raji, "Polynomial Regression Model of Making Cost Prediction In Mixed Cost Analysis," *Math. Theory Model.*, vol. 2, no. 2, pp. 14–23, 2012.
- [14] J. Woodroof, T. Ward, and B. Burg, "Should High-Low Go: An Analysis Using the Bootstrap," *Account. Educ. J.*, vol. XV, pp. 1–13, 2003.
- [15] W. Kenton, "High-Low Method Definition." <https://www.investopedia.com/terms/h/high-low-method.asp>.



Kajian Kebutuhan Material pada Konstruksi Lambung Kapal Pinisi

Alamsyah*¹, Muhammad Uswah Pawarah¹, Anggoronadhi Dianiswara²

¹Program Studi Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Kalimantan

Jl. Soekarno-Hatta KM.14, Karang Joang, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur

²Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Kalimantan

Jl. Soekarno-Hatta KM.14, Karang Joang, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur

*Email: alamsyah@lecturer.itk.ac.id

DOI: 10.25042/jpe.052021.09

Abstrak

Bulukumba merupakan daerah di Sulawesi Selatan yang memproduksi kapal kayu dengan bentuk ciri khas tersendiri. Bahan utama yang digunakan dalam pembuatannya adalah kayu. Ketersediaan material kayu merupakan salah satu variabel yang mempengaruhi harga pembuatan kapal, selain hanya bisa didapatkan dari luar daerah, jumlah material kayu relatif terbatas dengan adanya larangan penebangan liar yang sangat merusak hutan Indonesia. Minimnya bahan alternatif sebagai bahan utama pembuatan kapal kayu menuntut para pengrajin untuk cermat dan efisien dalam penggunaan kayu. Oleh karena itu sangat penting dilakukan kajian kebutuhan material kayu dalam pembuatan kapal kayu. Metode statistik digunakan dalam pengambilan sampel data konstruksi kapal dan metode analitis digunakan dengan memanfaatkan rumus *simpson* dalam menghitung bentuk dan volume konstruksi kapal kayu yang tidak beraturan sehingga kebutuhan material secara akurat diketahui. Hasil yang didapatkan semakin besar kapasitas kapal kayu maka kebutuhan material kayu pada lambung kapal semakin meningkat, dengan efisiensi material berbanding lurus dengan besar kapasitas kapal.

Abstract

Study of Material Requirements for Hull Construction of Pinisi Boat. Bulukumba is an area in South Sulawesi that produces wooden boats with its own characteristic shape. The main material used in its manufacture is wood. Availability of wood material is one of the variables that affect the price of shipbuilding, apart from only being obtained from outside the region, the amount of wood material is relatively limited due to the prohibition of illegal logging which is very damaging to Indonesian forests. The lack of alternative materials as the main material for making wooden boats requires craftsmen to be careful and efficient in using wood. Therefore, it is very important to study the need for wood materials in the manufacture of wooden boat. Statistical methods are used in sampling ship construction data and analytical methods are used by utilizing the Simpson's formula in calculating the shape and volume of irregular wooden ship construction so that the material requirements are accurately known. The results obtained that the greater the capacity of the wooden boat, the demand for wood material on the hull increases, with the efficiency of the material being directly proportional to the large capacity of the wooden boat.

Kata Kunci: Kapal kayu, Pinisi, konstruksi lambung

1. Pendahuluan

Indonesia adalah salah satu negara maritim terbesar di dunia yang memiliki banyak warisan budaya maritim. Salah satu warisan maritim yang dimaksud adalah kapal kayu (*phinisi*) [1]. Pinisi adalah kapal tradisional Indonesia yang ditetapkan UNESCO sebagai salah satu warisan budaya Indonesia. Menurut Jinca dalam teknologi dan manajemen industri pelayaran rakyat [2], yang dimaksud kapal kayu adalah kapal yang dibuat dari kayu sebagai bahan utama adalah kayu, serta dilengkapi dengan alat penggerak berupa mesin penggerak (motor) atau alat lainnya seperti layar. Saat ini, pusat

pembuatan Pinisi terletak di Tana Beru dan Bira, Kabupaten Bulukumba, Sulawesi Selatan, serta di Batu Licin, Kalimantan Selatan. Selain sebagai alat angkut barang, Pinisi juga sebagai produk layanan wisata. Eksistensi Kapal Pinisi masih tinggi dan bisa dilihat di Pelabuhan Sunda Kelapa [3].

