

DISERTASI

**STUDI EKSPERIMENTAL MODEL SALURAN TERBUKA
DARI *FIBER GLASS* DAN KARAKTERISTIK
PENGALIRANNYA**

***EXPERIMENTAL STUDY OF OPEN CHANNEL MODEL OF
GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP) AND ITS
FLOWING CHARACTERISTICS***

SURYADARMA HASYIM

D013181001



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

PENGAJUAN DISERTASI

**STUDI EKSPERIMENTAL MODEL SALURAN TERBUKA
DARI *FIBER GLASS* DAN KARAKTERISTIK
PENGALIRANNYA**

Disertasi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Sipil**

Disusun dan Diajukan Oleh:

SURYADARMA HASYIM

D013181001

Kepada

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

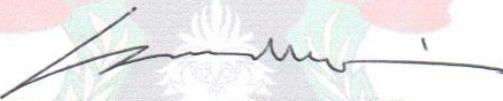
DISERTASI

STUDI EKSPERIMENTAL MODEL SALURAN TERBUKA DARI FIBER GLASS DAN KARAKTERISTIK PENGALIRANNYA

SURYADARMA HASYIM
D013181001

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 28 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor


Prof. Dr. Ir. Nasaruddin Salam, MT.
NIP. 195912201986011001

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng
NIP. 195409101983031003

Co-Promotor



Prof. Dr.Eng. Ir. Farouk Maricar, MT
NIP. 196410201991031002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM, AER
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



Prof. Dr.Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Suryadarma Hasyim
Nomor Mahasiswa : D013181001
Program Studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, November 2023
Yang menyatakan



Suryadarma Hasyim

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke khadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat hidayah, kasih dan sayang-Nya yang telah dilimpahkan kepada kami sehingga laporan disertasi berjudul *Studi Eksperimental Model Saluran Terbuka dari Fiber Glass dan Karakteristik Pengalirannya* ini dapat kami selesaikan.

Pada kesempatan yang baik ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Nasaruddin Salam, M.T. (selaku Promotor), Prof. Dr. Ir. Muhammad Saleh Pallu, M. Eng. (selaku Kopromotor I), dan Prof. Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, M.T. (selaku Kopromotor II) yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan dalam pelaksanaan penelitian ini dan juga penyusunan naskah laporan disertasi ini hingga selesai.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan juga kepada Bapak/Ibu Tim Penguji Internal, yaitu:

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.
2. Prof. Dr. Ir. Wihardi Tjaronge, S.T., M. Eng.
3. Dr. Eng. Ir. Rita Tahir Lopa, M.T.
4. Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T., dan
5. Dr. Ir. Yudha Mediawan, M. Dev. Plg. (Kepala Badan Pengembangan Infrastruktur Wilayah Kementerian PUPR) selaku Penguji Eksternal,

Di dalam pelaksanaan penelitian ini juga banyak pihak lainnya yang telah memberikan bantuan kepada penulis, dan untuk itu pada kesempatan ini juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak M. Basuki Hadimuljono, selaku Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Bapak Ir. Mohammad Zainal Fatah selaku Sekretaris Jenderal Kementerian PUPR; Bapak Ir. T. Iskandar, M.T. selaku Inspektur Jenderal Kementerian PUPR; Bapak Ir. Bob Arthur Lombogia, M.Si. selaku Direktur Jenderal Sumber Daya Air Kementerian PUPR; dan Bapak Endra S. Atmawidjaja, S.T., M. Sc., DEA selaku Staf Ahli V Menteri PUPR Bidang Teknologi, Industri, dan Lingkungan.
2. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa selaku Rektor Universitas Hasanuddin;
3. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik; dan Dr. Amil Ahmad Ilham, S.T., M.IT., selaku Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kemahasiswaan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin;
4. Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S3 Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin;
5. Seluruh Dosen Program Studi S3 Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, antara lain Dr. Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta, ST, MT.
6. Staf akademik di lingkungan Departemen Teknik Sipil, FT Unhas, antara lain: Ibu Diana, Pak Achmad Muntazar, Ibu Herlina, Ibu Desiria L. Silang, Ibu Osriani Mappa, Pak Muhammad Asrul, dan Ibu A. Gustiara di bagian Sekretariat Prodi S3 Teknik Sipil; dan Pak Ahmad di Laboratorium Hidrolika

Departemen Teknik Sipil – FT Universitas Hasanuddin; serta Pak M. Fachrun Juniansyah di bagian akademik Fakultas Teknik Unhas, yang telah banyak membantu dalam penanganan administrasi perkuliahan dan penelitian S3 selama ini;

7. Seluruh rekan-rekan mahasiswa Program Studi S3 Ilmu Teknik Sipil Angkatan 2018, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin; antara lain Pak Imam Rohani, Pak Amrullah, Pak Mahyuddin, Pak Ari Kusuma, Ibu Savitri Prasandi Mullyani, Ibu Ira Widyastuti, Pak Parea Rusan Rangan, Ibu Andi Marini Indriani, Pak Syamsul Bahri Ahmad, Ibu Farida Gafar, Pak Mahmuddin, Pak Fauzan Hamdi, Ibu Waryati, Ibu Asnita Virlayani, dan Ibu Zulvyah, serta Pak Erwin Affandy (S3 Teknik Sipil Angkatan 2019);
8. Rekan-rekan kerja di Balai Teknik Rawa Banjarmasin dan Balai Teknik Irigasi Bekasi, antara lain: Pak Riza Pahlevi, Pak Arif Dhiaksa, Ibu Chandra Karina, Pak Yudi Lasmana, Pak Maruddin F. Marpaung, dan Pak Haryo Istianto;
9. Rekan-rekan kerja di Balai Wilayah Sungai Kalimantan V Tanjung Selor, antara lain: Pak Bambang Pramudjo, Pak Jasmaniansyah, Pak Muhammad Taufiq, Ibu Rosmala Dewi, dan Suyudi Akbari Habibi;
10. Rekan-rekan kerja di Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang Makassar, antara lain: Pak Mat Nasir, Ibu Rahayu, Ibu Hj. Nurlaela, Pak Gunawan Suntoro, Pak Nalvian, Pak Sofyan Muhammad, Pak Andi Faisal Fahrial, Ibu Sahirah Hr, Pak IGNC Andi Baskara, Ibu Kalmah, Ibu Andi Neni Burhanuddin, Intan Madya Ratna, Aulya Imaniar, Candra Lalena, dan Rustan Beddu;
11. dan semua pihak lainnya yang namanya tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Ucapan terima kasih yang mendalam kami haturkan kepada kedua orang tua kami tercinta atas pengorbanan, motivasi, dan doa yang diberikan kepada kami selama ini. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri tercinta Amrini, S.E. dan kedua anak kami tercinta Muhammad Ghifari Alamlah dan Muhammad Habibie Alamlah serta seluruh keluarga besar Ayahanda (Alm.) A. Hasyim Alamlah atas doa dan dukungan yang tak ternilai kepada kami selama ini.

Akhir kata penulis berharap semoga apa yang terkandung dalam laporan tesis ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Gowa, November 2023

Suryadarma Hasyim

ABSTRAK

Suryadarma Hasyim. *Studi Eksperimental Model Saluran Terbuka dari Fiber Glass dan Karakteristik Pengalirannya* (dibimbing oleh Nasaruddin Salam, Muhammad Saleh Pallu dan Farouk Maricar).

Salah satu upaya untuk mengurangi kehilangan air (*water losses*) di saluran irigasi adalah dengan memberi pasangan (*lining*) pada saluran irigasi tanah. Pembuatan pasangan tersebut memerlukan bahan baku seperti pasir, kerikil, dan batu belah yang ditambang dari alam dan di Indonesia dikenal sebagai kelompok material galian Golongan C. Eksploitasi material galian Golongan C secara berlebihan akan memberi dampak pada kerusakan lingkungan. Sebagai upaya mengatasi permasalahan tersebut perlu dicari alternatif penggunaan material pasangan lainnya yaitu antara lain dengan menggunakan material *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* dimana di Indonesia material *GFRP* tersebut umumnya dikenal dengan sebutan material *Fiber Glass*. Tujuan pokok dari penelitian ini adalah mencari nilai koefisien kekasaran Manning pada saluran pasangan berbahan material *GFRP*. Selain itu juga dilakukan kajian terkait dengan karakteristik material *GFRP* yang dihasilkan dari proses manufaktur salah satu pabrik di Indonesia serta kajian terkait karakteristik aliran air yang terjadi pada saluran pasangan berbahan material *GFRP* tersebut.

Pelaksanaan pengujian fisik untuk mengetahui karakteristik produk material *GFRP* dilakukan dengan menggunakan bantuan mikroskop laser. Pelaksanaan uji aliran air dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan perangkat model saluran terbuka (flum) yang dilapisi dengan material *GFRP*. Uji aliran dilakukan dengan menggunakan tiga variasi debit aliran pompa air dan sembilan variasi kemiringan dasar saluran. Hasil uji aliran air secara eksperimental selanjutnya disandingkan dengan hasil simulasi model matematik dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS. Evaluasi dan kinerja model dilakukan dengan menggunakan teknik grafis dan statistik kuantitatif yaitu dengan metode Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE).

Hasil pengujian karakteristik material *GFRP* menunjukkan bahwa produk material *GFRP* yang dibuat sudah baik dan seragam dengan nilai rata-rata koefisien kekasaran permukaan $R_a = 5,54 \mu\text{m}$. Hasil evaluasi model hidrolis dengan metode NSE menunjukkan bahwa kinerja model sudah “sangat baik”. Hasil pengujian hidrolis menunjukkan bahwa hampir seluruh karakteristik aliran yang terjadi adalah berupa kombinasi antara aliran super-kritis dan aliran turbulen. Nilai koefisien kekasaran Manning n untuk material *GFRP* yang diperoleh dari hasil penelitian ini ada pada kisaran 0,0071 hingga 0,0102. Untuk aplikasi praktis dalam perencanaan saluran irigasi di Indonesia maka direkomendasikan untuk menggunakan nilai koefisien kekasaran Manning sebesar 0,0081.

Kata kunci: *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, model eksperimental saluran terbuka (flum), koefisien kekasaran permukaan material, koefisien kekasaran Manning, metode Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE).

ABSTRACT

Suryadarma Hasyim. *Experimental Study of Open Channel Model of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) and Its Flowing Characteristics* (supervised by Nasaruddin Salam, Muhammad Saleh Pallu and Farouk Maricar).

One of the efforts to reduce water losses in irrigation channels is to provide a lining in the earth's irrigation channels. Manufacturing these linings requires raw materials such as sand, gravel, and crushed stone, which are mined from nature and, in Indonesia, are known as Class C excavated materials. Excessive exploitation of Class C excavated materials will impact environmental damage. To overcome these problems, therefore, research is needed to find alternative lined materials, and in this research, the alternative lined material is Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) where in Indonesia the GFRP material is generally known as Fiber Glass material. The main objective of this research is to find the value of the Manning roughness coefficient on the lined channel made of GFRP material. In addition, this research was also carried out to study the characteristics of the GFRP material produced from the manufacturing process of a factory in Indonesia and studies related to the characteristics of the water flow that occurs in lined channels made of the GFRP material.

Physical testing to determine the characteristics of GFRP material products was carried out using a laser microscope. The water flow test experimentally used an open channel model (flum) lined with GFRP material. The flow test was carried out using three variations of water pump flow discharge and nine variations of the channel bottom slope. The experimental water flow test results were then compared with the results of a mathematical model simulation using the HEC-RAS software. Model evaluation and performance were performed using graphical techniques and quantitative statistics, namely the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) method.

The GFRP material characteristic test results show that the GFRP material products were good and uniform with an average surface roughness coefficient of $R_a = 5.54 \mu\text{m}$. The evaluation of the hydraulic model using the NSE method shows the model performance is "very good". The results of the hydraulic tests show that almost all flow characteristics are a combination of super-critical and turbulent flow. The Manning roughness coefficient n value for the GFRP material obtained from the results of this study is in the range of 0.0071 to 0.0102. For practical application in irrigation channel design in Indonesia, it is recommended to use the Manning roughness coefficient value of 0.0081.

Keywords: *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, open channel (flum) experimental model, material surface roughness coefficient, Manning roughness coefficient, Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) method.

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGAJUAN DISERTASI	ii
LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxvi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xxvii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
1. Peningkatan ketersediaan air irigasi	1
2. Kriteria penggunaan pasangan (<i>lining</i>) pada saluran irigasi di Indonesia	2
3. Dampak dan kendala penggunaan material galian Golongan C sebagai material pasangan di saluran irigasi	3
4. Alternatif penggunaan material berbahan polimer sebagai pasangan di saluran irigasi	6
a. Penggunaan material berbahan polimer di Amerika Serikat	6
b. Penggunaan material berbahan polimer di Portugal	8
5. Alternatif penggunaan material <i>GFRP</i> (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>) sebagai material pasangan di saluran irigasi	10

6. Kriteria perencanaan untuk saluran irigasi di Indonesia	11
7. Kajian studi eksperimental model saluran terbuka dari material pasangan <i>GFRP</i>	13
B. Rumusan Masalah	17
C. Tujuan Penelitian	18
D. Kegunaan Penelitian	19
E. Ruang Lingkup / Batasan Penelitian	19
F. Definisi dan Istilah	20
G. Sistematika Laporan / Pembahasan	26
II. TINJAUAN PUSTAKA	28
A. Kajian Kriteria Perencanaan Irigasi di Indonesia	28
B. Kajian Perencanaan Hidrolis untuk Saluran Irigasi di Indonesia	29
C. Kajian Penggunaan Pasangan (<i>Lining</i>) pada Saluran Irigasi di Indonesia	30
1. Penggunaan pasangan pada saluran irigasi di jaringan utama	30
2. Penggunaan pasangan pada saluran irigasi tersier	30
3. Uji coba penerapan teknologi kampas beton	32
D. Kajian Klasifikasi dan Karakteristik Aliran Air	35
1. Definisi dan sifat fluida	35
2. Klasifikasi aliran air di dalam saluran (<i>conduit</i>)	35
3. Beberapa klasifikasi aliran air di saluran terbuka	36
a. <i>Steady dan unsteady flow</i> : waktu sebagai kriteria	36
b. <i>Uniform flow dan varied flow</i> : ruang sebagai kriteria	36
c. <i>Steady uniform flow</i>	36
4. Karakteristik aliran air di saluran terbuka	36
a. Karakteristik aliran sebagai efek viskositas	37
b. Karakteristik aliran sebagai efek gravitasi	38
5. Rezim aliran air di saluran terbuka	39
E. Kajian Formula Aliran Seragam dan Koefisien Kekasaran Hidrolis Saluran	40

1. Formula umum aliran seragam	40
2. Formula Chezy	40
3. Formula Manning	41
4. Koefisien kekasaran hidrolis saluran	41
a. Rumus empiris	41
b. Data empiris	42
c. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai koefisien ke- kasaran hidrolis saluran	43
F. Kajian Kekasaran Permukaan Material	44
1. Tekstur dan kekasaran permukaan material	44
2. Analisis mikrometrologi	45
3. Alat ukur mikrometrologi permukaan	46
G. Kajian Pembuatan Material <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>	47
1. Material komposit dan material komposit tingkat lanjut	47
2. Senyawa penyusun material <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>	48
3. Klasifikasi dan jenis serat kaca pada material <i>GFRP</i>	49
4. Proses manufaktur material <i>GFRP</i>	50
5. Reviu hasil kajian pembuatan material <i>GFRP</i>	51
H. Kajian Penggunaan Material <i>GFRP</i> Sebagai Pasangan di Saluran Irigasi	52
1. Uji penggunaan material <i>GFRP</i> pada pembuatan saluran irigasi tersier di Malaysia	52
2. Penggunaan material <i>GFRP</i> untuk perbaikan saluran irigasi pasangan yang rusak di Jepang	52
I. Kajian Pembuatan dan Penggunaan Material <i>GFRP</i> pada Bangunan Hidrolik di Indonesia	53
1. Penggunaan material <i>GFRP</i> pada bangunan air di Provinsi Sumatera Selatan	53
2. Penggunaan material <i>GFRP</i> pada bangunan air di Provinsi Kalimantan Tengah	55
J. Optimasi Penggunaan Material <i>GFRP</i> pada Sistem Jaringan Irigasi di Indonesia	56

1. Sistem jaringan dan saluran pembawa air irigasi di Indonesia	56
2. Pendanaan pengembangan dan pengelolaan sistem irigasi di Indonesia	57
3. Optimasi penggunaan material <i>GFRP</i> pada sistem saluran irigasi di Indonesia	58
a. Aspek pembiayaan untuk pembangunan/peningkatan saluran irigasi	59
b. Aspek pemeliharaan dan rehabilitasi saluran irigasi	59
K. Kajian Publikasi Ilmiah untuk Nilai Koefisien Kekasaran Hidrolis untuk Material <i>GFRP</i>	60
1. Produk perpipaan komersial berbahan material <i>GFRP</i>	60
a. <i>Grandpipe</i> TM	61
b. <i>Jiubo Composite</i> TM	61
2. Hasil penelitian <i>Flexible FRP liner</i> di Jepang	62
a. Aspek publikasi ilmiah	62
b. Aspek penggunaan dan teknis	63
3. Keterbaruan (<i>novelty</i>) dari penelitian	64
L. Kajian Pemodelan Hidrolik	65
1. Pengertian model secara umum	65
2. Pemodelan hidrolik	66
3. Pemodelan fisik	67
4. Pemodelan matematik	68
a. Konsep pembuatan model matematik	68
b. Model matematik terapan: <i>software</i> HEC-RAS	70
c. Data masukan dalam simulasi aliran 1-D dengan <i>software</i> HEC-RAS	73
5. Evaluasi dan penilaian kinerja model hidrolik	74
a. Verifikasi, validasi, dan kalibrasi model	74
b. Metode evaluasi model	75
c. Penilaian kinerja model	76
M. Kajian Metode untuk Mendapatkan Nilai Koefisien Kekasaran Manning secara Eksperimental di Laboratorium	77