Kapal pinisi secara tradisional telah dibangun di pantai, di mana material kayu berasal dari hutan Sulawesi (Sulawesi) dan Kalimantan (Kalimantan). Selain itu juga dapat dikenali dari 7 (tujuh) layar, dimana 3 (tiga) buah layar yang diberi nama cocoro pantara ditempatkan di bagian batang, 2 (dua) buah layar yang diberi nama cocoro tangga di bagian tengah kapal dan 2



(dua) buah layar yang diberi nama "terengke" di bagian buritan [4]. Jenis asli Phinisi dikenal sebagai "Palari". Palari menggunakan kayu lengkung untuk batang dan tiang buritan. Ukuran phinisi jenis ini biasanya lebih kecil dari jenis phinisi lainnya. Apalagi seperti kapal tradisional lainnya, Palari hanya mengandalkan angin alami untuk menggerakkan kapal [4]. Namun, ketika mesin diesel sebagai penggerak utama menjadi populer, lambung Phinisi dimodifikasi untuk memiliki tiang yang lebih lurus di batang dan bagian buritan untuk mengakomodasi lebih banyak ruang untuk mesin. Jenis phinisi ini disebut "Lambo" atau "Lamba". Lambo tidak hanya menggunakan layar tetapi juga mesin untuk menggerakkan kapal. Oleh karena itu dikategorikan sebagai "Mesin-Perahu Layar" atau "Kapal Layar Motor (KLM)" [5].

Kapal pinisi tidak luput dari pengembangan teknologi, salah satunya penerapan lunas tambahan pada sisi lambung (bilge) sebagai teknologi moderen untuk meredam gerakan roll kapal [6]. Kapal kayu (pinisi) telah mengalami berbagai macam modifikasi yang dilakukan oleh para pengrajin kapal berdasarkan teknik konstruksi yang mereka pahami sejak dahulu [7].

Harga sebuah pinisi bisa mencapai ratusan juta rupiah karena hampir semua bagian kapal yang terbuat dari kayu. Kayu banyak digunakan sebagai material kapal karena merupakan material yang cukup mudah diperoleh, persediaannya banyak, cukup mudah untuk dikerjakan, serta harganya relatif murah dibanding material lainnya seperti bahan baja, besi, dan FRP. Selain itu, pembangunan kapal dengan kayu juga tidak memerlukan teknologi yang tinggi [8]. Jenis-jenis kayu yang banyak digunakan untuk industri perkapalan di Indonesia Balau (*Shorea* spp), Giam (*Cotylelobium* spp), Gofasa (*Vitax cofassus* Reinw), Jati (*Tectona grandis* L.f), dan Kayu hitam (ulin) [9].

Pada dasarnya pemilik kapal menyebutkan *owner requirment* kepada pengrajin dengan menyebutkan ukuran panjang dan lebar ataupun kapasitas muat dari kapal yang akan dipesannya. Dari data tersebut, pengrajin dapat menentukan ukuran utama kapal, kebutuhan bahan baku, biaya produksi, dan waktu pekerjaan. Dimensi yang dimaksud terdiri dari panjang keseluruhan kapal (LOA), lebar kapal (B), tinggi kapal (H) dan bentuk lambung serta bagian lain dari kapal sangat tergantung pada insting dan pengalaman pembuat kapal. Kajian terkait performa lambung

kapal kayu sesuatu hal yang perlu diseriusi mengingat metode pembangunan yang digunakan adalah non konvensional [10].

Khususnya di daerah Sulawesi Selatan terdapat beberapa tempat yang memproduksi kapal kayu dengan tipe yang berbeda-beda dan memiliki ciri khas tertentu. Hingga saat ini banyak dibangun di beberapa daerah misalnya di Tanah Beru Bulukumba. Proses pembangunan kapal tersebut tidak didasari dengan perhitungan dan tanpa menggunakan gambar sebagaimana layaknya suatu perencanaan kapal modern. Mereka mampu membuat kapal yang kokoh dan megah hanya dengan berdasarkan pada pengalaman dan pengetahuan yang diperoleh dari nenek moyang mereka. Dimana pembuatan kapal dimulai dengan peletakan konstruksi lunas, membuat papan kulit (dinding lambung) kemudian diberi rangka (gading).