1. Kajian metode untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning untuk material <i>PVC</i> secara eksperimental oleh Mera, M. dan Robi, R. (2013)	79
a. Bahan dan alat	79
b. Perhitungan hidrolis untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning	80
c. Kondisi aliran kritis (<i>critical state</i>)	81
d. Teknik pengumpulan data dan perhitungan nilai koefisien kekasaran Manning	82
e. Analisis data untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning	84
f. Analisis secara keseluruhan dan kesimpulan	85
2. Alternatif perhitungan debit dengan menggunakan <i>current meter</i>	86
N. Hipotesis	86
III. METODE PENELITIAN	88
A. Rancangan Penelitian	88
1. Tahap persiapan	88
2. Rancangan pengujian karakteristik material <i>GFRP</i>	89
3. Rancangan pengujian model hidrolis	89
4. Bagan alir penelitian	91
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	93
C. Bahan dan Alat	94
1. Bahan	94
2. Alat	94
a. Perangkat model saluran terbuka (flum)	94
b. Pompa air, jaringan pipa, dan tangki reservoir	95
c. Alat pengukur kecepatan aliran air	97
d. Timbangan air	99
e. Alat pengukur kedalaman aliran air	99
f. Alat pengatur kemiringan dasar flum	99
g. Mikroskop laser	102
D. Teknik Pengumpulan Data	103

1. Tahap persiapan	103
a. Data dimensi flum	103
b. Data variasi debit pompa	104
c. Data variasi debit aliran masuk ke dalam flum	105
d. Data variasi kemiringan dasar flum	105
d. Penentuan titik pias untuk pengambilan data aliran air	106
2. Tahap pengumpulan data	107
a. Data karakteristik material <i>GFRP</i>	107
b. Data kecepatan aliran air di dalam flum	107
c. Data kedalaman aliran air di dalam flum	108
d. Data masukan untuk simulasi model matematik	109
E. Metode Pengolahan dan Analisis Data	110
1. Data karakteristik material <i>GFRP</i>	110
2. Data lokasi pias terbaik untuk seleksi data parameter aliran air	110
3. Data parameter aliran air	111
4. Data untuk simulasi dan analisis model matematik	112
5. Data untuk evaluasi dan analisis kinerja model hidrolik	114
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	116
A. Rancangan Segmen Material <i>GFRP</i>	116
B. Pengujian Karakteristik Material <i>GFRP</i>	119
C. Uji Model Hidrolik	124
1. Pendahuluan	124
2. Validasi debit aliran masuk ke dalam flum <i>GFRP</i> dengan metode volumetrik	124
3. Perhitungan nilai variasi kemiringan dasar flum	124
4. Hasil pengumpulan data parameter aliran air	125
5. Hasil pengolahan dan seleksi data parameter aliran air	129
6. Hasil pengujian hidrolik secara eksperimental	132
7. Hasil pengujian hidrolik dengan model matematik	140
a. Data masukan (<i>input</i>) pada <i>software</i> HEC-RAS	140

b. Eksekusi program HEC-RAS dan data keluaran (<i>output</i>) hasil simulasi pemodelan	144
8. Perbandingan pengujian model fisik (secara eksperimental) dengan model matematik	151
a. Evaluasi awal model hidrolik.	152
1) Evaluasi awal model hidrolik dengan menggunakan teknik grafis	152
2) Evaluasi awal model hidrolik dengan menggunakan metode statistik kuantitatif	155
3) Reviu hasil evaluasi awal model hidrolik.	156
b. Kalibrasi model matematik.	157
c. Evaluasi lanjutan model hidrolik	161
1) Evaluasi lanjutan model hidrolik dengan menggunakan teknik grafis	161
2) Evaluasi lanjutan model hidrolik dengan menggunakan metode statistik kuantitatif	163
D. Analisis Data Parameter dan Karakteristik Aliran Air	165
1. Analisis data kedalaman aliran air	166
2. Analisis data kecepatan aliran air	166
3. Analisis karakteristik aliran air	167
E. Analisis Data Nilai Koefisien Kekasaran Manning	167
V. PENUTUP	170
A. Kesimpulan	170
B. Saran	174
DAFTAR PUSTAKA	176
LAMPIRAN	181

DAFTAR TABEL

Nomor		halaman
1.	Jenis pasangan dan unsur material dalam senyawa campuran pasangan	3
2.	Koefisien kekasaran hidrolis untuk berbagai tipe saluran pasangan di Indonesia	12
3.	Contoh beberapa data empiris untuk penggunaan nilai koefisien kekasaran n Manning	42
4.	Klasifikasi serat kaca dan sifat-sifat fisiknya	50
5.	Penilaian kinerja model dengan metode NSE	77
6.	Hasil pengukuran kedalaman air y di talang PVC , volume air V di ember, dan waktu yang dibutuhkan Δt untuk menghitung besarnya debit aliran Q	82
7.	Prediksi nilai koefisien kekasaran Manning n ($b = 12$ cm) untuk material PVC	84
8.	Hipotesis perbandingan nilai koefisien kekasaran Manning n dan nilai koefisien kekasaran Strickler k untuk kajian tiga tipe penggunaan material pasangan di saluran irigasi di Indonesia	87
9.	Tahapan dan waktu penelitian	93
10.	Perhitungan dan pembagian ruas pias pada penampang flum $GFRP$	106
11.	Rangkuman dan pengolahan data hasil pengujian untuk nilai koefisien kekasaran permukaan (R_a) untuk ketiga sampel material $GFRP$	122
12.	Hasil perhitungan dan validasi debit aliran yang masuk (Q_f) ke dalam flum $GFRP$	125
13.	Perhitungan nilai variasi kemiringan dasar flum $GFRP$	125

14.	Hasil pengumpulan data kedalaman aliran (h_g) untuk debit aliran rendah (Q_{f1}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	126
15.	Hasil pengumpulan data kedalaman aliran (h_g) untuk debit aliran sedang (Q_{f2}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	126
16.	Hasil pengumpulan data kedalaman aliran (h_g) untuk debit aliran tinggi (Q_{f3}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	127
17.	Hasil pengumpulan data kecepatan aliran (v_g) untuk debit aliran rendah (Q_{f1}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	127
18.	Hasil pengumpulan data kecepatan aliran (v_g) untuk debit aliran sedang (Q_{f2}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S)	128
19.	Hasil pengumpulan data kecepatan aliran (v_g) untuk debit aliran tinggi (Q_{f3}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S)	128
20.	Hasil pengukuran dan perhitungan parameter aliran air pada model fisik untuk kondisi debit aliran rendah ($Q_{f1}=7.830 \text{ cm}^3/\text{s}$)	134
21.	Hasil pengukuran dan perhitungan parameter aliran air pada model fisik untuk kondisi debit aliran sedang ($Q_{f2}= 11.600 \text{ cm}^3/\text{s}$)	135
22.	Hasil pengukuran dan perhitungan parameter aliran air pada model fisik untuk kondisi debit aliran tinggi ($Q_{f3}=14.880 \text{ cm}^3/\text{s}$)	136
23.	Hasil perhitungan untuk simulasi awal model matematik (HEC-RAS) untuk parameter aliran air pada kondisi debit aliran rendah ($Q_{f1}=7.830 \text{ cm}^3/\text{s}$)	148
24.	Hasil perhitungan untuk simulasi awal model matematik (HEC-RAS) untuk parameter aliran air pada kondisi debit aliran sedang ($Q_{f2}= 11.600 \text{ cm}^3/\text{s}$)	149
25.	Hasil perhitungan untuk simulasi awal model matematik (HEC-RAS) untuk parameter aliran air pada kondisi debit aliran tinggi ($Q_{f3}=14.880 \text{ cm}^3/\text{s}$)	150

26.	Perhitungan indeks kinerja <i>NSE</i> untuk kedalaman aliran (<i>h</i>) pada kondisi debit aliran rendah (Q_{f1})	155
27.	Rekapitulasi hasil penilaian statistik kuantitatif dengan metode <i>NSE</i> antara data hasil observasi dan data hasil simulasi awal model matematik	156
28.	Hasil perhitungan untuk simulasi lanjutan model matematik (HEC-RAS) untuk parameter aliran air pada kondisi debit aliran rendah ($Q_{f1}=7.830 \text{ cm}^3/\text{s}$)	159
29.	Hasil perhitungan dari simulasi lanjutan model matematik (HEC-RAS) untuk parameter aliran air pada kondisi debit aliran sedang ($Q_{f2}=11.600 \text{ cm}^3/\text{s}$)	160
30.	Perhitungan indeks kinerja <i>NSE</i> untuk kedalaman aliran (<i>h</i>) pada kondisi debit aliran rendah (Q_{f1}) setelah dilakukan proses kalibrasi	164
31.	Rekapitulasi hasil penilaian statistik kuantitatif dengan metode <i>NSE</i> antara data hasil observasi dengan data hasil simulasi lanjutan model matematik setelah dilakukan proses kalibrasi	165
32.	Perbandingan nilai koefisien kekasaran hidrolis antara tipe pasangan batu dan beton dengan tipe pasangan <i>GFRP</i>	169

DAFTAR GAMBAR

Nomor		halaman
1.	Contoh penggunaan pasangan (<i>lining</i>) di saluran irigasi dengan menggunakan pasangan kombinasi berupa beton cor di tempat (<i>cast in situ</i> , pada dasar saluran) dan pasangan batu (pada dinding saluran)	4
2.	Contoh penggunaan pasangan (<i>lining</i>) pada saluran irigasi dengan menggunakan pasangan beton cor ditempat (<i>cast in situ</i> , pada dasar saluran) dan beton pracetak (<i>precast</i> , pada dinding saluran)	4
3.	Kondisi pasangan material geomembran tipe <i>HDPE</i> pada Saluran Arnold, ruas pengujian A-3	8
4.	Pemasangan membran bitumen di atas lapisan aspal primer dan penggunaan <i>blowtorch</i> untuk merekatkan bidang antar sambungan	9
5.	Pemasangan membran sintesis jenis <i>PVC</i> secara longitudinal di atas saluran beton lama (kiri), dan perekatan bidang antar sambungan dengan menggunakan alat pemanas khusus bernama <i>heat gun</i> (kanan)	10
6.	Potongan melintang saluran irigasi yang terbuat dari material <i>FRP</i> (<i>Fiberglass Reinforced Polyester</i>) dan kayu keras (<i>hard wood</i>)	11
7.	Rancangan awal dan metode instalasi material <i>GFRP</i> ke dalam flum	14
8.	Parameter hidrolis pada potongan melintang saluran trapesium	29
9.	Pengambilan sampel tanah dan penggunaan pasangan (<i>lining</i>) di saluran irigasi tersier dengan menggunakan pasangan beton pracetak (pada dasar dan dinding saluran)	31

10.	Foto dokumentasi contoh kondisi trase saluran tersier yang melewati kawasan permukiman dan penggunaan pasangan (<i>lining</i>) di saluran irigasi tersier dengan menggunakan pasangan beton pracetak (pada dasar dan dinding saluran)	32
11.	Penggunaan teknologi kanvas beton tipe CC Hydro™ sebagai pasangan (<i>lining</i>) di dinding saluran	33
12.	Penerapan pasangan (<i>lining</i>) di saluran irigasi rawa dengan menggunakan pasangan kanvas beton (<i>concrete canvas</i>).	34
13.	Contoh tekstur permukaan dengan <i>lay</i> searah	45
14.	Ilustrasi kekasaran permukaan untuk parameter R_a	46
15.	Ilustrasi dari <i>3D laser scanning microscope</i>	47
16.	Diagram hubungan antara material komposit, material komposit tingkat-lanjut, <i>Fiber Reinforced Composite (FRC)</i> , <i>Fiber Reinforced Polymer (FRP)</i> , <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> , dan produk material <i>GFRP</i>	51
17.	Contoh produk Pintu Sorong <i>GFRP</i> yang dipasang pada sistem pintu pengatur situ (embung) di Kota Palembang	54
18.	Contoh produk gorong-gorong dan pintu klep <i>GFRP</i> yang dipasang pada sistem saluran irigasi rawa di Desa Jungkal, Kecamatan Pampangan, Kabupaten Ogan Komering Ilir, Provinsi Sumatera Selatan pada tahun 2019	54
19.	Contoh produk material <i>GFRP</i> untuk digunakan sebagai komponen bangunan air yang dibuat oleh pabrik <i>GFRP</i> di Kota Lembang, Provinsi Jawa Barat	55
20.	Contoh produk pintu klep <i>GFRP</i> yang dipasang pada sistem bangunan air di saluran rawa di Desa Talio Hulu, Kecamatan Pandih Batu, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah	56

21.	Contoh produk gorong-gorong dan pintu klep <i>GFRP</i> yang dipasang pada sistem saluran air Daerah Irigasi Rawa di Desa Talio Hulu, Kecamatan Pandih Batu, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah	56
22.	Diagram sistem saluran pembawa dan perjalanan air irigasi dari sumber air ke petak sawah	57
23.	Contoh produk pipa berbahan <i>GFRP</i> keluaran <i>Grandpipe</i> TM	61
24.	Contoh produk pipa berbahan <i>GFRP</i> keluaran <i>Jiubo Composite</i> TM	61
25.	Siklus pengembangan dari suatu model simulasi	66
26.	Sistem koordinat kartesian pada aliran tiga dimensi di sungai	69
27.	Ilustrasi bentuk persamaan energi dalam suatu ruang tilik pada saluran terbuka	71
28.	Sketsa talang <i>PVC</i> dan perangkat model saluran terbuka dengan yang dilengkapi dengan pengatur kemiringan (<i>slope adjusters</i>) (Mera, M. dan Robi, R., 2013)	80
29.	Grafik hubungan antara kemiringan dasar <i>S</i> dan koefisien kekasaran <i>n</i> talang <i>PVC</i> (Mera, M. dan Robi, R., 2013)	84
30.	Grafik hubungan antara kemiringan dasar <i>S</i> dan kedalaman aliran <i>y</i> pada talang <i>PVC</i> (Mera, M. dan Robi, R., 2013)	85
31.	Rancangan pembuatan segmen material <i>GFRP</i> yang akan digunakan dalam pelaksanaan penelitian	88
32.	Rancangan instalasi tipikal segmen material <i>GFRP</i> pada flum yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian	90
33.	Bagan alir rancangan penelitian	92
34.	Perangkat flum yang akan digunakan dalam pelaksanaan penelitian	95

35.	Skema perangkat uji aliran air (flum) yang terdapat di Laboratorium Hidrolika, Departemen Teknik Sipil, FT Unhas	95
36.	a) Pompa air tipe <i>submersible</i> , b) Jaringan pipa yang dilengkapi dengan katup pengatur, c) Tangki reservoir atas dan tangki penenang di bagian hulu flum.	96
37.	Alat pengukur kecepatan aliran (<i>current meter</i>) tipe elektromagnetik merk Kenek	97
38.	Uji pengukuran kecepatan aliran dengan menggunakan <i>current meter</i> tipe baling-baling merk Seba	98
39.	Uji pengukuran kecepatan aliran dengan menggunakan <i>current meter (flow meter)</i> merk Flowatch	99
40.	Validasi debit aliran air dengan menggunakan bantuan alat penimbang berat air dalam suatu wadah ember	100
41.	Alat pengukur kedalaman aliran (<i>point gauge</i>)	101
42.	Alat pengatur kemiringan dasar flum (<i>flume's slope adjuster</i>) yang terdapat di bagian hulu perangkat flum	101
43.	Mikroskop laser yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan dari material <i>GFRP</i>	102
44.	Pengaturan elevasi muka air pada tangki reservoir atas untuk pengaturan debit aliran dari pompa (a) debit aliran rendah, (b) debit aliran sedang, (c) debit aliran tinggi	104
45.	Metode pengukuran dan perhitungan kemiringan dasar flum	106
46.	Metode pengukuran kedalaman aliran dengan menggunakan perangkat <i>point gauge</i>	108
47.	Pengecekan dan pengukuran dimensi flum dalam rangka disain dan pembuatan segmen material <i>GFRP</i>	116
48.	Pembuatan, pengiriman, dan instalasi material <i>GFRP</i> ke dalam flum di Laboratorium Hidrolika FT Unhas	117

49.	Dimensi dan tipikal segmen material <i>GFRP</i> yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian	118
50.	Serat kaca tipe <i>standard non-woven mat</i> dan resin yang digunakan dalam proses pembuatan material <i>GFRP</i>	119
51.	Pengambilan sampel untuk uji karakteristik material <i>GFRP</i> dengan menggunakan mikroskop laser	120
52.	Contoh hasil visualisasi dan profil kekasaran permukaan pada tampilan layar monitor untuk salah satu elemen material <i>GFRP</i> dengan ukuran 5 cm x 5 cm	120
53.	Contoh laporan hasil pengujian dengan mikroskop laser untuk satu potongan material <i>GFRP</i> untuk elemen ukuran 5 cm x 5 cm di bagian dasar yang memvisualisasikan orientasi serat kaca, 8 garis bidang yang akan dicek profil dan nilai koefisien kekasaran permukaannya	121
54.	Grafik nilai koefisien kekasaran permukaan (R_a) untuk tiga sampel segmen material <i>GFRP</i>	123
55.	Grafik kedalaman aliran (h_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran rendah (Q_{f1}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	129
56.	Grafik kedalaman aliran (h_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran sedang (Q_{f2}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	130
57.	Grafik kedalaman aliran (h_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	130
58.	Grafik kedalaman aliran (v_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran rendah (Q_{f1}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	131
59.	Grafik kecepatan aliran (v_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran sedang (Q_{f2}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	131
60.	Grafik kecepatan aliran (v_g) pada pias penampang CS_3 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) pada 9 variasi kemiringan dasar saluran (S_g)	132

61.	Grafik hubungan antara kedalaman aliran (h_g) dengan kemiringan dasar saluran (S_g) pada uji model fisik	137
62.	Grafik hubungan antara kecepatan aliran (v_g) dengan kemiringan dasar saluran (S_g) pada uji model fisik	138
63.	Grafik hubungan antara koefisien kekasaran Manning (n_g) dengan kemiringan dasar saluran (S_g) pada uji model fisik	139
64.	Tampilan deskripsi <i>project</i> pada layar <i>software</i> HEC-RAS	141
65.	Tampilan skema pemodelan pada layar model HEC-RAS	141
66.	Tampilan potongan melintang pada pias ke-5 (CS_6) pada layar monitor <i>software</i> HEC-RAS	142
67.	Tampilan input debit pada pias ke-2 (CS_3) sebagai syarat batas di hulu model flum <i>GFRP</i> pada layar <i>software</i> HEC-RAS	143
68.	Tampilan <i>input</i> kemiringan dasar saluran $S_{s9} = S_{g9} = 0,0188$ sebagai syarat batas di hulu dan hilir model flum <i>GFRP</i> untuk kondisi aliran super-kritis pada layar <i>software</i> HEC-RAS	144
69.	Contoh tampilan layar <i>software</i> HEC-RAS sebelum dilakukan eksekusi program untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) dan kemiringan dasar saluran ke-9 (S_{s9})	144
70.	Contoh tampilan layar <i>software</i> HEC-RAS setelah selesai eksekusi program untuk untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) dan kemiringan dasar saluran ke-9 (S_{s9})	145
71.	Contoh tampilan layar <i>software</i> HEC-RAS untuk potongan melintang (<i>cross section</i>) hasil simulasi pada pias ke-5 (CS_6) untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) dan kemiringan dasar saluran ke-9 (S_{s9})	146
72.	Contoh tampilan rangkuman hasil simulasi model HEC-RAS pada CS_2 hingga CS_9 untuk kondisi debit aliran tinggi (Q_{f3}) dan kemiringan dasar saluran ke-9 ($S_{s9} = S_{g9}$)	146

73.	Grafik perbandingan antara kedalaman aliran (h_s) hasil simulasi awal model matematik (HEC-RAS) dengan kedalaman aliran (h_g) hasil observasi model fisik untuk tiga variasi debit aliran (Q_f)	152
74.	Grafik perbandingan antara kecepatan aliran (v_s) pada simulasi awal model matematik (HEC-RAS) dengan kedalaman aliran (v_g) pada model fisik untuk tiga variasi debit aliran (Q_f)	154
75.	Grafik perbandingan antara kedalaman aliran (h_s) pada model matematik dengan kedalaman aliran (h_g) pada model fisik untuk tiga variasi debit aliran (Q_f) setelah dilakukan proses kalibrasi	161
76.	Grafik perbandingan antara kecepatan aliran (v_s) pada model matematik dengan kecepatan aliran (v_g) pada model fisik untuk tiga variasi debit aliran (Q_f) setelah dilakukan proses kalibrasi	162
77.	Grafik perbandingan antara koefisien kekasaran Manning (n_s) pada model matematik dengan koefisien kekasaran Manning (n_g) pada model fisik untuk tiga variasi debit aliran (Q_f) setelah dilakukan proses kalibrasi	163

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor		halaman
1.	Perhitungan indeks kinerja model hidrolis dengan metode Nash-Sutcliffe Efficiency (<i>NSE</i>) untuk beberapa parameter aliran (sebelum dilakukan proses kalibrasi)	182
2.	Perhitungan indeks kinerja model hidrolis dengan metode Nash-Sutcliffe Efficiency (<i>NSE</i>) untuk beberapa parameter aliran (setelah dilakukan proses kalibrasi)	186

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
A	Luas penampang basah aliran air di saluran
A_g	Luas penampang basah aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
A_s	Luas penampang basah aliran air pada simulasi model matematik
<i>ACM</i>	<i>Advance Composite Material</i>
<i>APC</i>	<i>Advance Polymer Composite</i>
ASCE	The American Society of Civil Engineers
ASTME	The American Society of Tool and Manufacturing Engineerings
b	Lebar dasar saluran
b_g	Lebar dasar segmen material <i>GFRP</i> yang ditempatkan di dalam flum
b_f	Lebar dasar saluran <i>acrylic</i> pada perangkat model flum
C	Koefisien kekasaran Chezy
<i>CC</i>	<i>Concrete Canvas</i> (kampus beton)
<i>CLA</i>	<i>Center Line Avarage</i>
<i>CS</i>	<i>Cross Section</i>
<i>CSPE</i>	<i>Chlorosulphonated polyethylene</i>
D	Kedalaman hidrolis aliran air di saluran
<i>EPDM</i>	<i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i>

F_r	<i>Froude number</i> (bilangan Froude)
$FFRP$	<i>Flexible Fiber Reinforced Plastic</i>
FRC	<i>Fiber Reinforced Composite</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer/Plastic</i>
g	Konstanta gravitasi
γ_w	Berat jenis air
$GCCM$	<i>Geosynthetic Cementitious Composite Mats</i>
GF	<i>Glass fiber</i>
$GFRP$	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer/Plastic</i>
GRP	<i>Glassfibers Reinforced Polymer</i>
$G.K.$	Ganguillet and Kutter
h	Kedalaman aliran air di saluran
h_c	Kedalaman kritis aliran air di saluran
h_{cg}	Kedalaman kritis aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
h_{cs}	Kedalaman kritis aliran air pada simulasi model matematik
h_g	Kedalaman aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
h_r	Kedalaman aliran air rata-rata di dalam flum <i>GFRP</i>
h_s	Kedalaman aliran air pada simulasi model matematik
$HDPE$	<i>High density polyethylene</i>
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
I	Kemiringan dasar saluran (formula Strickler)
k	Koefisien kekasaran Strickler

<i>K</i>	Hantaran (<i>conveyance</i>) pada suatu penampang melintang saluran
KP	Kriteria Perencanaan
<i>L</i>	Panjang karakteristik
<i>L_f</i>	Panjang saluran pada perangkat model flum
<i>L_g</i>	Panjang material <i>GFRP</i> yang diinstalasi di dalam perangkat flum
<i>L_s</i>	Panjang potongan segmen produk material <i>GFRP</i>
<i>m</i>	Faktor kemiringan talut/dinding saluran
μ	(baca: mu) Viskositas dinamik
<i>n</i>	Koefisien kekasaran Manning
<i>n_g</i>	Koefisien kekasaran Manning untuk material <i>GFRP</i> yang dihasilkan dari uji model fisik
<i>n_s</i>	Koefisien kekasaran Manning untuk material <i>GFRP</i> yang digunakan dalam simulasi model matematik
<i>\nu</i>	(baca: nu) Viskositas kinematik
<i>N</i>	Jumlah putaran baling-baling pada perangkat <i>current meter</i> pada suatu interval waktu (Δt) tertentu
<i>NSE</i>	Nash-Sutcliffe <i>Efficiency</i>
pH	Potential Hydrogen
<i>P</i>	Keliling basah aliran air di saluran
<i>P_g</i>	Keliling basah aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
<i>P_s</i>	Keliling basah aliran air pada simulasi model matematik
<i>PBIAS</i>	<i>Percent bias</i>
<i>PE</i>	<i>Polyethylene</i>

<i>PP</i>	<i>Polypropylene</i>
<i>Pultrusion</i>	<i>Pulling and extration</i>
PUPR	Pekerjaan Umum dan Pekerjaan Rakyat
Puslitbang	Pusat penelitian dan pengembangan
<i>PVC</i>	<i>Polyvinyl chloride</i>
<i>Q</i>	Debit aliran air di saluran
\bar{Q}	Debit rata-rata aliran air di saluran
<i>Q_f</i>	Debit aliran air yang masuk ke dalam flum
<i>Q_g</i>	Debit aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
<i>Q_p</i>	Debit aliran dari pompa
<i>Q_s</i>	Debit aliran air pada simulasi model matematik
<i>R</i>	Jari-jari hidrolis aliran air di saluran
<i>R_a</i>	<i>Roughness average</i>
<i>R_e</i>	<i>Reynold number</i> (Bilangan Reynold)
<i>R_g</i>	Jari-jari hidrolis aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
<i>R_s</i>	Jari-jari hidrolis aliran air pada simulasi model matematik
ρ	Rapat massa
ρ_w	Rapat massa air
ρ_g	Rapat massa <i>glassfiber</i>
<i>S</i>	Kemiringan dasar saluran (Manning)
<i>S_f</i>	Kemiringan garis energi
<i>S_g</i>	Kemiringan dasar flum yang diberi pasangan material <i>GFRP</i>

S_s	Kemiringan dasar saluran pada simulasi model matematik
S_w	Kemiringan permukaan aliran air
SBS	<i>Styrene butadiene styrene</i>
T	Lebar permukaan aliran air di saluran
T_d	Beda tinggi antara elevasi dasar flum <i>GFRP</i> dibagian hulu dan hilir
T_f	Tinggi dinding saluran pada perangkat model flum
T_g	Tinggi dinding segmen pasangan material <i>GFRP</i> yang diinstalasi di dalam flum
USBR	United States Bureau of Reclamation
v	Kecepatan aliran air di saluran
\bar{v}	Kecepatan aliran air rata-rata
v_g	Kecepatan aliran air di dalam flum <i>GFRP</i>
v_s	Kecepatan aliran air pada simulasi model matematik
V_w	Volume air
VLDPE	<i>Very low density polyethylene</i>
w	<i>Working</i> (tinggi jagaan / <i>freeboard</i>)
W_b	<i>Berat air</i>
W_{wb}	<i>Berat air dan ember (bucket)</i>

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

1. Peningkatan ketersediaan air irigasi

Saat ini jaringan irigasi di Indonesia yang mengalami kerusakan mencapai 3,81 juta ha (52,9%), dimana kerusakan tersebut disebabkan oleh umur layanan yang telah terlewati, gangguan alam, sistem pengelolaan yang belum optimal, dan lemahnya sistem rehabilitasi serta operasi dan pemeliharaan (OP) infrastruktur irigasi. Seiring dengan terjadinya perubahan lingkungan ekologis yang memberi dampak pada kerusakan Daerah Aliran Sungai (DAS), upaya rehabilitasi infrastruktur irigasi saja tidaklah cukup, namun diperlukan juga upaya lain, yaitu berupa modernisasi irigasi. Modernisasi irigasi di Indonesia dilaksanakan melalui konsep lima pilar, yaitu (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2011):

- a) Peningkatan keandalan penyediaan air irigasi;
- b) Perbaikan sarana dan prasarana irigasi;
- c) Penyempurnaan sistem pengelolaan irigasi;
- d) Penguatan institusi pengelola irigasi;
- e) Pemberdayaan sumber daya manusia pengelola irigasi.

Pilar kesatu, yaitu peningkatan keandalan penyediaan air irigasi, merekomendasikan dibuatnya tampungan air yang besar (seperti bendungan, embung, *long storage*, dan lain-lain) dengan maksud agar sistem penyediaan air irigasi lebih stabil dan andal. Sistem tampungan paling ideal dalam penyediaan air irigasi yang stabil dan andal adalah sistem bendungan, namun pelaksanaan pembangunan bendungan mempunyai beberapa kekurangan, yaitu waktu perencanaan yang lama, biaya investasi yang tinggi, persoalan sosial dalam pembebasan lahan, dan harus dikaitkan juga dengan upaya pelestarian daerah atasan

(*upland*) untuk menjamin keberlanjutannya, dimana proses pelestarian DAS ini membutuhkan waktu yang lama (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2011).

Alternatif lainnya dalam peningkatan ketersediaan air irigasi adalah dengan upaya mengurangi kehilangan air (*water losses*) di saluran irigasi akibat faktor rembesan, yaitu dengan cara menambahkan pasangan (*lining*) pada saluran irigasi tanah (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2011).

Kriteria Perencanaan Irigasi di Indonesia memberikan batasan yang ketat tentang penggunaan saluran pasangan di saluran irigasi, sehingga hal ini menyebabkan kehilangan air di saluran irigasi (mulai dari bangunan pengambilan (*intake structure*) sampai ke sawah) saat ini diperkirakan nilainya mencapai sekitar 40 – 50 %. Modernisasi irigasi di Indonesia mengharapkan kehilangan air dibatasi hanya sekitar 20% saja, dan merekomendasikan agar ketentuan penggunaan pasangan (*lining*) di saluran irigasi dapat lebih diperlonggar. Upaya rehabilitasi saluran irigasi yang mengalami kerusakan selanjutnya direkomendasikan melalui kegiatan normalisasi saluran dan sekaligus juga dengan kegiatan pemberian pasangan (*lining*) di saluran irigasi. Selain itu juga perlu diterapkan penggunaan jenis material *lining* yang baru yaitu berupa lapisan kedap air dari material *geotextile* atau plastik (polimer) (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2011).

2. Kriteria penggunaan pasangan (*lining*) pada saluran irigasi di Indonesia

Sistem irigasi di Indonesia secara umum menerapkan saluran irigasi tanpa pasangan sejauh secara teknis bisa dipertanggungjawabkan. Pada ruas tertentu jika keadaan tidak memungkinkan dapat digunakan saluran pasangan (*lined channel*). Banyak bahan yang dapat dipakai untuk pasangan saluran, tetapi di Indonesia hanya ada empat bahan yang dianjurkan pemakaiannya, yaitu (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b):

- a) Pasangan Batu;
- b) Pasangan Beton;
- c) Pasangan Tanah;
- d) Pasangan Ferosemen.

3. Dampak dan kendala penggunaan material galian Golongan C sebagai material pasangan di saluran irigasi

Jika diperhatikan dengan seksama maka keempat jenis material pasangan tersebut di atas mengandung unsur pasta (air dan semen) dalam senyawa campurannya (Tabel 1). Pasangan batu terdiri dari campuran mortar (air + semen + pasir) dan batu belah, dan apabila permukaan dindingnya akan diplester maka diperlukan campuran tambahan berupa mortar. Pasangan beton terdiri dari campuran mortar dan kerikil dengan komposisi yang sebelumnya telah ditentukan. Pasangan ferosemen adalah suatu tipe dinding beton bertulang tipis dengan ketebalan $\pm 3,0$ cm, yang dibuat dari mortar dengan campuran 1 semen: (2-3) pasir dan diberi baja tulangan (diameter < 6,0 mm) dengan tambahan lapisan kawat anyam (*wiremesh*) dengan ukuran diameter kawat < 1,0 mm. Pasangan tanah terdiri dari campuran pasta (air + semen) dan tanah dengan campuran 1 semen: (5-6) tanah, dan selanjutnya dipadatkan secara berlapis.

Tabel 1. Jenis pasangan dan unsur material dalam senyawa campuran pasangan

No.	Jenis Pasangan	Air	Semen	Pasir	Kerikil	Batu Belah	Tanah	Baja dan Kawat Anyam
1	Pasangan Batu	√	√	√	-	√	-	-
2	Pasangan Beton	√	√	√	√	-	-	- / √
3	Pasangan Tanah	√	√	-	-	-	√	-
4	Pasangan Ferosemen	√	√	√	-	-	-	√

Pada prakteknya di Indonesia, dari keempat jenis material pasangan tersebut umumnya hanya dua jenis material yang paling sering digunakan dalam pekerjaan pasangan (*lining*) di saluran irigasi, yaitu pasangan batu dan pasangan beton. Contoh penggunaan pasangan pada saluran irigasi di Indonesia adalah pada pekerjaan pembuatan saluran pembawa pada Proyek Pembangunan Bendung Benanain dan Kelengkapannya pada Daerah Irigasi Malaka (10.000 ha) di Kabupaten Belu Provinsi Nusa Tenggara Timur pada tahun anggaran 2002 – 2004 yang dilaksanakan oleh Proyek Irigasi Daerah Perbatasan Timor Barat – Direktorat Jenderal Sumber Daya Air - Kementerian Pekerjaan Umum (Gambar 1).



Gambar 1. Contoh penggunaan pasangan (*lining*) di saluran irigasi dengan menggunakan pasangan kombinasi berupa beton cor di tempat (*cast in situ*, pada dasar saluran) dan pasangan batu (pada dinding saluran)



Gambar 2. Contoh penggunaan pasangan (*lining*) pada saluran irigasi dengan menggunakan pasangan beton cor ditempat (*cast in situ*, pada dasar saluran) dan beton pracetak (*precast*, pada dinding saluran)

Contoh penggunaan pasangan lainnya pada saluran irigasi di Indonesia adalah pada pekerjaan pembuatan saluran primer dan sekunder pada kegiatan Pembangunan Jaringan Irigasi Daerah Irigasi Baliase di Kabupaten Luwu Utara Provinsi Sulawesi Selatan pada tahun anggaran 2016 – 2021 oleh Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pompengan Jeneberang, Ditjen Sumber Daya Air, Kementerian PUPR. Pada pelaksanaan konstruksi pekerjaan tersebut, pasangan pada dasar saluran dibuat dari struktur beton bertulang (tulangan satu rangkap)

dengan pelaksanaan pengecoran beton dilakukan di tempat (*cast in situ*) sedangkan pasangan pada dinding saluran dibuat dari struktur beton pracetak (*precast*) yang sebelumnya telah dicetak di suatu lokasi fabrikasi dan selanjutnya diangkut dan dipasang di lokasi pekerjaan (Gambar 2).

Pada proses pembuatan kedua jenis material ini (pasangan batu dan pasangan beton), selain unsur pasta (air dan semen) maka terdapat juga unsur pasir, kerikil dan batu belah, dimana ketiganya merupakan unsur material alam yang di Indonesia umumnya dikenal sebagai kelompok material galian Golongan C.

Menurut Jirana dkk. (2016), terdapat beberapa jenis material galian Golongan C yang penambangannya lebih banyak dilakukan, yaitu pasir, kerikil, batu kali, dan tanah timbunan. Hal ini harus mendapat perhatian serius karena seringkali usaha penambangan tersebut dilakukan dengan kurang memperhatikan dampaknya terhadap lingkungan hidup.

Penggunaan atau eksploitasi material galian Golongan C yang berlebihan lambat laun akan memberikan dampak kerusakan pada lingkungan, baik lingkungan di sungai maupun lingkungan di darat (Jirana dkk., 2016; Hasibuan, P.M., 2006; Anas, A. V., dkk., 2013; dan Mattamana, B.A., et al., 2013).

Pada prakteknya juga di lapangan, pembuatan campuran untuk *lining* saluran dari pasangan batu dan pasangan beton mempunyai beberapa kendala, yaitu antara lain sebagai berikut:

- a) kendala sulitnya mendapatkan sumber material galian Golongan C;
- b) kendala akses yang sulit untuk membawa unsur campuran material (semen, agregat, dan batu kali) ke lokasi pekerjaan;
- c) kendala sulitnya mendapatkan air tawar yang dibutuhkan untuk proses pencampuran material di lapangan;
- d) kendala cuaca (kondisi hujan) yang sering mengganggu/menghambat proses pencampuran material tersebut di lokasi pekerjaan;
- e) kendala sulitnya menjaga mutu konstruksi pekerjaan karena umumnya pekerjaan saluran irigasi berada pada lokasi yang luas dan tersebar yang mengakibatkan sulitnya para pengawas pekerjaan untuk melakukan pengawasan konstruksi.