Dimensi lunas ditentukan oleh besar kapal dan konstruksinya. Untuk kapal kecil, lunas dapat dibuat dari satu bagian saja, sedangkan untuk kapal besar lunas terdiri dari dua bagian yaitu bagian bawah disebut lunas luar dan bagian atas disebut lunas dalam [11]. BKI 1996 menyebutkan bahwa jumlah maksimum potongan kayu balok (n) dari lunas luar/lunas dalam, ditentukan berdasarkan panjang kapal (L). Selain itu bagian dari lunas luar dan lunas dalam yang disambung, paling sedikit panjangnya harus 6 m dan sambungan anatara lunas dengan lunas dibagian belakang kapal harus dihindarkan [12]. Pada pembangunan kapal kayu, konstruksi gading merupakan salah satu konstruksi yang membutuhkan banyak bahan kayu setelah kulit lambung pada kapal kayu pinisi, [13].

Pengrajin hanya mempertimbangkan kelayakan ukuran utama yang dipakai berdasarkan pengalaman kapal yang dibangun sebelumnya. Proses desain pengrajin bersifat imajinatif, artinya rencana atau kepastian bentuk kapal terlihat pada saat pembangunan kapal, tidak ada proses perencanaan bentuk sebelumnya. Alih-alih perhitungan dan analisis teknis, berbagai ritual dilakukan selama proses pembangunan untuk memulai dan merayakan setiap tahap. Beberapa tahapan yang dirayakan seperti penebangan pohon, peletakan lunas, penentuan pusar kapal, peluncuran kapal, dll [14].



Dalam pembuatannya, bahan utama yang digunakan adalah kayu yang merupakan bahan baku yang banyak diperoleh dari luar daerah. Ketersediaan material kayu merupakan salah satu variabel yang mempengaruhi harga pembuatan kapal, selain hanya bisa didapatkan dari luar daerah, jumlah material kayu relatif terbatas dengan adanya larangan penebangan liar yang sangat merusak hutan Indonesia. Minimnya bahan alternatif sebagai bahan utama pembuatan kapal kayu menuntut para pengrajin untuk cermat dan efisien dalam penggunaan kayu. Berdasarkan hal di atas maka dianggap perlu untuk menganalisis jumlah penggunaan material kayu pada pembuatan kapal kayu yang diproduksi di Bulukumba.

2. Metode

Penelitian ini bersifat identifikasi, yaitu mengetahui jumlah material yang digunakan dalam pembangunan kapal kayu yang diproduksi di daerah Tanah Beru, Kecamatan Bontobahari, Kabupaten Bulukumba, Sulawesi selatan. Data kapal kayu yang diamati adalah yang berukuran 50-100 GT.

2.1. Pengambilan Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini yakni data sekunder (tidak langsung) yang diperoleh melalui bahan-bahan tertulis atau informasi lainnya yang erat kaitannya dengan penelitian ini, seperti data mengenai jumlah populasi kapal kayu di wilayah Bulukumba. Selanjutnya digunakan juga data primer (langsung) yang langsung diperoleh dari lapangan, yaitu galangan kapal kayu Tana Beru, Bulukumba. Data yang diperoleh berupa ukuran utama kapal, ukuran konstruksi, jumlah kebutuhan material (kubik kotor), jenis kayu yang dipasang pada tiap element konstruksi dan lain-lain. Teknik pengambilan data diantaranya :

- Menetapkan sampel acak ukuran kapal dari 50-100 GT dengan metode statistik nonparametrik [15]. Sebagai berikut:

$$(n) = \frac{N}{(1+N \times 10\%)} \quad (1)$$

dimana (n) = jumlah sampel, N = populasi, dan Kesalahan Relatif = 10%.

- Observasi, yaitu dengan melakukan pengukuran langsung dan identifikasi terhadap objek kapal kayu yang diteliti.

- Wawancara, yaitu dilakukan melalui proses tanya jawab dengan beberapa orang yakni antara lain pengrajin, awak kapal, dan pemilik kapal serta orang-orang yang ahli dibidang ini.