Berdasarkan uraian tersebut di atas, timbul gagasan awal untuk mencari dan mengkaji material alternatif yang tidak menggunakan unsur semen dan unsur material galian Golongan C, dimana material jenis baru tersebut nantinya dapat digunakan sebagai material alternatif untuk pasangan (*lining*) di saluran irigasi dan selanjutnya material alternatif tersebut diharapkan mampu memberikan solusi terhadap dampak kerusakan lingkungan dan juga kendala-kendala yang terjadi dalam pelaksanaan konstruksi seperti yang telah diuraikan tersebut di atas.

4. Alternatif penggunaan material berbahan polimer sebagai pasangan di saluran irigasi

a. Penggunaan material berbahan polimer di Amerika Serikat

Amerika Serikat, melalui lembaga United States Bureau of Reclamation (USBR) adalah negara yang paling awal dan paling sering melakukan penelitian tentang penggunaan tipe material untuk pasangan (*lining*) di saluran irigasi. Berdasarkan laporan penelitian yang dibuat oleh USBR (1976), penggunaan material pasangan tradisional di saluran irigasi di Amerika Serikat tidak hanya berupa pasangan batu, beton, dan tanah namun juga menggunakan material aspal (bitumen), membran karet, dan bentonit. Selain itu juga terdapat jenis material baru yang digunakan yaitu berupa membran plastik. Dibandingkan material karet, membran plastik lebih menjanjikan untuk digunakan sebagai pasangan alternatif dikarenakan biaya produksinya yang lebih rendah (USBR, 1976).

Menurut Johnson, W. (2007), Amerika Serikat (United States, US) telah menerapkan penggunaan material jenis baru berupa berbagai produk geosintetik polimer (*polymeric geosynthetic*) untuk keperluan pelapisan (*liner*) di saluran irigasi terutama pada kawasan US bagian barat. Aneka produk geosintetik polimer tersebut antara lain berupa membran aspal (*Prefabricated Asphaltic Geosynthetic*), *High Density Polyethylene (HDPE)*, *Ethylene Propylene Diene Monomer Synthetic Rubber (EPDM)*, dan *Polyvinyl Chloride (PVC)*.

Menurut Stark, T.D. dan Hynes, J.M. (2009), USBR memiliki pengalaman yang banyak dalam instalasi dan pemantauan geomembran untuk pelapis saluran

(*canal liner*) yang didasarkan pada program-program pengujian lapangan yang telah dilakukan selama ini. Program pengujian pertama dimulai dengan penggunaan material *PVC* pada suatu ruas saluran pada Proyek Shoshone di Wyoming pada tahun 1957 (Morrison dan Comer, 1995 dalam Stark, T.D. dan Hynes, J.M., 2009). Selanjutnya USBR menginstalasi pasangan geomembran di saluran-saluran lainnya, dan pada tahun 1991 mulai melaksanakan proyek demonstrasi pasangan saluran (*canal-lining*) di berbagai saluran yang bercabang dari Sungai Deschutes pada kegiatan *The Deschutes Canal-Lining Demonstration Project* (Haynes dan Swihart, 2002 dalam Stark, T.D. dan Hynes, J.M., 2009). Proyek pengujian ini dilakukan pada 34 ruas saluran di Oregon, Idaho, Montana, dan Oklahoma dan awalnya ditujukan untuk mengevaluasi keefektifan dari berbagai alternatif material pasangan pada ruas-ruas saluran tersebut.

Geomembran *PVC* pada awalnya adalah geomembran yang digunakan untuk proyek pelapisan saluran. Namun selanjutnya geomembran berbasis *Polyethylene (PE)* -seperti *HDPE*, *LDPE*, *CSPE* dan *VLDPE*- serta beberapa jenis geomembran lainnya (seperti *EDPM* dan *Polypropylene (PP)*) juga digunakan sebagai pelapis/pasangan saluran. Semua geomembran tersebut rentan terhadap kerusakan akibat pengaruh sinar matahari, angin, gelombang, akar vegetasi, dan lalu lintas hewan, sehingga harus dilindungi.

Salah satu contoh hasil pengujian geomembran oleh USBR tersebut adalah pada Saluran Arnold - Ruas Pengujian A-3 (USBR, 2019). Material yang digunakan adalah jenis *HDPE* (tebal 80-*mils*), bertekstur dan terekspose. Pemasangan dilakukan pada bulan Oktober 1992 dengan luas 15.000 *feets*². Setelah 25 tahun, hasil observasi secara umum memperlihatkan bahwa kondisi material pasangan *HDPE* masih dalam kondisi baik sekali (*excellent*). Hasil observasi lebih rinci memperlihatkan adanya beberapa sobekan kecil pada lapisan geomembran tetapi hal itu tampaknya tidak mempengaruhi kinerja geomembran *HDPE* (Gambar 3).



Gambar 3. Kondisi pemasangan material geomembran tipe *HDPE* pada Saluran Arnold, ruas pengujian A-3 (USBR, 2019)

b. Penggunaan material berbahan polimer di Portugal

Contoh negara lainnya yang telah menerapkan penggunaan material baru berbahan polimer tersebut adalah Portugal. Menurut Morgado, F. et al. (2016), penggunaan membran prafabrikasi untuk saluran pasangan semakin meningkat di Portugal selama 20 tahun terakhir, terutama sebagai solusi rehabilitasi saluran beton lama. Dua jenis membran utama yang digunakan di Portugal adalah membran bitumen dan membran sintesis. Membran bitumen biasanya terbuat dari *Atactic Polypropylene (APP)* atau aspal modifikasi-polimer *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)*. Untuk membran sintesis, material yang paling umum digunakan adalah membran jenis *PVC*.

1) Penggunaan material membran bitumen

Menurut Morgado, F. et al. (2016), membran aspal dibuat dengan menutupi satu atau dua lapisan penguat (*reinforcement*) dengan aspal modifikasi polimer *APP* atau *SBS*. Lapisan penguat biasanya berupa jaring (*mesh*) serat kaca atau poliester. Jenis membran ini harus dipasang di atas substrat (lapisan bawah) yang lebih kaku, biasanya pasangan beton pada saluran yang lama, dan pengalaman dengan pemasangan sebelumnya berdampak signifikan pada hasil akhir. Lembaran membran yang tumpang tindih biasanya dipatri (*welded*) menggunakan alat pemanas khusus yang disebut *blowtorch* (Gambar 4). Lebar bidang sambungan

(*overlap*) antara lembaran harus 10% dari lebar lembaran aspal (biasanya 1,0 atau 1,1 m).



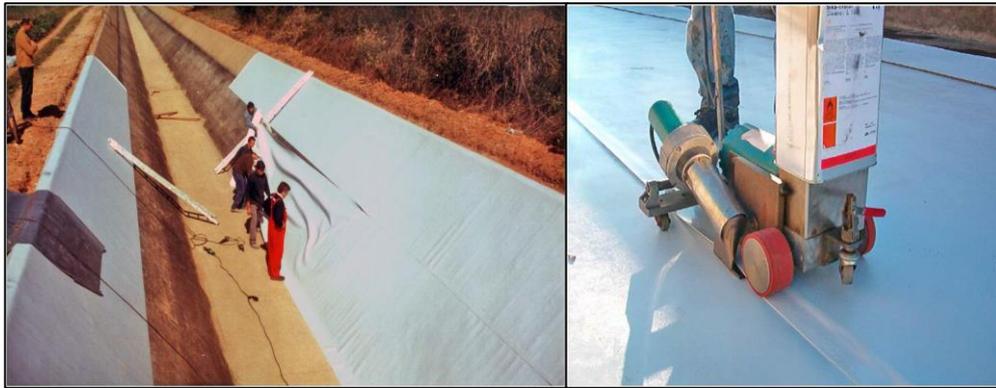
Gambar 4. Pemasangan membran bitumen di atas lapisan aspal primer dan penggunaan *blowtorch* untuk merekatkan bidang antar sambungan (Morgado, F. et al., 2016)

2) Penggunaan material membran sintetik

Menurut Morgado, F. et al. (2016), berbagai membran sintesis telah digunakan di Portugal dalam 15 tahun terakhir, dimana membran yang umumnya digunakan adalah *PVC*, *HDPE*, dan *EPDM* dengan ketebalan antara 0,5 dan 3,0 mm. *PVC* adalah membran yang paling umum digunakan dan membran ini senyawanya terbuat dari *polyvinyl chloride*, *plasticizer*, stabilisator, dan aditif lainnya dan tersedia dengan atau tanpa lapisan penguat (*reinforcement*). Lapisan penguat untuk membran *PVC* biasanya berupa kasa (*mesh polyester* atau *fiberglass*). Lapisan penguat tersebut akan meningkatkan kinerja mekanik dengan mengurangi efek ketidakstabilan dimensi yang disebabkan oleh hilangnya *plasticizer* atau variasi suhu. Membran sintesis lebih fleksibel daripada sistem lapisan lainnya. Ketika masih dalam kondisi baru, membran sintesis memiliki ketahanan tertinggi terhadap gerusan yang disebabkan oleh partikel padat tersuspensi dalam aliran. Jika dibandingkan dengan membran bitumen, membran sintesis juga kurang rentan mencair/meleleh pada kondisi suhu yang tinggi.

Membran sintesis juga berbentuk gulungan dengan berbagai lebar. Idealnya, membran sintesis harus lebih lebar dari garis keliling saluran sehingga dapat dipasang di tepi saluran tanpa perlu sambungan longitudinal. Namun, hal ini tidak

selalu memungkinkan di saluran yang lebih besar. Jika membran bitumen dipasang secara tegak lurus terhadap arah aliran air, maka membran sintetis dipasang secara memanjang (longitudinal) di dalam saluran pasangan beton yang lama. Bidang sambungan (*overlap*) membran sintetis harus memiliki lebar setidaknya 0,30 m dan bidang sambungannya direkatkan atau dipatri (*welded*) dengan benar dengan alat pemanas khusus yang bernama *heat gun* (Gambar 5).



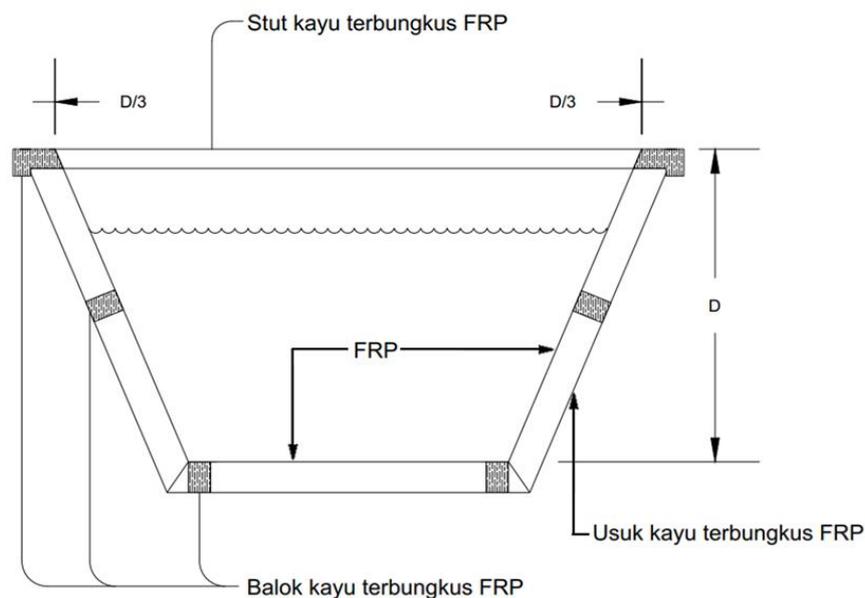
Gambar 5. Pemasangan membran sintetis jenis *PVC* secara longitudinal di atas saluran beton lama (kiri), dan perekatan bidang antar sambungan dengan menggunakan alat pemanas khusus bernama *heat gun* (kanan) (Morgado, F. et al., 2016)

5. Alternatif penggunaan material *GFRP* (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) sebagai material pasangan di saluran irigasi

Penggunaan material berbahan *GFRP* sebagai material pasangan telah pernah diuji coba di Malaysia. Pang, L. H. (1978) melakukan penelitian dalam bentuk proyek percontohan (*pilot project*) penggunaan material *GFRP* pada pembangunan saluran irigasi tersier yang baru yang dilaksanakan di Proyek Irigasi Tanjung Karang di Malaysia. Konstruksi saluran irigasi tersier tersebut berbentuk flum dan material pasangannya diberi nama *Fiberglass-Reinforced Polyester (FRP)* (Gambar 6).

Material *GFRP* saat ini sudah mulai banyak digunakan sebagai material bangunan dalam industri konstruksi. Secara umum material *GFRP* ini mempunyai karakteristik yang kuat, ringan, tahan cuaca, dan kedap air. Penggunaan material

jenis *GFRP* di Indonesia saat ini juga sudah mulai banyak diproduksi dan digunakan utamanya untuk material konstruksi bangunan seperti talang air, tandon air, atap rumah, dan lain lain. Pembuatan dan penggunaan material *GFRP* untuk konstruksi bangunan air di Indonesia saat ini sudah banyak juga diterapkan namun masih terbatas untuk kelengkapan pintu air dan gorong-gorong di daerah irigasi rawa karena material *GFRP* ini punya durabilitas pada lingkungan air yang asam (ber-pH rendah). Mengingat saat ini sudah banyak perusahaan di Indonesia yang sudah mampu membuat aneka produk material berbahan *GFRP* maka timbul gagasan lanjutan untuk melakukan kajian penggunaan material *GFRP* tersebut untuk dapat digunakan sebagai material alternatif untuk keperluan pembuatan pasangan (*lining*) di saluran irigasi di Indonesia.



Gambar 6. Potongan melintang saluran irigasi yang terbuat dari material *FRP* (*Fiberglass Reinforced Polyester*) dan kayu keras (*hard wood*) (Pang, L. H., 1978)

6. Kriteria perencanaan untuk saluran irigasi di Indonesia

Kriteria Perencanaan (KP) Irigasi terdiri dari sembilan bagian, dimana untuk kegiatan perencanaan saluran irigasi mengacu pada buku KP-03 tentang Saluran dan KP-05 tentang Petak Tersier. KP-03 hanya mencakup kegiatan perencanaan

sistem jaringan utama (*main system*) yaitu saluran primer dan saluran sekunder sedangkan kegiatan perencanaan untuk saluran tersier dan kuartier disajikan dalam KP-05 tentang Petak Tersier (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b).

Untuk perencanaan hidrolis pada suatu ruas saluran, aliran di saluran diatur tetap (*steady state*), dan untuk itu kecepatan aliran dihitung dengan Rumus Strickler (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b):

$$v = k R^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

dimana:

v = kecepatan aliran air di saluran (m/s);

k = koefisien kekasaran Strickler ($m^{1/3}/s$);

R = jari-jari hidrolis aliran air di saluran (m);

I = kemiringan dasar saluran.

Dalam perancangan saluran irigasi yang diberi pasangan, nilai pendekatan untuk koefisien kekasaran hidrolis untuk keempat tipe material pasangan yang telah dijelaskan sebelumnya disajikan dalam Tabel 2. Koefisien kekasaran Manning (n) mempunyai harga bilangan 1 (satu) dibagi dengan k (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b).

Tabel 2. Koefisien kekasaran hidrolis untuk berbagai tipe saluran pasangan di Indonesia (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b).

No.	Jenis pasangan (<i>lining</i>)	Nilai koefisien kekasaran hidrolis	
		Strickler (k)	Manning ($n = 1/k$)
1.	Pasangan Batu	60	0,0167
2.	Pasangan Beton	70	0,0143
3.	Pasangan Tanah	35 - 45	0,0285 – 0,0222
4.	Pasangan <i>Ferrocement</i>	70	0,0143

Nilai koefisien kekasaran saluran tersebut (Tabel 2) umumnya langsung digunakan secara praktis oleh para perencana irigasi dalam perhitungan dan rancangan (*design*) saluran irigasi di Indonesia.

Dalam latar belakang penelitian ini sebelumnya telah diuraikan bahwa Modernisasi Irigasi di Indonesia juga telah merekomendasikan penggunaan jenis material pasangan (*lining*) lainnya seperti plastik (polimer). Apabila material *GFRP* ini akan digunakan sebagai alternatif material *lining* pada saluran irigasi di Indonesia maka dalam kaitannya dengan perhitungan hidrolis untuk perencanaan saluran pasangan tersebut, koefisien kekasaran hidrolis material *GFRP* ini tentunya terlebih dahulu perlu diketahui.

Berdasarkan penjelasan tersebut di atas maka timbul gagasan akhir penelitian untuk mencari nilai koefisien kekasaran hidrolis untuk material berbahan *GFRP* dengan tipe yang kaku (*rigid*) hasil olahan pabrik yang ada di Indonesia.

7. Kajian studi eksperimental model saluran terbuka dari material pasangan *GFRP*

Bentuk umum hubungan antara debit dan kecepatan aliran dapat ditulis dengan rumus sederhana sebagai berikut:

$$Q = v \times A \quad (2)$$

dimana:

Q = debit aliran air di saluran (m^3/s);

v = kecepatan aliran air di saluran (m/s);

A = luas penampang basah aliran air di saluran (m^2).