2.2. Pengolahan Data

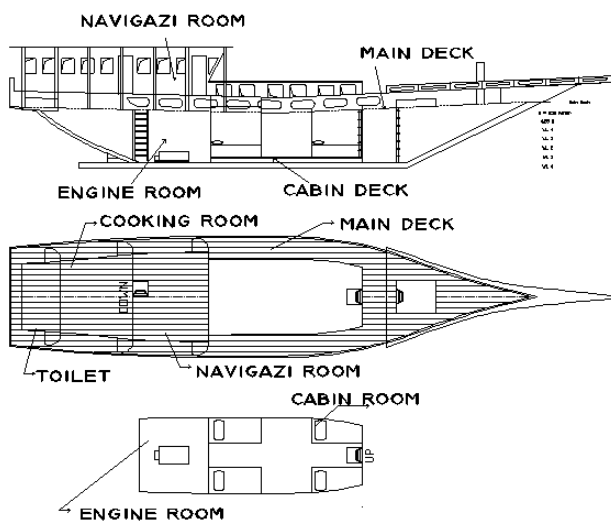
Setelah dilakukan pengambilan sampel acak data kapal dengan menggunakan metode statistik nonparametrik dengan batasan GT 50-100 maka ditetapkan 3 (tiga) sampel acak kapal berukuran 50 GT, 75 GT, dan 100 GT. Selanjutnya dilakukan pengolahan data sebagai berikut :

- Penggambaran *lines Plane* diperlukan untuk melihat dan mengetahui bentuk *longitudinal center plane, body plane* dan *waterline plane* serta mengetahui luasan tiap gading. Untuk penggambarannya diperlukan data ukuran utama kapal dan data *offset* tiap gading (*section*) yang didapatkan melalui pengukuran langsung pada kapal yang dijadikan sampel.
 - Penggambaran konstruksi bagian-bagian kapal yang meliputi lambung yakni *sheel expansion, midship section* dan *profile* yang berguna untuk mengetahui bentuk konstruksi dan selanjutnya menghitung kebutuhan material yang terpasang pada kapal dengan menggunakan *software AutoCAD* serta secara matematis (rumus simpsons) [16].
 - Identifikasi penggunaan material kayu untuk tiap element konstruksi (kubik kotor). Setiap bagian-bagian konstruksi yang belum terpasang pada lambung kapal kayu.
 - Identifikasi penggunaan kayu yang telah terpasang sebagai element konstruksi (kubik bersih). Setiap bagian-bagian konstruksi yang telah terpasang pada lambung kapal kayu.
 - Menentukan jumlah efisiensi penggunaan material dengan menggunakan rumus :
- $$Efisiensi = \frac{Material\ terpasang}{Material\ tersedia} \times 100\% \quad (2)$$
- Membuat diagram keterkaitan antara kapal dan jumlah kebutuhan material serta menarik kesimpulan.



3. Pembahasan

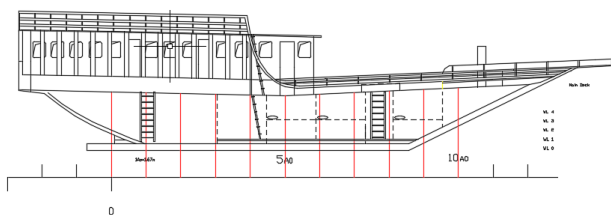
Kapal yang menjadi objek penelitian yakni kapal dengan ukuran 50 GT, 70 GT, dan 100 GT yang ditunjukkan pada Gambar 1.



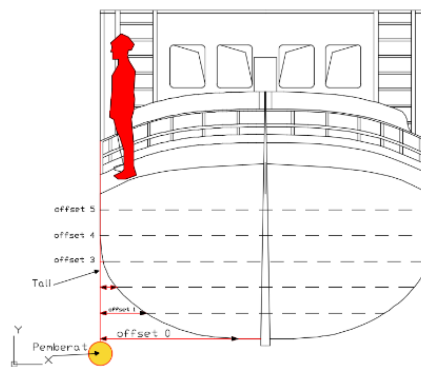
Gambar 1. Rencana umum kapal kayu Pinisi (penumpang/wisata)

Gambar 1 menunjukkan jenis kapal Pinisi yang menjadi objek penelitian. Kapal tersebut memiliki GT 70 dimana untuk GT yang lebih kecil dan lebih besar akan menyesuaikan. Selanjutnya pengukuran kapal dilakukan dengan membagi 10 (sepuluh) ordinat lunas kapal, kemudian menentukan bentuk lambung kapal dengan menggunakan bantuan alat meteran *roll*, namun sebelum pengukuran dilakukan yang harus diperhatikan adalah posisi kapal pada landasan pembangunan harus berada posisi yang tegak lurus dan seimbang, hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan alat *water pass* dan mistar siku. Prosedur tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Setelah menyelesaikan pengukuran kapal dengan titik ukuran tertentu dari tiap ordinat kapal, maka penulis menggambar ordinat tersebut dalam bentuk penampang melintang kapal sesuai dengan hasil pengukuran yang ada. Kemudian menggambar *body plane*.