Salah satu formula yang sering digunakan dalam perhitungan kecepatan aliran seragam (*uniform flow*) di saluran terbuka adalah dengan menggunakan rumus Manning, dimana formulanya dapat ditulis dalam bentuk (Subramanya, K., 2008):

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

dimana:

n = koefisien kekasaran Manning

R = jari-jari hidrolis aliran air di saluran (m)

S = kemiringan dasar saluran

Penelitian untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning (Manning *roughness coefficient*) dapat dilaksanakan secara eksperimental di laboratorium dengan menggunakan perangkat model saluran terbuka berupa flum. Penampang flum yang digunakan umumnya berbentuk persegi empat (Gambar 7), sehingga nilai luas penampang basah (A), keliling basah (P), dan jari-jari hidrolis (R) secara berturut-turut dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$A = b \times h \quad (4)$$

$$P = b + 2h \quad (5)$$

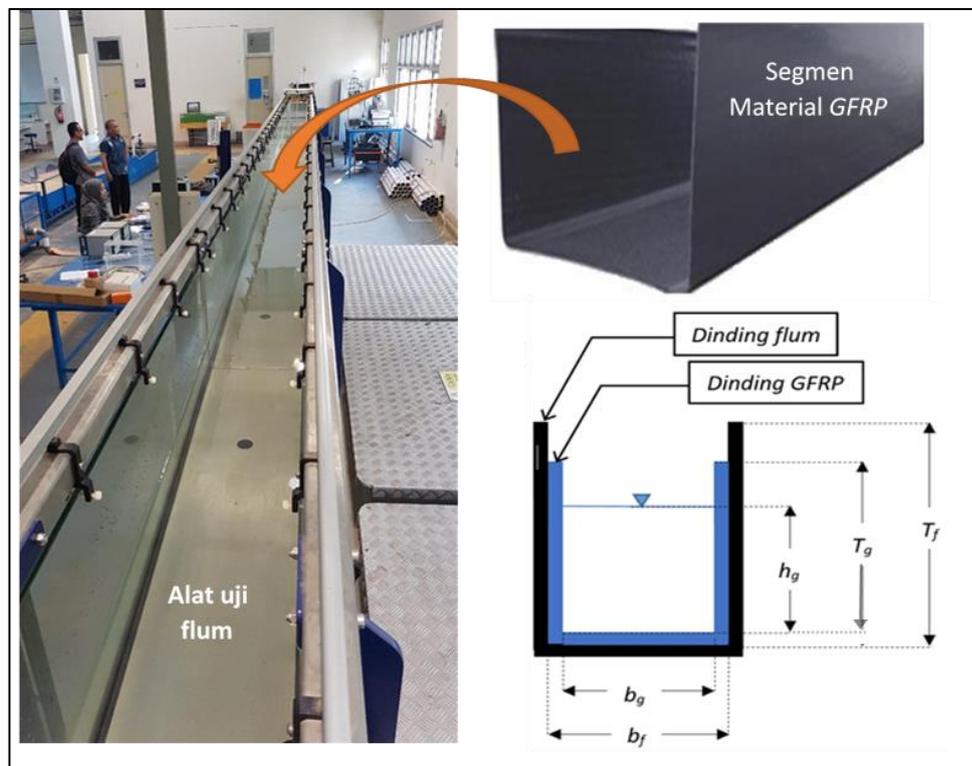
$$R = \frac{A}{P} = \frac{b \times h}{b + 2h} \quad (6)$$

dimana:

b = lebar dasar flum (m), konstan;

h = kedalaman aliran air di dalam flum (m);

P = keliling basah aliran air di dalam flum (m).



Gambar 7. Rancangan awal dan metode instalasi material *GFRP* ke dalam flum

Apabila kecepatan aliran (v), jari-jari hidrolis (R), dan kemiringan dasar saluran (S) pada perangkat flum dapat diketahui maka dari Persamaan (3) nilai koefisien kekasaran Manning n dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$n = \frac{1}{v} R^{2/3} S^{1/2} \quad (7)$$

atau dapat juga ditulis dalam bentuk:

$$n = \frac{1}{Q} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (8)$$

Untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning (*Manning roughness coefficient*) untuk material berbahan *GFRP* maka perangkat flum tersebut terlebih dahulu harus dilapisi dengan material *GFRP* dengan bentuk rancangan seperti yang disajikan dalam Gambar 7.

Setelah perangkat flum dilapisi dengan material *GFRP* maka simbol dan perhitungan parameter hidrolis aliran juga harus disesuaikan dan untuk itu Persamaan (2) dan Persamaan (3) dapat ditulis ulang kembali dalam bentuk:

$$Q_g = v_g \times A_g \quad (9)$$

$$v_g = \frac{1}{n_g} R_g^{2/3} S_g^{1/2} \quad (10)$$

dimana:

Q_g = debit aliran air di dalam flum *GFRP* (m^3/s);

v_g = kecepatan aliran air di dalam flum *GFRP* (m/s);

A_g = luas penampang basah aliran air di dalam flum *GFRP* (m^2);

n_g = koefisien kekasaran Manning untuk material *GFRP*;

R_g = jari-jari hidraulis aliran air di dalam flum *GFRP* (m);

S_g = kemiringan dasar flum yang dilapisi material *GFRP*.

Selanjutnya Persamaan (4), Persamaan (5), dan Persamaan (6) dapat ditulis ulang kembali dalam bentuk:

$$A_g = b_g \times h_g \quad (11)$$

$$P_g = b_g + 2 h_g \quad (12)$$

$$R_g = \frac{A_g}{P_g} = \frac{b_g \times h_g}{b_g + 2h_g} \quad (13)$$

dimana:

b_g = lebar dasar flum *GFRP* (m);

h_g = kedalaman aliran air di dalam flum *GFRP* (m);

P_g = keliling basah aliran air di dalam flum *GFRP* (m);

Dari Persamaan (7) dan Persamaan (8), nilai koefisien kekasaran Manning untuk material *GFRP* (n_g) selanjutnya dapat ditulis ulang kembali dalam bentuk:

$$n_g = \frac{1}{v_g} R_g^{2/3} S_g^{1/2} \quad (14)$$

atau dalam bentuk:

$$n_g = \frac{1}{Q_g} A_g R_g^{2/3} S_g^{1/2} \quad (15)$$

Secara matematis, apabila data parameter aliran seperti kecepatan, debit, kedalaman aliran, lebar dasar flum, dan kemiringan dasar flum yang telah dilapisi material *GFRP* tersebut dapat diketahui maka nilai koefisien kekasaran Manning untuk material *GFRP* tersebut dapat dihitung. Namun permasalahan yang muncul adalah bagaimana caranya menginstalasi segmen material *GFRP* tersebut ke dalam flum, sehingga untuk itu perlu dibuatkan rancangan (*design*) awal untuk segmen material *GFRP* tersebut (lihat kembali Gambar 7). Permasalahan lainnya adalah bagaimana cara mencari penyedia jasa yang kompeten dan mampu membuat segmen material *GFRP* tersebut agar sesuai dengan rancangan. Hal terpenting lainnya adalah produk material *GFRP* tersebut harus andal selama pengujian aliran dan juga mempunyai karakteristik material yang homogen sehingga pengumpulan data parameter aliran air nantinya dapat valid.

Salah satu faktor yang menentukan nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning adalah kekasaran permukaan material *GFRP* itu sendiri sehingga untuk itu perlu dilakukan pengujian awal terlebih dahulu apakah produk material *GFRP* tersebut mempunyai kekasaran permukaan yang seragam.

Berhubung formula yang digunakan untuk menghitung nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning adalah untuk kondisi *steady uniform flow* maka perlu

dilakukan pengujian awal karakteristik aliran yang terjadi di dalam flum *GFRP* untuk penentuan pias yang paling tepat untuk pengambilan data parameter aliran air. Selain itu juga perlu dilakukan analisis karakteristik aliran lainnya seperti karakteristik kecepatan aliran (diindikasikan dengan bilangan Froude F_r) dan karakteristik pola aliran (diindikasikan dengan bilangan Reynold R_e) selama pengujian secara eksperimental tersebut.

Untuk menguji data parameter aliran (baik data yang dikumpulkan dari hasil observasi maupun data yang telah diolah) maka perlu dilakukan proses verifikasi, validasi, dan kalibrasi model fisik tersebut dengan model matematik sehingga kinerja model fisik benar-benar dapat diandalkan.

Setelah permasalahan-permasalahan tersebut dapat dirumuskan maka permasalahan pokok dari penelitian ini yaitu mencari nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning untuk material berbahan *GFRP* diharapkan dapat memberikan nilai akurasi yang baik.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan dalam latar belakang penelitian maka masalah-masalah yang dijumpai dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- 1) Bagaimana membuat rancangan (*design*) segmen material *GFRP* agar dapat diinstalasi ke dalam flum, dan bagaimana cara membuatnya?
- 2) Bagaimana cara mengetahui bahwa produk material *GFRP* yang telah dibuat mempunyai kualitas yang baik, homogen, dan andal selama pengujian aliran air, serta mempunyai kekasaran permukaan material yang seragam?
- 3) Bagaimana cara melakukan pengujian untuk mendapatkan nilai-nilai parameter aliran air yang dibutuhkan dalam perhitungan nilai koefisien kekasaran hidrolis?
- 4) Bagaimana cara mengetahui bahwa penelitian yang dilakukan tersebut andal dan data yang diperoleh dan diolah dari hasil penelitian tersebut dapat diandalkan?
- 5) Bagaiman karakteristik pengaliran yang terjadi pada saluran terbuka dari material pasangan (*lining*) berbahan *GFRP* tersebut?

- 6) Berapa nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning yang didapat untuk tipe material pasangan *GFRP* yang kaku (*rigid*) hasil dari proses manufaktur pabrik di Indonesia tersebut?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Melakukan rancangan (*design*) segmen material *GFRP* agar dapat dinstalasi ke dalam perangkat flum dan selanjutnya melakukan survei, konsultasi, pemesanan, dan instalasi produk segmen material *GFRP* tersebut melalui jasa salah satu pabrik yang kompeten yang ada di Indonesia;
- 2) Melakukan pengujian karakteristik material *GFRP* yang dihasilkan dari proses manufaktur salah satu pabrik di Indonesia, khususnya pengujian tekstur dan kekasaran permukaan materialnya, agar dapat diketahui kualitas dan juga keseragaman produknya;
- 3) Melakukan pengujian hidrolis secara eksperimental (model fisik) dengan menggunakan model saluran terbuka dari flum yang dilapisi material *GFRP* melalui pengaturan beberapa variasi debit dan juga variasi kemiringan dasar flum dalam rangka mendapatkan beberapa nilai parameter aliran air dan juga karakteristik pengalirannya;
- 4) Membuat dan melakukan simulasi model matematik sebagai langkah verifikasi untuk melakukan perbandingan hasil penelitian yang diperoleh dari pemodelan fisik dengan hasil penelitian yang diperoleh dari pemodelan matematik;
- 5) Melakukan perbandingan pengujian model fisik dengan model matematik melalui penilaian kinerja model fisik dan juga melalui analisis perbandingan data model fisik dengan data model matematik (dan jika diperlukan dilakukan proses kalibrasi model) sehingga data parameter aliran yang telah dikumpulkan dan diolah serta model hidrolis yang digunakan tersebut dapat teruji keandalannya;
- 6) Melakukan analisis karakteristik aliran air yang terjadi pada model saluran terbuka (flum) yang telah dilapisi material *GFRP* dengan pengaturan untuk

beberapa kondisi variasi debit aliran dan juga beberapa variasi kemiringan dasar saluran/flum;

- 7) Menemukan nilai koefisien kekasaran hidrolis (Manning) untuk material pasangan *GFRP* yang diperoleh dari hasil penelitian ini, dan selanjutnya memberikan rekomendasi akhir untuk besaran nilai koefisien kekasaran Manning yang nantinya dapat digunakan untuk keperluan rancangan (*design*) saluran irigasi di Indonesia.

D. Kegunaan Penelitian

Nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning untuk material *GFRP* yang diperoleh dari hasil studi eksperimental ini selanjutnya diharapkan dapat digunakan sebagai nilai referensi untuk nilai koefisien kekasaran hidrolis saluran untuk material *GFRP* (khususnya dengan tipe yang kaku (*rigid*) yang dihasilkan dari proses manufaktur salah satu pabrik di Indonesia) sehingga perhitungan hidrolis untuk rancangan saluran irigasi di Indonesia dengan alternatif menggunakan pasangan material *GFRP* tersebut selanjutnya dapat dianalisis dan direncanakan.

E. Ruang Lingkup / Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini, beberapa batasan diterapkan dalam rangka uji eksperimental untuk mengetahui nilai koefisien kekasaran hidrolis material *GFRP* sebagai alternatif material pasangan untuk diterapkan di saluran irigasi di Indonesia. Batasan tersebut adalah sebagai berikut:

- 1) Pemesanan segmen material *GFRP* hanya akan dilakukan melalui jasa salah satu pabrik yang kompeten yang ada di Indonesia dengan mempertimbangkan aspek biaya produksi, komunikasi dan koordinasi kegiatan, dan jarak angkut untuk pengiriman produk material *GFRP* tersebut ke Kota Makassar;
- 2) Sifat/properti material *GFRP* yang akan digunakan ditentukan berdasarkan kemampuan produksi pabrik yang dipilih dan selanjutnya komposisi campuran

senyawa penyusun dan cara produksi material *GFRP* tersebut akan dicatat sebagai bahan informasi tambahan dalam penelitian.

- 3) Pengujian karakteristik material *GFRP* akan dilakukan dengan menggunakan bantuan mikroskop laser yang terdapat di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin di Kabupaten Gowa.
- 4) Pengujian hidrolis untuk material *GFRP* akan dilakukan dengan menggunakan alat uji model saluran terbuka berupa perangkat flum yang terdapat di Laboratorium Hidrolika, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin di Kabupaten Gowa.
- 5) Berhubung hasil penelitian penggunaan material material pasangan *GFRP* ini nantinya hanya akan diterapkan pada saluran irigasi tersier dengan dimensi yang relatif kecil (lebar dasar antara 30 – 40 cm) maka dalam uji eksperimental aliran air ini tidak dilakukan pembuatan skala pemodelan.

F. Definisi dan Istilah

Beberapa definisi dan istilah akan dijelaskan dalam bagian ini agar tidak menimbulkan kesalahan tafsir. Beberapa definisi dan istilah tersebut adalah sebagai berikut:

Bitumen adalah sejenis aspal yang dapat berbentuk cair maupun padat.

Daerah irigasi adalah kesatuan lahan yang mendapat air dari satu jaringan irigasi.

Fiberglass adalah suatu istilah yang digunakan untuk kumpulan produk yang terbuat dari serat kaca individu yang digabungkan menjadi berbagai bentuk.

FRP (*Fiber Reinforced Polymer* atau *Fiber Reinforced Plastic*) adalah suatu material komposit tingkat lanjut (*advance*) yang terbuat dari campuran matriks polimer dengan perkuatan (*reinforcement*) berupa serat (*fiber*).

Geosintetik adalah produk lembaran (*planar product*) yang dibuat dari bahan polimer yang digunakan dalam rekayasa geoteknik pada tanah, batuan, atau material terkait rekayasa geoteknik lainnya sebagai bagian integral dari proyek, struktur, atau sistem buatan manusia.

Geomembran adalah suatu tipe produk geosintetik yang berbentuk material lembaran pelapis yang mempunyai permeabilitas sangat rendah sehingga dapat mengontrol keluarnya zat cair yang umumnya digunakan dalam proyek, struktur, atau sistem buatan manusia.

Geotekstil adalah suatu tipe produk geosintetik yang berbentuk lembaran sintesis yang tipis, fleksibel, berpori yang digunakan untuk stabilisasi dan perbaikan tanah dikaitkan dengan pekerjaan teknik sipil.

GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer/Plastic*) adalah suatu material komposit tingkat lanjut (*advance*) yang terbuat dari campuran matriks polimer (umumnya berupa resin *epoxy*, *polyester*, atau *vinylester*) dengan perkuatan (*reinforcement*) berupa serat kaca (*glass fiber*).

Hand lay-up adalah proses pembuatan komposit cetakan terbuka (*open mold composite*) yang paling umum dan paling banyak digunakan.

Irigasi adalah usaha penyediaan, pengaturan, dan pembuangan air irigasi untuk menunjang pertanian yang jenisnya meliputi irigasi permukaan, irigasi rawa, irigasi air bawah tanah, irigasi pompa, dan irigasi tambak.

Jaringan irigasi adalah saluran, bangunan, dan bangunan pelengkap yang merupakan satu kesatuan yang diperlukan untuk penyediaan, pembagian, pemberian, penggunaan, dan pembuangan air irigasi.

Jaringan irigasi primer adalah bagian dari jaringan irigasi yang terdiri dari bangunan utama, saluran induk/primer, saluran pembuangannya, bangunan bagi, bangunan bagi-sadap, bangunan sadap, dan bangunan pelengkap.

Jaringan irigasi sekunder adalah bagian dari jaringan irigasi yang terdiri dari saluran sekunder, saluran pembuangannya, bangunan bagi, bangunan bagi-sadap, bangunan sadap, dan bangunan pelengkap.

Jaringan irigasi tersier adalah jaringan irigasi yang berfungsi sebagai prasarana pelayanan air irigasi dalam petak tersier yang terdiri dari saluran tersier, saluran kuartier dan saluran pembuang, boks tersier, boks kuartier, serta bangunan pelengkap.

Kalibrasi model adalah proses penyesuaian parameter pemodelan numerik atau fisik dalam model komputasi, dengan tujuan meningkatkan kesesuaian model dengan data eksperimen.

Koefisien kekasaran hidrolis (*hydraulic roughness coefficient*) saluran adalah koefisien yang menyatakan pengaruh kekasaran dasar dan dinding saluran terhadap kecepatan aliran.

Koefisien kekasaran permukaan material adalah koefisien yang menyatakan rata-rata kekasaran permukaan yang mewakili deviasi antara puncak ke lembah pada permukaan suatu material.

Lay adalah arah utama dari pola permukaan material yang dominan, biasanya ditentukan berdasarkan metode produksi yang digunakan

Lucite adalah suatu material plastik sintetik yang umumnya dikenal dengan nama *acrylic*

Material galian Golongan C adalah material yang bukan termasuk dalam kelompok galian strategis ataupun vital karena sifatnya tidak langsung memerlukan pasaran yang bersifat internasional, contohnya antara lain adalah batu kapur, tanah liat, pasir, batu kali, dan lain-lain.

Material komposit adalah material hasil penggabungan dari paling sedikit dua jenis material yang berbeda.

Material komposit tingkat-lanjut (*advance composit material / ACM*) adalah suatu tipe material komposit yang lebih spesifik dimana material komposit tersebut terdiri dari unsur penguat (*reinforcement*) di dalam suatu unsur pengikat (*matrix*) dengan bidang-pertemuan (*interface*) yang bertindak sebagai pengikat (*bond*) di antara keduanya. Unsur pengikat (*matrix*) merupakan tipikal *matrix* yang berbobot ringan; sedangkan unsur penguat (*reinforcement*) merupakan tipikal penguat yang kuat dan/atau kaku dan berbobot ringan, dimana unsur penguatnya dapat berupa penguat berserat (*fibrous reinforcement*) atau penguat partikulat (*particulate reinforcement*).

Material komposit yang diperkuat dengan serat (*fiber reinforced composite / FRC*) adalah material komposit tingkat-lanjut yang lebih spesifik dimana unsur pengikat (*matrix*) dapat berupa material berbahan polimer, metal, atau

keramik; sedangkan unsur penguat (*reinforcement*) merupakan penguat yang lebih spesifik yaitu berupa penguat berserat (*fibrous reinforcement*).

Material polimer yang diperkuat serat (*fiber reinforced polymer / FRP*) adalah material *fiber reinforced composite (FRC)* yang lebih spesifik dimana unsur pengikat (*matrix*) adalah material berbahan polimer yang pilihannya dapat berupa polimer termoset atau polimer termoplastik, sedangkan unsur penguat (*reinforcement*) menggunakan penguat berserat (*fibrous reinforcement*) yang umumnya berupa serat kaca, karbon, atau aramid.

Material polimer yang diperkuat serat kaca (*Glass Fiber Reinforced Polymer / GFRP*) adalah salah satu tipe material *FRP* yang lebih spesifik dimana unsur pengikat (*matrix*) umumnya berupa material berbahan polimer berbasis termoset, dan unsur penguat (*reinforcement*) menggunakan penguat berserat (*fibrous reinforcement*) yang lebih spesifik yaitu berupa serat kaca (*glass fiber*).

Material pasangan tradisional adalah material yang digunakan sebagai pasangan di saluran irigasi yang senyawanya terbuat dari proses pencampuran pasta (air dan semen) dengan unsur material alam berupa material galian Golongan C (seperti pasir, kerikil, batu belah dan/atau tanah).

Material pasangan alternatif adalah material yang digunakan sebagai pasangan di saluran irigasi yang senyawanya tidak terbuat dari proses pencampuran pasta (air dan semen) dengan unsur material alam berupa material galian Golongan C (seperti pasir, kerikil, batu belah dan/atau tanah).

Modernisasi irigasi adalah strategi gabungan dari manajerial kelembagaan dan perubahan teknologi dengan tujuan untuk mengubah dari mode operasi yang berorientasi pasokan (*supply*) ke layanan.

Modernisasi irigasi di Indonesia adalah upaya mewujudkan sistem pengelolaan irigasi partisipatif yang berorientasi pada pemenuhan tingkat layanan irigasi secara efektif, efisien dan berkelanjutan dalam rangka mendukung ketahanan pangan dan air, melalui peningkatan keandalan penyediaan air, prasarana, pengelolaan irigasi, institusi pengelola, dan sumber daya manusia.

Operasi jaringan irigasi adalah upaya pengaturan air irigasi dan pembuangannya, termasuk kegiatan membuka-menutup pintu bangunan irigasi, menyusun rencana tata tanam, menyusun sistem golongan, menyusun rencana pembagian air, melaksanakan kalibrasi pintu/bangunan, mengumpulkan data, memantau, dan mengevaluasi.

Pasangan (*lining*) adalah suatu lapisan pelindung yang digunakan untuk melapisi dasar dan/atau dinding saluran induknya.

Pasangan batu adalah suatu bagian dari konstruksi bangunan yang dibuat dari susunan/tumpukan batu belah (umumnya dari pecahan batu *boulder* dengan dimensi yang relatif besar) dimana diantara susunan batu belah tersebut diisi dengan mortar (campuran air, semen, dan pasir) sebagai bahan pengikatnya.

Pasangan beton adalah suatu bagian dari konstruksi bangunan yang dibuat dari beton (campuran air, semen, pasir, dan agregat kasar).

Pasangan ferosemen adalah adalah suatu tipe dinding beton bertulang tipis (3 cm) yang dibuat dari mortar semen hidrolis dengan perbandingan campuran 1 semen: (2 - 3) pasir, diberi tulangan baja (diameter ≤ 6 mm) dengan lapisan kawat anyam (*wiremesh*) ukuran ≤ 1 mm, secara menerus dan rapat.

Pasangan tanah adalah adalah suatu tipe pasangan yang terbuat dari campuran pasta (air + semen) dan tanah dengan campuran 1 semen: (5 - 6) tanah, dan selanjutnya dipadatkan secara berlapis.

PBIAS (Percent bias) adalah salah satu metode statistik yang digunakan untuk mengukur kecenderungan rata-rata nilai konstituen yang disimulasikan menjadi lebih besar atau lebih kecil dibandingkan dengan data yang diukur.

Pengembangan jaringan irigasi adalah pembangunan jaringan irigasi baru dan/atau peningkatan jaringan irigasi yang sudah ada.

Pengelolaan jaringan irigasi adalah kegiatan yang meliputi operasi, pemeliharaan, dan rehabilitasi jaringan irigasi di daerah irigasi.

Peningkatan jaringan irigasi adalah kegiatan meningkatkan fungsi dan kondisi jaringan irigasi yang sudah ada atau kegiatan menambah luas areal pelayanan pada jaringan irigasi yang sudah ada dengan mempertimbangkan perubahan kondisi lingkungan daerah irigasi.

Pembangunan jaringan irigasi adalah seluruh kegiatan penyediaan jaringan irigasi di wilayah tertentu yang belum ada jaringan irigasinya.

Pemberian air irigasi adalah kegiatan menyalurkan air dengan jumlah tertentu dari jaringan primer atau jaringan sekunder ke petak tersier.

Pemeliharaan jaringan irigasi adalah upaya menjaga dan mengamankan jaringan irigasi agar selalu dapat berfungsi dengan baik guna memperlancar pelaksanaan operasi dan mempertahankan kelestariannya.

Perencanaan hidrolis adalah perhitungan hidrolis untuk menetapkan dimensi bangunan atau saluran air.

Pilot project adalah penerapan terbatas (untuk teknologi) atau pelaksanaan kegiatan percontohan yang dirancang sebagai pengujian atau *trial* dalam rangka menunjukkan efektivitas suatu pelaksanaan program.

Polimer adalah rantai berulang dari atom yang panjang yang terbentuk dari pengikat berupa molekul identik yang disebut monomer. Biasanya merupakan organik (memiliki rantai karbon) dan contoh paling terkenal dari polimer adalah plastik.

Polimer termoset adalah polimer ikatan-silang (*cross-linking*) yang telah mengalami reaksi kimia yang tak-dapat-kembali (*irreversible*) untuk secara permanen menghubungkan semua rantai molekul. Tipikal dari polimer termoset ini meliputi resin *epoxy*, *polyester*, *vinylester* dan *phenolic*.

Polimer termoplastik adalah polimer linier atau bercabang, dengan rantai molekul yang dihubungkan atau dibentuk oleh ikatan antar-molekul yang lemah. Tipikal polimer termoplastik ini meliputi resin *polyethylene*, *polycarbonate*, *nylon*, *polyether-ether ketone*.

Pultrusion adalah suatu metode pembuatan komposit dimana untaian serat kontinu ditarik melalui rendaman resin dan selanjutnya dikonsolidasikan dalam suatu cetakan yang dipanaskan (*heated die*).

Rehabilitasi jaringan irigasi adalah kegiatan perbaikan jaringan irigasi guna mengembalikan fungsi dan pelayanan irigasi seperti semula.

Saluran pasangan (*lined channel*) adalah suatu saluran terbuka yang diberi pasangan (*lining*) dari suatu material protektif yang kedap (seperti pasangan

batu, beton, dan lain-lain) dengan fungsi utama untuk mencegah atau mengurangi kehilangan air akibat terjadinya kebocoran pada badan saluran.

Spray-up adalah suatu metode pembuatan komposit cetakan terbuka (*open mold composite*) yang hampir serupa dengan metode *hand lay-up*. Namun, metode ini menggunakan penyemprot-tangan (*handgun*) dengan cara menyemprotkan resin dan serat cincang (*chopped fibers*) pada cetakan.

Validasi model adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan sejauh mana model merupakan representasi yang akurat dari dunia nyata, tergantung pada tujuan penggunaan model tersebut.

Verifikasi model adalah suatu metode yang digunakan untuk memastikan bahwa implementasi model secara akurat mencerminkan deskripsi konseptual model dan solusi untuk model tersebut.

Waviness adalah ketidakteraturan panjang gelombang permukaan material dan termasuk dalam kekasaran makro.

Definisi dan istilah lainnya akan ditambahkan apabila dalam proses penyelesaian penelitian ini dijumpai adanya istilah-istilah lain yang dianggap penting untuk dijelaskan.

G. Sistematika Laporan / Pembahasan

Laporan penelitian ini disusun dalam 5 (lima) bab, dengan sistematika pembahasan laporan sebagai berikut (Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, 2018):

1) Bab I - Pendahuluan

Pada bagian ini menjelaskan mengenai latar belakang terkait mengapa penelitian ini perlu dilakukan, perumusan masalahnya, tujuan yang diharapkan dari penelitian ini, kegunaan yang diharapkan dari penelitian ini, ruang lingkup atau batasan yang digunakan dalam penelitian ini, definisi dan istilah yang digunakan dalam penelitian ini, dan sistematika pembahasan yang dilakukan dalam penulisan laporan penelitian ini.

2) Bab II - Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini memuat uraian dan kajian tentang teori, pemikiran, dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya penelitian yang dilakukan. Rujukan yang disampaikan bersumber dari jurnal ilmiah, buku teks, dan juga dari situs internet (*website*). Tinjauan Pustaka memuat beberapa kajian terkait dengan latar belakang, permasalahan, tujuan, dan metode penelitian yang ada hubungannya dengan penelitian ini.

3) Bab III - Metode Penelitian

Bagian ini menguraikan hal-hal terkait dengan rancangan penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian, teknik pengumpulan dan pengolahan data, dan teknik analisis data, serta analisis kinerja model melalui proses validasi, verifikasi, dan kalibrasi model fisik dengan model matematik.

4) Bab IV – Hasil Penelitian dan Pembahasan

Bagian ini memuat hal-hal pokok yang berkaitan dengan hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu hasil kajian dan pembahasan terkait dengan dengan proses manufaktur dan karakteristik material *GFRP*, hasil kajian dan pembahasan terkait dengan kinerja model, hasil kajian dan pembahasan terkait dengan karakteristik aliran, dan hasil kajian dan pembahasan terkait dengan nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning.

5) Bab V – Penutup

Bagian ini menyampaikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini dan saran-saran yang akan diberikan kepada peneliti lainnya dalam rangka menyempurnakan hasil penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Kajian Kriteria Perencanaan Irigasi di Indonesia

Pembangunan irigasi di Indonesia sudah berlangsung sejak jaman prasejarah dan berdasarkan catatan sejarah, keberadaan saluran irigasi di Indonesia sudah ada sejak abad ke VIII. Pada masa pemerintahan kolonial Belanda, pembangunan irigasi di Indonesia mulai berkembang dengan diterapkannya teknologi pengairan dalam perencanaan dan pembangunannya. Pasca kemerdekaan Indonesia, ilmu-ilmu dasar teknik pengairan warisan pemerintah kolonial Belanda tersebut masih diterapkan dan selanjutnya dikembangkan oleh ahli-ahli pengairan di Indonesia (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2018).

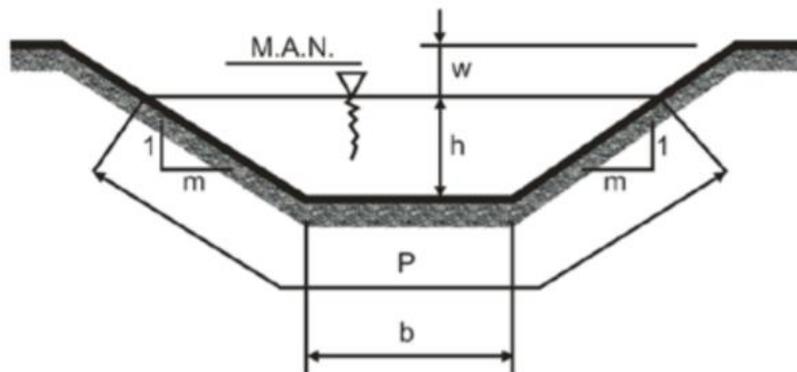
Pada tahun 1986, Departemen Pekerjaan Umum melalui Direktorat Jenderal Pengairan menerbitkan buku Standar Perencanaan Irigasi yang tujuannya agar didapat efisiensi dan keseragaman dalam kegiatan perencanaan pembangunan irigasi di Indonesia. (Direktorat Irigasi I, 1986).

Pada tahun 2013, Kementerian Pekerjaan Umum melalui Direktorat Jenderal Sumber Daya Air menerbitkan revisi Buku Standar Perencanaan Irigasi edisi tahun 1986 tersebut dengan Buku Standar Perencanaan Irigasi edisi tahun 2013 dan hingga saat ini buku tersebut dijadikan sebagai rujukan dan panduan dalam perencanaan pembangunan irigasi di Indonesia. Standar Perencanaan Irigasi merupakan merupakan suatu standar yang harus dipakai oleh badan-badan di lingkungan Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. Badan-badan lainnya di Indonesia yang mempunyai kepentingan dalam pembangunan irigasi, dianjurkan juga untuk memakai standar ini. Perencanaan saluran irigasi di Indonesia mengacu pada Buku KP-03 tentang Saluran dan KP-05 tentang Petak Tersier. KP-03 hanya mencakup kegiatan perencanaan sistem jaringan utama (*main system*) yaitu saluran primer dan saluran sekunder sedangkan kegiatan perencanaan untuk saluran tersier

dan kuarter disajikan dalam KP-05 tentang Petak Tersier (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013a).

B. Kajian Perencanaan Hidrolis untuk Saluran Irigasi di Indonesia

Untuk perencanaan hidrolis pada suatu ruas saluran (Gambar 8), aliran air di saluran irigasi dianggap tetap (*steady*), dan untuk itu ditetapkan Rumus Strickler (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b):



Gambar 8. Parameter hidrolis pada potongan melintang saluran trapesium (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013b)

$$v = k R^{2/3} I^{1/2} \quad (16)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (17)$$

$$A = (b + mh)h \quad (18)$$

$$P = (b + 2h \sqrt{1 + m^2}) \quad (19)$$

$$Q = v \times A \quad (20)$$

dimana:

Q = debit aliran air di saluran (m^3/s);

v = kecepatan aliran air di saluran (m/s);

A = luas penampang basah aliran air di saluran (m^2);

R = jari-jari hidrolis aliran air di saluran (m);

P = keliling basah aliran air di saluran (m);

b = lebar dasar saluran (m);

h = kedalaman aliran air di saluran (m);

I = kemiringan dasar saluran;

k = koefisien kekasaran Strickler ($m^{1/3}/s$);

m = faktor kemiringan talut/dinding saluran (1 vertikal: m horizontal);

w = *working* (tinggi jagaan / *freeboard*) (m).

C. Kajian Penggunaan Pasangan (*Lining*) di Saluran Irigasi di Indonesia

1. Penggunaan pasangan pada saluran irigasi di jaringan utama

Penggunaan pasangan pada sistem jaringan irigasi utama (*main system*) di Indonesia tidak hanya dilakukan pada pembangunan suatu daerah irigasi yang baru, namun dilakukan juga untuk kegiatan rehabilitasi daerah irigasi yang sudah ada (*existing*). Modernisasi Irigasi di Indonesia merekomendasikan agar pelaksanaan rehabilitasi saluran irigasi dilakukan tidak hanya sebatas dengan melakukan normalisasi penampang saluran, namun juga dilanjutkan dengan pemberian pasangan pada saluran yang telah dinormalisasi tersebut (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2011).

2. Penggunaan pasangan pada saluran irigasi tersier

Saluran tersier sebaiknya diberi pasangan (*lining*) bila kehilangan air akibat perkolasi akan tinggi atau kemiringan tanah lebih dari 1,0 sampai 1,5%. Dengan pemberian pasangan, kemiringan saluran dapat diperbesar. Pasangan juga bermanfaat untuk mengurangi kehilangan air akibat rembesan atau memantapkan stabilitas tanggul. Saluran irigasi kuarter tidak pernah diberi pasangan karena para petani diperbolehkan mengambil air dari saluran ini (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013c).

Salah satu contoh penggunaan pasangan pada saluran tersier adalah pada kegiatan Pembangunan Jaringan Irigasi Tersier pada Daerah Irigasi Batang Anai (13.600 ha) di Kabupaten Padang Pariaman Provinsi Sumatera Barat pada tahun

anggaran 2013 – 2016 yang dilaksanakan oleh Balai Wilayah Sungai (BWS) Sumatera V – Ditjen Sumber Daya Air – Kementerian PUPR (Nippon Koei Co. Ltd., 2017). Pada kegiatan ini, terdapat beberapa kasus yang menyebabkan saluran irigasi tersier pada daerah irigasi tersebut perlu diberi pasangan.

Pada kasus pertama, penggunaan pasangan pada saluran tersier dilakukan karena dijumpai adanya kondisi tanah pada trase (jalur) saluran berupa lapisan tanah yang *porous*. Lapisan tanah yang *porous* ini dijumpai pada sebagian besar lahan yang berada pada kawasan pesisir (sekitar pantai), dimana kondisi lapisan tanahnya berupa tanah berpasir dan pada beberapa tempat dijumpai juga lapisan tanah bergambut tipis. Dari hasil pengambilan dan pengujian *sample* (contoh) tanah, diprediksi kondisi lapisan tanah tersebut akan menimbulkan laju kehilangan air yang tinggi akibat terjadinya rembesan di sepanjang trase saluran tersebut. Sehingga pada kasus ini diputuskan untuk digunakan pasangan (*lining*) pada saluran tersier tersebut, yaitu berupa konstruksi pasangan beton pracetak dengan penampang saluran berbentuk trapesium. Gambar 9 memperlihatkan foto dokumentasi pengambilan *sample* tanah dan penggunaan pasangan beton pracetak pada pelaksanaan pembangunan saluran tersier tersebut.



Gambar 9. Pengambilan sampel tanah dan penggunaan pasangan (*lining*) di saluran irigasi tersier dengan menggunakan pasangan beton pracetak (pada dasar dan dinding saluran)

Pada kasus kedua, penggunaan pasangan pada saluran tersier dilakukan karena trase saluran melewati kawasan permukiman. Hal ini dilakukan untuk menghindari resiko kerusakan dan gangguan pada saluran tersier akibat adanya aktifitas sehari-hari masyarakat yang berada di sekitar kawasan permukiman

tersebut. Sehingga pada kasus kedua ini diputuskan juga untuk menggunakan pasangan pada trase saluran tersier tersebut, yaitu berupa konstruksi pasangan beton pracetak dengan penampang saluran berbentuk trapesium. Gambar 10 memperlihatkan foto dokumentasi penggunaan pasangan beton pracetak pada pelaksanaan pembangunan saluran irigasi tersier tersebut.