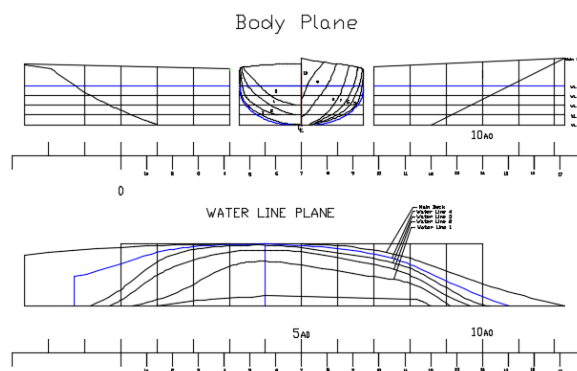


Gambar 2. Pembagian 10 (sepuluh) ordinat lunas kapal



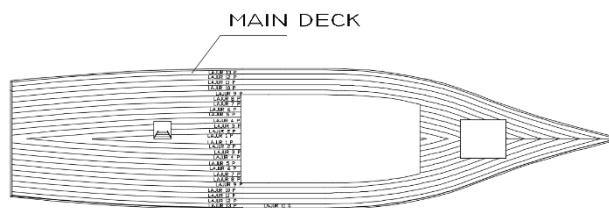
Gambar 3. Mengukur data *offset* kapal untuk setiap ordinat

Untuk selanjutnya dari penampang-penampang tersebut diproyeksikan untuk menggambar *waterline plan*.

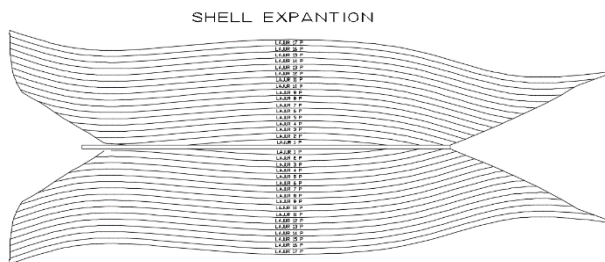


Gambar 4. *Body plan* dan *waterline plan* kapal

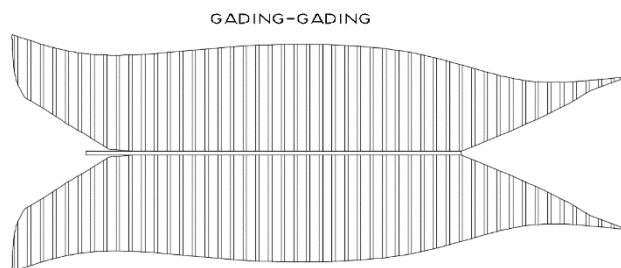
Gambar 4 menunjukkan pembuatan *lines plan* berbekal data *offset* tampak melintang kapal yang telah diidentifikasi sebelumnya. Untuk memudahkan proses perhitungan jumlah material data *lines plan* tersebut selanjutnya digunakan untuk membuat gambar profil konstruksi secara mendetail sesuai ukuran yang ada dilapangan seperti sketsa lunas, linggi haluan & buritan, papan *main deck*, *shell expansion* (papan kulit), gading-gading, balok geladak melintang, balok geladak memanjang, balok mati/skeg, galar/senta, sekat kamar mesin dan sekat haluan.



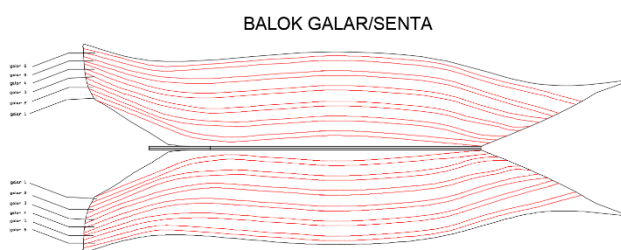
Gambar 5. Papan *main deck*



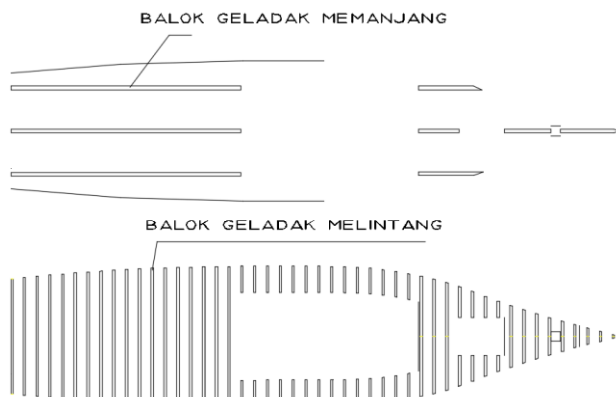
Gambar 6. Papan kulit kapal



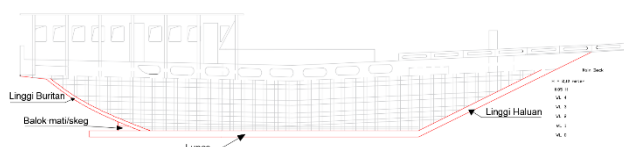
Gambar 7. Kayu/balok gading-gading



Gambar 8. Papan/balok galar (senta)



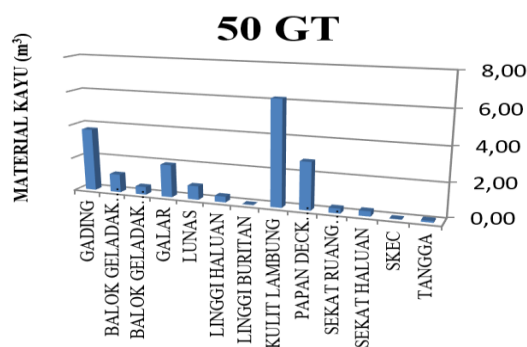
Gambar 9. Balok geladak



Gambar 10. Balok lunsas, linggi, dan balok mati/skeg

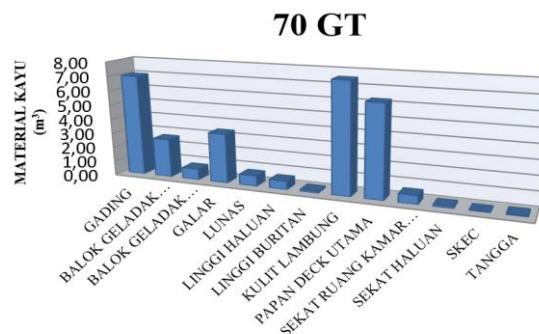
Setelah melakukan proses sketsa bagian-bagian konstruksi lambung kapal pinisi sesuai ukuran yang ada di lapangan maka dilakukan analisis kebutuhan material kayu yang terpasang/terpakai (kubik bersih) sebagai

konstruksi dan bahan baku kayu yang berbentuk gelondongan (kubik kotor).

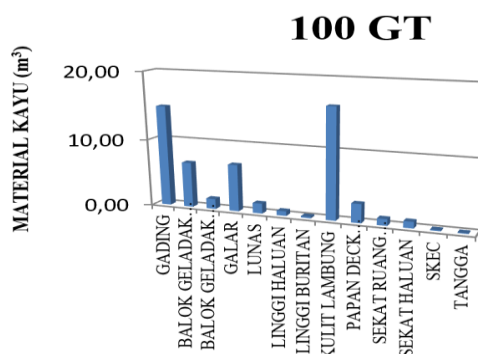


Gambar 11. Kebutuhan material kapal 50 GT

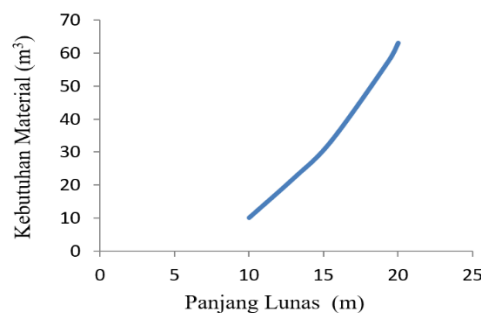
Proses perhitungan menggunakan *Autocad* dan rumus simpson dalam menghitung luas dan volume bentuk konstruksi kapal yang tidak beraturan. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 12. Kebutuhan material kapal 70 GT