Gambar 10. Foto dokumentasi contoh kondisi trase saluran tersier yang melewati kawasan permukiman dan penggunaan pasangan (*lining*) di saluran irigasi tersier dengan menggunakan pasangan beton pracetak (pada dasar dan dinding saluran)

3. Uji coba penerapan teknologi kanvas beton

Kanvas beton (*Concrete Canvas™*) merupakan produk material baru yang dibuat pada tahun 2005 oleh Brewin dan Crawford © di Inggris. Selain Inggris, Tiongkok juga adalah negara yang mengembangkan teknologi ini. Material kanvas beton termasuk dalam jenis *Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM)*, yang merupakan kombinasi antara geotekstil dengan semen, yaitu suatu serat kain fleksibel yang di dalamnya memerangkap semen yang akan mengeras saat disiram dengan air untuk membentuk lapisan beton tipis yang kuat, kedap air, dan tahan api. Setelah dua jam penyiraman air (hidrasi) pada kanvas beton (Gambar 11), maka proses pembentukan menjadi beton mulai bekerja dan akan optimal setelah 24 jam (Prima Minechem Indonesia, 2019 dalam Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, 2019).

Kanvas beton memungkinkan pembuatan beton tanpa memerlukan penggunaan *mixer plant* atau alat pencampur beton. Kanvas beton bersifat fleksibel

dan memiliki mobilitas tinggi karena wujudnya berupa gulungan yang bersifat elastis, sehingga mudah dibawa dan dibentuk/disesuaikan dengan bidang saluran yang akan dilapisi. Setelah proses hidrasi, kanvas beton akan mengeras menjadi lapisan beton yang kedap air sehingga permasalahan seperti rembesan/kebocoran, erosi/gerusan, serta merajalelanya tumbuhan air pada saluran dapat dihindari. Selain itu, nilai estetika pada saluran yang dipasang kanvas beton akan lebih baik dibandingkan dengan saluran tanah. Karakteristik tersebut membuat penggunaan material kanvas beton sebagai saluran pasangan relatif lebih mudah dan lebih cepat dibandingkan dengan material lain (Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, 2019).



Gambar 11. Penggunaan teknologi kanvas beton tipe CC Hydro TM sebagai pasangan (*lining*) di dinding saluran (Concrete Canvas [®])

Pada tahun 2019 Balai Litbang Rawa – Balitbang – Kementerian PUPR melakukan uji coba penerapan teknologi kanvas beton tersebut melalui kegiatan yang berjudul *Pilot Project Penerapan Teknologi Kanvas Beton dalam Mendukung Modernisasi Irigasi pada Lahan Rawa*. Lokasi pekerjaan terletak di Kampung Sagare, Kabupaten Asmat, Provinsi Papua Selatan. Lokasi uji coba dilaksanakan pada suatu kawasan sistem irigasi rawa terintegrasi yang sebelumnya telah dibangun pada tahun 2017. Kondisi saluran *existing* masih berupa saluran tanah pada lahan rawa yang bergambut sehingga mengakibatkan terjadinya kehilangan air yang besar di sepanjang saluran irigasi tersebut. Upaya penerapan teknologi konvensional (pasangan batu, pasangan beton, atau beton ferosemen) untuk pekerjaan

pasangan pada saluran irigasi tersebut mengalami beberapa kendala. Kendala yang pertama adalah sulitnya memperoleh material dasar konstruksi (pasir, agregat, dan batu) di sekitar lokasi pekerjaan. Kendala yang kedua adalah lokasi pekerjaan yang terletak pada daerah terpencil dengan kondisi akses yang sulit sehingga diestimasi akan menimbulkan biaya yang mahal apabila akan mendatangkan bahan dasar konstruksi dari luar lokasi pekerjaan. Foto dokumentasi penerapan teknologi kanvas beton di Kampung Sagare, Kabupaten Asmat, Provinsi Papua Selatan pada tahun 2019 tersebut disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Penerapan pasangan (*lining*) di saluran irigasi rawa dengan menggunakan pasangan kanvas beton (Puslitbang Sumber Daya Air, 2019)

Teknologi kanvas beton (*concrete canvas*) mempunyai kelebihan efektif untuk digunakan pada lokasi-lokasi pekerjaan yang terpencil (*remote area*), atau pada lokasi pekerjaan dengan kondisi akses yang sulit, atau juga pada lokasi pekerjaan yang sulit untuk mendapatkan sumber atau mendatangkan material dasar (seperti pasir dan batu kali) sebagai bahan baku pembuatan konstruksi pasangan tradisional yang umum dilakukan selama ini. Secara efektifitas pelaksanaan, penggunaan teknologi kanvas beton ini terlihat lebih praktis, namun tentu saja perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk menghitung efisiensi biaya antara kedua jenis produk pasangan tersebut. Selain itu juga, produk kanvas beton tersebut saat ini masih merupakan produk import, dan hal ini dipandang tidak sesuai dengan kebijakan pemerintah Indonesia yang saat ini lebih memprioritas untuk menggunakan produk dalam negeri.

D. Kajian Klasifikasi dan Karakteristik Aliran Air

1. Definisi dan sifat fluida

Menurut Salam, N. dan Tarakka, R. (2021), fluida didefinisikan sebagai zat yang berdeformasi terus menerus selama dipengaruhi suatu tegangan geser. Sebuah tegangan geser terbentuk apabila sebuah gaya tangensial bekerja pada suatu permukaan. Apabila benda-benda padat biasa, seperti baja atau logam, dikenai oleh suatu tegangan geser, mula-mula benda ini akan berdeformasi (biasanya sangat kecil) tetapi tidak akan terus menerus berdeformasi atau mengalir. Namun, zat cair biasa (seperti air atau minyak) atau gas (seperti udara) memenuhi definisi dari sebuah fluida. Artinya, zat-zat tersebut akan mengalir apabila pada zat tersebut bekerja suatu tegangan geser.

Ditinjau dari hubungan antara tegangan geser dan gradien kecepatan maka fluida dapat diklasifikasikan dalam fluida Newtonian dan Fluida non-Newtonian. Fluida Newtonian adalah fluida yang menunjukkan hubungan yang linier antara tegangan geser dan gradien kecepatan. Beberapa jenis fluida biasa, seperti air dan minyak, merupakan fluida Newtonian. Fluida non-Newtonian adalah fluida yang menunjukkan hubungan yang tak linier antara tegangan geser dan gradien kecepatan. Fluida-fluida non-Newtonian diklasifikasikan sebagai dilatan, pseudoplastik, dan plastik ideal (Salam, N. dan Tarakka, R., 2021).

2. Klasifikasi aliran air di dalam saluran (*conduit*)

Aliran air di dalam suatu saluran (*conduit*) dapat diklasifikasikan menjadi aliran saluran-terbuka (*open-channel flow*) atau aliran pipa (*pipe flow*). Perbedaan mendasar antara aliran air pada saluran terbuka dengan aliran air pada pipa adalah adanya efek permukaan bebas (*free surface*) pada saluran terbuka yang dipengaruhi oleh adanya tekanan atmosfer. Pada aliran pipa yang tidak terisi air secara penuh (sehingga masih ada rongga udara) maka sifat dan karakteristik alirannya adalah mirip dengan aliran pada saluran terbuka (Chow, V.T., 1959; Salam, N. dan Tarakka, R., 2021).

Karakteristik aliran air di saluran terbuka adalah rumit karena kondisi permukaan aliran air cenderung berubah terhadap ruang dan waktu dan juga kondisi kedalaman aliran, debit, dan kemiringan dasar saluran, serta permukaan bebasnya saling berkaitan (Chow, V.T., 1959).

3. Beberapa klasifikasi aliran air di saluran terbuka

Aliran di saluran terbuka dapat diklasifikasikan dalam berbagai jenis. Klasifikasi berikut ini dibuat berkaitan dengan perubahan kedalaman aliran terhadap ruang dan waktu (Chow, V.T., 1959).

a. *Steady dan unsteady flow*: waktu sebagai kriteria

Aliran di saluran terbuka disebut tunak/tetap (*steady*) jika kedalaman aliran air tidak berubah (atau dapat diasumsikan konstan) selama interval waktu tertentu. Aliran air disebut tak-tunak (*unsteady*) jika kedalaman aliran berubah terhadap waktu. Permasalahan aliran air di saluran terbuka banyak terjadi pada kondisi aliran tunak (*steady*) sehingga sangat perlu dilakukan pemahaman tentang perilaku kondisi aliran tunak tersebut.

b. *Uniform flow dan varied flow*: ruang sebagai kriteria

Aliran air di saluran terbuka disebut seragam (*uniform*) jika kedalaman aliran adalah sama pada setiap ruas penampang saluran. Aliran air disebut berubah (*varied*) jika kedalaman aliran berubah di sepanjang ruas penampang saluran.

c. *Steady uniform flow*

Aliran seragam yang tunak (*steady uniform flow*) adalah tipe aliran pokok yang perlu dicermati dalam hidrolika saluran terbuka. Kedalaman aliran tidak berubah selama interval waktu tertentu dan juga permukaan airnya tetap paralel dengan kemiringan dasar di sepanjang saluran.

4. Karakteristik aliran air di saluran terbuka

Perilaku atau karakteristik aliran saluran-terbuka pada dasarnya ditentukan oleh efek viskositas dan gravitasi relatif terhadap gaya-gaya inersia dari aliran. Tegangan permukaan air dapat mempengaruhi perilaku aliran dalam keadaan

tertentu, tetapi tidak memainkan peran penting dalam kebanyakan masalah saluran terbuka yang dihadapi dalam perancangan (Chow, V.T., 1959).

a. Karakteristik aliran sebagai efek viskositas

Berdasarkan pengaruh viskositas relatif terhadap inersia, karakteristik aliran air dapat berupa aliran laminar, turbulen, atau transisi. Aliran disebut laminar jika gaya-gaya viskos begitu kuat relatif terhadap gaya-gaya inersia sehingga viskositas memainkan peran penting dalam menentukan perilaku aliran. Pada aliran laminar, partikel air tampak bergerak dalam suatu jalur yang mulus (*smooth*) tertentu, atau suatu garis arus (*streamlines*), dan lapisan cairan yang sangat tipis tampak sedikit di atas lapisan yang bersebelahan.

Aliran disebut turbulen jika gaya-gaya viskosnya lemah relatif terhadap gaya-gaya inersia. Dalam aliran turbulen, partikel-partikel air bergerak dalam jalur-jalur tidak beraturan yang tidak mulus maupun tetap, tetapi secara agregat masih merupakan gerak maju dari keseluruhan aliran.

Antara kondisi aliran laminar dan turbulen terdapat suatu kondisi aliran campuran (*mixed flow*), atau disebut aliran transisi.

Efek viskositas relatif terhadap inersia dapat direpresentasikan dengan bilangan Reynold, yang dinyatakan dalam bentuk:

$$R_e = \frac{vL}{\nu} \quad (21)$$

dimana v adalah kecepatan aliran (m/s); L adalah panjang karakteristik (m), yang setara dengan nilai jari-jari hidrolis R dari saluran (*conduit*); dan ν (baca: nu) adalah viskositas kinematik air dalam satuan m^2/s . Viskositas kinematik adalah sama dengan viskositas dinamik μ (baca: mu) dalam satuan $N.s/m^2$ dibagi dengan rapat massa air ρ (kg/m^3). Untuk air pada suhu $20^\circ C$, nilai $\mu = 1,002 \times 10^{-3} N.s/m^2$ dan $\rho = 998,2 kg/m^3$; dan untuk itu $\nu = 1,0004 \times 10^{-6} m^2/s$ (Chow, V.T., 1959; Salam, N. dan Tarakka, R., 2021).

Untuk perhitungan bilangan Reynold di saluran terbuka maka Persamaan (21) dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$R_e = \frac{vR}{\nu} \quad (22)$$

Suatu aliran saluran-terbuka disebut laminar jika bilangan Reynold R_e -nya kecil dan turbulen jika R_e -nya besar. Berbagai eksperimen sebelumnya menunjukkan bahwa aliran dalam suatu pipa berubah dari laminar ke turbulen dalam kisaran suatu nilai kritis (*critical value*) R_e sebesar 2.000 hingga suatu nilai R_e yang dapat mencapai 50.000; namun perlu dicatat bahwa sesungguhnya tidak ada batas atas yang pasti untuk nilai R_e . Dalam uji eksperimental tersebut, diameter pipa diambil sebagai panjang karakteristik (*characteristic length*) untuk mendefinisikan bilangan Reynold. Untuk aliran saluran-terbuka, ketika jari-jari hidrolis R diambil sebagai pengganti panjang karakteristik L , nilai yang sesuai untuk R_e adalah pada kisaran 500 hingga 12.500, karena nilai diameter suatu pipa adalah 4 (empat) kali nilai jari-jari hidrolisnya (Chow, V.T., 1959; Lowe, S.A., 2003).

b. Karakteristik aliran sebagai efek gravitasi

Efek gravitasi pada keadaan/karakteristik aliran direpresentasikan oleh rasio dari gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya gravitasi. Rasio ini diberikan dalam bentuk bilangan Froude F_r , yang didefinisikan sebagai (Chow, V.T., 1959):

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (23)$$

dimana v adalah kecepatan aliran rata-rata (m/s); g adalah percepatan gravitasi (m/s^2); dan L adalah panjang karakteristik (m). Dalam aliran saluran-terbuka, panjang karakteristik L dibuat setara dengan kedalaman hidrolis D , yang didefinisikan sebagai luas penampang basah aliran A dibagi dengan lebar permukaan aliran T . Untuk saluran segi-empat (*rectangular*), nilai D setara dengan kedalaman aliran h .

Jika nilai F_r sama dengan 1 (satu), Persamaan (23) menjadi:

$$v = \sqrt{gD} \quad (24)$$

dan aliran dinyatakan dalam kondisi kritis (*critical state*). Jika nilai F_r kurang dari 1 (satu), atau $v < \sqrt{gD}$ maka aliran dinyatakan dalam kondisi subkritis. Pada kondisi ini, peran yang dimainkan oleh gaya gravitasi adalah lebih nyata (dominan); sehingga aliran mempunyai suatu kecepatan yang rendah dan sering dideskripsikan sebagai aliran yang tenang (*tranquil and streaming*). Jika nilai F_r lebih besar dari 1

(satu), atau $v > \sqrt{gD}$ maka aliran dinyatakan dalam kondisi superkritis. Pada kondisi ini, gaya inersia menjadi lebih dominan; sehingga aliran mempunyai kecepatan yang tinggi dan biasanya dideskripsikan sebagai aliran yang cepat (*rapid*), meluncur (*shooting*), dan deras (*torrential*).

Menurut Latif, A.A., dkk. (2019), kriteria untuk menentukan kondisi aliran berdasarkan nilai bilangan Froude (F_r) adalah sebagai berikut:

- 1) Jika nilai $F_r = 1$, aliran dalam kondisi kritis;
- 2) Jika nilai $F_r > 1$, aliran dalam kondisi super-kritis;
- 3) Jika nilai $F_r < 1$, aliran dalam kondisi subkritis.

Dalam mekanika gelombang air, kecepatan kritis \sqrt{gD} diidentifikasi sebagai kecepatan gelombang (*celerity*) dari gelombang gravitasi kecil yang terjadi di air dangkal (*shallow water*) pada saluran sebagai hasil dari setiap perubahan sesaat pada kedalaman lokal dari air. Perlu dicatat bahwa gelombang gravitasi dapat digerakkan (*propagated*) ke hulu dalam air pada kondisi aliran subkritis tetapi tidak dalam air dengan kondisi aliran superkritis; karena untuk kasus aliran subkritis, kecepatan gelombangnya lebih besar dari kecepatan aliran sedangkan dalam kasus aliran superkritis, kecepatan gelombangnya lebih kecil dari kecepatan aliran (Chow, V.T., 1959).

5. Rezim aliran air di saluran terbuka

Suatu efek gabungan dari viskositas dan gravitasi dapat menimbulkan salah satu dari empat rezim aliran (*regimes of flow*) pada saluran terbuka, yang dinamakan: (1) subkritis-laminar, jika nilai F_r kurang dari 1 (satu) dan nilai R_e ada dalam bentang (*range*) keadaan laminar; (2) superkritis-laminar, jika nilai F_r lebih besar dari 1 (satu) dan nilai R_e ada dalam bentang keadaan laminar; (3) superkritis-turbulen, jika nilai F_r lebih besar dari 1 (satu) dan nilai R_e ada dalam bentang keadaan turbulen; (4) subkritis-turbulen, jika nilai F_r kurang dari 1 (satu) dan nilai R_e adalah dalam bentang keadaan turbulen (Chow, V.T., 1959).

Dua rezim aliran yang pertama, subkritis-laminar dan superkritis-laminar, adalah tidak umum dijumpai pada hidrolika saluran-terbuka terapan, karena aliran di saluran umumnya turbulen pada banyak tinjauan permasalahan rekayasa.

E. Kajian Formula Aliran Seragam dan Koefisien Kekasaran Hidrolis Saluran

Aliran dapat diklasifikasikan sebagai aliran seragam apabila mempunyai beberapa ciri pokok sebagai berikut (Chow, V.T., 1959):

- 1) Kedalaman, luas basah, kecepatan, dan debit aliran pada setiap titik ruas penampang saluran adalah konstan;
- 2) Kemiringan garis energi S_f , permukaan air S_w , dan dasar saluran S_o adalah paralel; sehingga kemiringan (*slope*) S untuk ketiga parameter itu adalah sama, atau $S_f = S_w = S_o = S$.

1. Formula umum aliran seragam

Perhitungan hidrolis untuk kecepatan rata-rata dari suatu aliran seragam turbulen (*turbulent uniform flow*) di saluran terbuka biasanya diekspresikan kira-kira dengan apa yang disebut dengan formula aliran-seragam. Pada prakteknya, banyak formula aliran seragam dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan umum sebagai berikut (Chow, V.T., 1959):

$$v = CR^xS^y \tag{25}$$

dimana v = kecepatan aliran rata-rata (m/s); R = jari-jari hidrolis (m); S = kemiringan garis energi; x dan y adalah eksponen; C adalah suatu faktor tahanan aliran (*flow resistance*), yang berubah dan dipengaruhi oleh kecepatan aliran rata-rata, jari-jari hidrolis, kekasaran saluran, kekentalan, dan banyak faktor lainnya.