Gambar 13. Kebutuhan material kapal 100 GT



Gambar 14. Kebutuhan material kapal berdasarkan panjang lunsas



Tabel 1. Kebutuhan material kayu untuk masing-masing konstruksi kapal Pinisi

Konstruksi Lunas						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	13	0.14	0.25	0.65	0.725	98
70 GT	15.5	0.16	0.30	0.725	0.813	93.13
100GT	19.37	0.20	0.38	1.49	1.50	93.34
Konstruksi Linggi Haluan						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	7.61	0.12	0.24	0.347	0.429	80.85
70 GT	9.09	0.14	0.27	0.583	0.676	86.32
100GT	12	0.18	0.35	0.69	0.73	94.83
Konstruksi Linggi Buritan						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	4.24	0.14	0.13	0.357	0.420	85
70 GT	6.33	0.16	0.15	0.578	0.632	90
100GT	6.44	0.20	0.20	0.22	0.25	86.18
Konstruksi papan kulit						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	469	0.22	0.06	6.198	7.603	98
70 GT	571	0.22	0.06	7.549	9.029	93.13
100GT	1230	0.22	0.06	16.24	18.53	93.34
Konstruksi Gading-gading						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	203.20	0.13	0.12	3.17	3.75	99.11
70 GT	447.75	0.13	0.12	6.985	7.039	99.24
100GT	955.76	0.13	0.12	14.91	15.27	97.65
Konstruksi Galar/senta						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	214.4	0.05	0.18	1.93	2.95	74.74
70 GT	271.4	0.06	0.21	3.42	4.14	82.34
100GT	552.38	0.08	0.27	6.96	7.52	92.53
Konstruksi balok geladak melintang						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	104.8	0.08	0.13	1.09	1.63	66.78
70 GT	255.76	0.08	0.13	2.66	4.44	60.60
100GT	645.19	0.08	0.13	6.71	8.19	81.95
Konstruksi balok geladak memanjang						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	32.65	0.12	0.12	0.469	0.504	93.14
70 GT	45.02	0.13	0.13	0.761	0.98	77.70
100GT	67.11	0.15	0.15	1.51	1.62	93.51



Konstruksi papan geladak						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	318.18	0.22	0.04	2.80	3.23	86.73
70 GT	713.63	0.22	0.04	6.28	7.28	86.24
100GT	935.22	0.22	0.04	8.23	8.8	93.52
Konstruksi Sekat kamar mesin						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	4.68	1.98	0.04	0.37	0.45	82.22
70 GT	5.58	2.36	0.04	0.52	0.6	86.67
100GT	7.31	2.80	0.04	0.81	0.85	95.25
Konstruksi sekat ceruk haluan						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	2.15	2.89	0.04	0.24	0.33	72
70 GT	2.56	3.45	0.04	0.35	0.4	87.5
100GT	3.05	4.11	0.04	0.5	0.55	90
Konstruksi tangga						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	9	0.22	0.05	0.10	0.11	90
70 GT	10	0.22	0.05	0.11	0.12	91
100GT	13	0.22	0.05	0.14	0.145	96
Konstruksi balok mati/skeg						
ID kapal	Panjang (m)	Lebar (m)	Tebal (m)	Terpasang (kubik bersih) m ³	Terpasang (kubik kotor) m ³	Efisiensi (%)
50 GT	0.48	0.14	0.25	0.0168	0.0169	99
70 GT	0.62	0.16	0.30	0.03	0.04	87.5
100GT	1.71	0.20	0.38	0.13	0.15	87.5

Tabel 1 menunjukkan kebutuhan material dan efisiensi penggunaan material kayu pada setiap bagian konstruksi pada lambung kapal kayu. Selain itu diberikan informasi tentang kebutuhan material kapal kayu dengan panjang lunas 13 meter, 15,5 meter dan 19,37 meter atau 50 GT ~ 100 GT. Selanjtnya dituangkan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 11, 12, 13, dan 14.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan untuk mengetahui kubik bersih dan kubik kotor beserta efisiensi penggunaan material pada lambung kapal kayu tipe penumpang 50 - 100 GT, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil perhitungan volume (kubik bersih) penggunaan material kayu pada lambung kapal (termasuk geladak utama dan konstruksi yang ada di bawahnya) untuk ketiga kapal yang dijadikan sampel yakni 50 GT (panjang lunas 13 meter), 70 GT (panjang lunas 15,5 meter) dan 100 GT (panjang lunas 19,3 meter) dengan tipe kapal yang sama secara berurut diperoleh 22.02 m³, 33.20 m³, dan 57.63 m³. Dengan efisiensi material kayu sebesar 84.27 %, 84.7 % dan 91.20 %.
- Keterkaitan GT kapal kayu dengan kebutuhan material lambung kapal (termasuk geladak utama dan konstruksi yang ada di bawahnya) yakni efisiensi cenderung meningkat pada ukuran GT kapal yang besar dimana nilainya berada di atas 90%.



Referensi

- [1] M. Arif, "Pinisi-Perahu Khas Sulawesi Selatan, Proyek Pembinaan Peninggalan Sejarah Perbakala dan Permuseuman Sulawesi Selatan," 2001.
- [2] M. Y. Jinca, *Transportasi Laut Kapal Layar Motor Pinisi: Teknologi dan Manajemen Industri Pelayaran Rakyat*. Makasar : Lembaga Penerbitan, Universitas Hasanuddin, 2002.
- [3] A. Dianiswara, A.N. Hasmi, L.P. Adnyani, Alamsyah, "Kajian Gerakan Roll Kapal Pinisi Dengan Bilge Keel," *J. Inovtek Polbeng*, vol. 10, no. 2, pp. 152–157, 2020.
- [4] H. Lisbijanto, *Kapal Pinisi*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [5] A. Salam, O. Katsuya "Technological Adaptation in the Transformation of Traditional Boats in the Spermonde Archipelago, South Sulawesi," *Southeast Asian Stud.*, vol. 46, no. 2, pp. 200–227, 2008.
- [6] W. Liu, Y. K. Demirel, E. B. Djatmiko, S. Nugroho, T. Tezdogan, R. E. Kurt, H. Supomo, I. Baihaqi, Z. Yuan, A. Incecik, "Bilge keel design for the traditional fishing boats of Indonesia's East Java," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 380–395, 2019.
- [7] L. Bochary, F. Larengi, "Alternatif Penggunaan Gading Baja Pada Pembangunan Kapal Kayu 30 GT," *J. Ris. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 10, no. 2, pp. 145–155, 2012.
- [8] R.F.B. Purba, "Kajian Tekno-ekonomi Kapal Gillnet Material Kayu di Karangantu, Kabupaten Serang, Propinsi Banten," Institut Pertanian Bogor, 2004.
- [9] Ayuningsari, "Tekno Ekonomi Pembangunan Kapal Kayu Galangan Kapal Rakyat diDesa Gebang, Cirebon, Jawa Barat," Institut Pertanian Bogor, 2007.
- [10] F. Mahmuddin, A. Fitriadhy, and S. Dewa, "Motions Analysis of a Phinisi Ship Hull with New Strip Method," *Int. J. Eng. Sci. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 91–97, 2016.
- [11] A. M. Rauf, A. Chaerunnisa, *Pengembangan Metode Pembuatan Kapal Kayu Tradisional di Kabupaten Bulukumba*. Makassar: Lembaga penelitian Pengembangan Masyarakat Universitas Hasanuddin, 2003.
- [12] Biro Klasifikasi Indonesia, *Peraturan Kapal Kayu*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia, 1996.
- [13] Alamsyah, "Analisis Penggunaan Material Kayu pada Pembangunan Kapal Kayu (GT 50 - 100)," Universitas Hasanuddin, 2012.
- [14] N. Kurniasari, C. Yuliaty, Nurlaili, "Dimensi Religi Dalam Pembuatan Pinisi," *J. Sos. Ekon. Kelaut. dan Perikan.*, vol. 8, no. 1, pp. 75–83, 2013.
- [15] S. Siegel, *Statistik Non Parametrik*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1990.
- [16] N. M. R. R. C. Perbani, Rinaldy, "Penerapan Hitungan Volume Metode Simpson untuk Menghitung Volume Kapal dan Topografi Darat," *J. Rekayasa Hijau*, vol. 2, no. 90–100, 2018.