Telah banyak dikembangkan dan dipublikasikan formula-formula untuk aliran seragam, tapi tidak ada formula yang memenuhi kualifikasi sebagai formula yang baik. Formula yang paling banyak digunakan dan dikenal secara luas adalah formula Chezy dan Manning.

2. Formula Chezy

Pada awal tahun 1769, Insinyur Perancis, Antoine Chezy mengembangkan -mungkin formula aliran seragam yang pertama- formula Chezy yang tersohor yang biasanya diekspresikan sebagai (Chow, V.T., 1959):

$$v = C \sqrt{RS} \quad (26)$$

dimana, v = kecepatan aliran rata-rata (m/s); R = jari-jari hidrolis (m); S = kemiringan garis energi; C adalah suatu faktor tahanan aliran, yang dinamakan koefisien kekasaran Chezy.

3. Formula Manning

Pada tahun 1889, Insinyur Irlandia, Robert Manning mempresentasikan sebuah formula -yang kemudian dimodifikasi menjadi formula saat ini- yang dikenal dengan baik dalam bentuk persamaan (Chow, V.T., 1959):

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (27)$$

dimana v = kecepatan aliran rata-rata (m/s); R = jari-jari hidrolis (m); S = kemiringan garis energi; dan n adalah koefisien kekasaran, yang secara spesifik dikenal sebagai koefisien n Manning. Karena kesederhanaan bentuk formulanya dan hasilnya yang memuaskan serta cocok untuk aplikasi praktis, maka formula Manning telah menjadi formula yang paling banyak digunakan dari semua formula aliran seragam untuk perhitungan aliran di saluran terbuka.

4. Koefisien kekasaran hidrolis saluran

Banyak percobaan yang telah dilakukan secara empiris untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran hidrolis saluran. Nilai koefisien kekasaran hidrolis tersebut dapat diperoleh dari beberapa formula empiris maupun dari data yang diperoleh dari hasil pengujian secara empiris (Chow, V.T., 1959).

a. Rumus empiris

Dalam menentukan nilai koefisien kekasaran Chezy, terdapat tiga formula empiris yang penting, yaitu: (1) formula G. K. (Ganguillet dan Kutter); (2) formula Bazin; (3) formula Powell (Chow, V.T., 1959). Dalam laporan ini hanya akan disajikan satu formula saja sebagai contoh kajian, yaitu formula G. K.

Pada tahun 1869, dua Insinyur Swiss, Ganguillet dan Kutter mempublikasikan suatu formula yang mengekspresikan nilai koefisien kekasaran C Chezy yang dipengaruhi oleh faktor kemiringan dasar saluran S , jari-jari hidrolis R ,

dan koefisien kekasaran hidrolis n Kutter. Dalam Satuan Internasional, formulanya adalah (Chow, V.T., 1959):

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + (23 + \frac{0,00155}{S}) \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (28)$$

b. Data empiris

Dari berbagai penelitian secara empiris untuk berbagai tipe saluran, telah dikumpulkan data empiris untuk nilai koefisien kekasaran hidrolis n Manning. Tabel 3 menyajikan contoh data empiris untuk kisaran penggunaan nilai koefisien kekasaran Manning untuk beberapa tipe saluran dan deskripsinya (Chow, V.T., 1959).

Tabel 3. Contoh beberapa data empiris untuk penggunaan nilai koefisien kekasaran n Manning (Chow, V.T., 1959)

No.	Tipe dan deskripsi saluran	Nilai Koefisien n Manning		
		Minimum	Normal	Maksimum
A.	Saluran tertutup dengan aliran penuh sebagian			
A-1	Nonmetal			
a.	<i>Lucite (acrylic)</i>	0,008	0,009	0,010
b.	<i>Glass</i>	0,009	0,010	0,013
c.	<i>Cement</i>			
	1. <i>Neat, Surface</i>	0,010	0,011	0,013
	2. <i>Mortar</i>	0,011	0,013	0,015
d.	<i>Concrete</i>			
	1. <i>Finished</i>	0,011	0,012	0,014
	2. <i>Unfinished, steel form</i>	0,012	0,013	0,014
	3. <i>Unfinished, smooth wood form</i>	0,012	0,014	0,016
	4. <i>Unfinished, rough wood form</i>	0,015	0,017	0,020

Tabel 3. (lanjutan) Contoh beberapa data empiris untuk penggunaan nilai koefisien kekasaran n Manning (Chow, V.T., 1959)

No.	Tipe dan deskripsi saluran	Nilai Koefisien n Manning		
		Minimum	Normal	Maksimum
B.	Saluran terbuka yang diberi pasangan			
B-1	Nonmetal			
a.	<i>Cement</i>			
	1. <i>Neat, surface</i>	0,010	0,011	0,013
	2. <i>Mortar</i>	0,011	0,013	0,015
b.	<i>Concrete</i>			
	1. <i>Trowel finish</i>	0,011	0,013	0,015
	2. <i>Float finish</i>	0,013	0,015	0,016
c.	<i>Masonry</i>			
	1. <i>Cemented rubble</i>	0,017	0,025	0,030
	2. <i>Dry rubble</i>	0,023	0,032	0,035

c. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai koefisien kekasaran hidrolis saluran

Dalam menerapkan formula Manning atau formula G. K., kesulitan terbesar terletak pada penentuan nilai koefisien kekasaran hidrolis n ; karena tidak ada metode yang pasti dalam pemilihan nilai n tersebut (Chow, V.T., 1959).

Tidak jarang para insinyur menganggap saluran memiliki nilai koefisien kekasaran hidrolis n tunggal untuk semua kejadian atau kasus. Pada kenyataannya, nilai koefisien kekasaran hidrolis n ini sangat bervariasi dan bergantung pada sejumlah faktor. Dalam memilih nilai koefisien kekasaran hidrolis n yang tepat untuk berbagai kondisi desain, pengetahuan dasar tentang faktor-faktor ini akan sangat berguna. Perlu dicatat bahwa faktor-faktor ini sampai batas tertentu saling bergantung. Faktor-faktor yang memberikan pengaruh terbesar pada koefisien kekasaran hidrolis untuk saluran buatan dan saluran alami adalah sebagai berikut (Chow, V.T., 1959):

- 1) Kekasaran permukaan (*surface roughness*);

- 2) Vegetasi;
- 3) Ketidakteraturan saluran (*channel irregularity*);
- 4) *Channel alignment*;
- 5) Endapan dan gerusan;
- 6) Halangan (*obstruction*);
- 7) Ukuran dan bentuk penampang saluran;
- 8) Ketinggian muka air dan debit;
- 9) Perubahan musim;
- 10) Sedimen layang dan sedimen dasar.

Terkait dengan rencana penelitian untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran hidrolis n Manning secara eksperimental dengan perangkat flum berbentuk segiempat yang dilapisi dengan material *GFRP* maka hanya ada dua faktor dari 10 faktor tersebut yang memberikan pengaruh terbesar dalam penentuan nilai koefisien kekasaran hidrolis n Manning tersebut, yaitu (1) faktor kekasaran permukaan material *GFRP*, dan (2) faktor ketinggian muka air dan debit.

Apabila nilai koefisien koefisien kekasaran hidrolis n Manning telah dapat ditentukan maka nilai koefisien kekasaran hidrolis C Chezy dan k Strickler dapat dihitung dengan dengan persamaan:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (29)$$

$$k = \frac{1}{n} \quad (30)$$

Karena salah satu faktor yang memberikan pengaruh yang besar dalam penentuan nilai koefisien kekasaran hidrolis Manning adalah faktor kekasaran permukaan material maka pada subbab berikutnya akan dilakukan kajian terkait dengan kekasaran permukaan material.

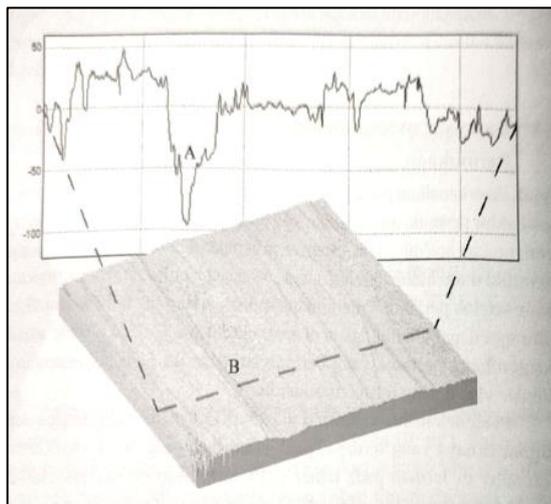
F. Kajian Kekasaran Permukaan Material

1. Tekstur dan kekasaran permukaan material

Menurut Muflikhun, M. A. (2022), kekasaran permukaan merupakan salah satu komponen tekstur permukaan dan berperan penting dalam menentukan suatu

benda akan berinteraksi dengan lingkungannya. Kekasaran adalah indikator yang sering digunakan dalam menilai kinerja potensial suatu komponen mekanis, karena ketidakteraturan pada permukaannya dapat menyebabkan atau membentuk lubang nukleasi yang selanjutnya dapat menyebabkan retak (*crack*).

Menurut Muflikhun, M. A. (2022), American Society of Tool and Manufacturing Engineerings (ASTME) mendefinisikan kekasaran sebagai ketidakteraturan yang lebih halus pada tekstur permukaan. Tekstur permukaan adalah penyimpangan berulang atau acak dari permukaan nominal yang membentuk topografi tiga dimensi dari permukaan. Tekstur permukaan meliputi 1) kekasaran (kekasaran nano dan mikro), 2) *waviness*, 3) *lay*, dan 4) kecacatan. Gambar 13 adalah contoh dari tekstur permukaan dengan *lay* searah.



Gambar 13. Contoh tekstur permukaan dengan *lay* searah (Townsend, A., et al., 2016 dalam Muflikhun, M. A., 2022)

2. Analisis mikrometrologi

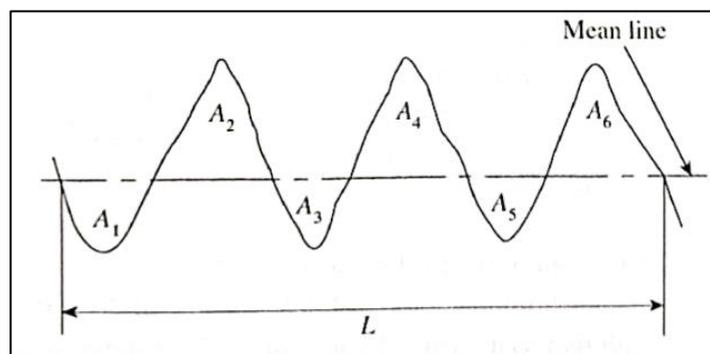
Penetapan nilai numerik pada besaran kekasaran permukaan penting dilakukan untuk mengukur derajatnya dan membandingkan kekasaran permukaan satu dengan lainnya. Hal ini akan memungkinkan analisis untuk menilai apakah kualitas permukaan memenuhi persyaratan fungsional dari sebuah komponen. Menurut Technical Committee ISO (1996) dalam Muflikhun, S. (2022), beberapa parameter yang dihasilkan menurut standar EN ISO 4287 adalah sebagai berikut:

- 1) *Height average value* (R_c);
- 2) *Root mean square value* (R_q);
- 3) *Centre line average value* (R_a);
- 4) Ketinggian maksimum dari profil kekasaran (R_p);
- 5) Kedalaman maksimum dari profil kekasaran (R_v);
- 6) Total ketinggian dari profil kekasaran (R_t).

R_a adalah parameter kuantifikasi yang paling banyak digunakan dalam pengukuran tekstur permukaan. R_a juga telah dikenal di masa lalu sebagai rata-rata garis tengah (*Center Line Average / CLA*) atau jika di Amerika Serikat disebut sebagai rata-rata aritmatika (AA) seperti yang disajikan dalam Gambar 14. R_a adalah nilai rata-rata aritmatika dari keberangkatan profil dari garis rata-rata dalam panjang *sampling*, yang dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |z_i| \quad (31)$$

dimana, z adalah tinggi dari garis rata-rata atau *mean line* yang diilustrasikan pada Gambar 14.

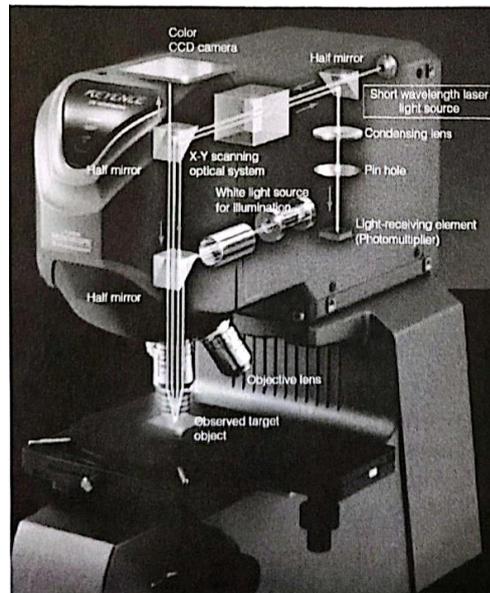


Gambar 14. Ilustrasi kekasaran permukaan untuk parameter R_a (Muflikhun, M. A., 2022)

3. Alat ukur mikrometrologi permukaan

Mikrometrologi permukaan dapat dilakukan dengan berbagai macam instrumen, salah satunya adalah dengan menggunakan mikroskop laser. Salah satu tipe dari mikroskop laser adalah Mikroskop *3D laser scanning* (Gambar 15), yaitu suatu peralatan pengamatan/pengukuran yang memungkinkan pengukuran *3D* dan

pengamatan ketebalan suatu benda pada saat bersamaan (Czichos, H., et al., 2011 dalam Muflikhun, S., 2022).



Gambar 15. Ilustrasi dari *3D laser scanning microscope* (Townsend, A., et al., 2016 dalam Muflikhun, S., 2022)

Pengukuran dengan alat ini tidak memiliki batasan pada ukuran atau bahan sampel dan memungkinkan pengamatan dalam kondisi lingkungan yang normal. Selain itu, Mikroskop *3D laser scanning* juga memiliki fitur pengoperasian yang mudah digunakan. Pengamatan dapat dilakukan dalam tampilan warna yang membantu analisis akurat dari kondisi obyek target. Mikroskop ini juga dapat digunakan untuk mengukur ketebalan film, serta untuk mengamati permukaan, bagian dalam, dan sisi belakang obyek tembus pandang.

G. Kajian Pembuatan Material *Glass Fiber Reinforced Polymer*

1. Material komposit dan material komposit tingkat lanjut

Menurut Estrada, H. and Lee, L.S. (2013), material komposit adalah material yang terdiri dari dua atau lebih bagian (*part*) yang berbeda. Dalam kasus material komposit tingkat-lanjut (*Advance Composite Material*), bahan matriks atau

serat saja memiliki nilai struktural yang terbatas. Matriks dari suatu komposit berfungsi untuk mengikat penguat (*reinforcement*) dan bersama-sama membentuk struktur komposit dan melindungi penguat dari kerusakan fisik dan serangan kimia; sedangkan serat memberikan kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*). Oleh karena itu, kombinasi bahan serat dan matriks memberikan efek sinergis pada sifat mekanik secara keseluruhan.

Menurut Estrada, H. and Lee, L.S. (2013), suatu material komposit tingkat-lanjut terdiri dari satu atau lebih fase diskontinu (berupa penguat/*reinforcement*) yang terikat dalam fase kontinu (berupa matriks/*matrix*) dengan suatu bidang-pertemuan (*interface*) di antara keduanya. *Matrix* biasanya berupa polimer (*polymer*), logam (*metal*), atau keramik (*ceramic*). Pemilihan material matriks seringkali dipengaruhi oleh kinerja temperatur komposit yang dibutuhkan; polimer biasanya dipilih untuk suhu yang lebih rendah dan keramik digunakan dalam aplikasi suhu tinggi.

Menurut Estrada, H. and Lee, L.S. (2013), komposit yang diperkuat serat, atau berserat (*fibrous*), memiliki sifat-sifat yang terutama berasal dari penguat (*reinforcement*). Karena adanya penguat, komposit berserat biasanya kuat (*strong*), kaku (*stiff*), dan tangguh (*tough*) serta dapat bekerja dengan baik pada suhu tinggi. Jenis penguat berserat yang paling umum digunakan adalah serat kaca, karbon, dan aramid.

Menurut Hollaway, L.C. (2010), dalam Rekayasa Sipil, material komposit polimer tingkat-lanjut (*advance polymer composite / APC*) umumnya mengacu pada material polimer yang diperkuat dengan serat (*fibre reinforced polymer / FRP*). Material komposit tersebut terdiri dari serat yang kaku dan berkekuatan tinggi yang diproteksi oleh suatu polimer *thermoset* yang berkinerja tinggi (*high-performance*)

2. Senyawa penyusun material *Glass Fiber Reinforced Polymer*

Menurut Masuelli, M.A. (2013), *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*, atau disebut juga *Fiber Reinforced Plastic*, adalah suatu material komposit yang terbuat dari matriks polimer yang diperkuat (*reinforced*) dengan serat (*fiber*). Serat-serat

tersebut biasanya terbuat dari kaca (*glass*), karbon (*carbon*), atau *aramid*. Polimer yang digunakan biasanya berjenis *thermosetting plastic* yaitu berupa resin epoksi (*epoxy*), vinilester (*vinylester*) atau polyester (*polyester*). Serat kaca (*glass fibers / GF*) paling banyak digunakan di antara semua serat sintesis karena memberikan sifat-sifat yang sangat baik dari sisi kekuatan dan daya tahan, stabilitas termal, ketahanan terhadap benturan, bahan kimia, gesekan, dan keausan.

Menurut Estrada, H. dan Lee, L.S. (2013) karena harganya yang lebih murah, serat kaca dan serat karbon adalah material penguat (*reinforcement*) yang paling banyak digunakan untuk aplikasi komposit infrastruktur sipil. Untuk aplikasi yang membutuhkan material dalam jumlah banyak, serat kaca (*glass fiber*) adalah bahan yang paling populer karena harganya yang paling murah. Produk material polimer yang diperkuat dengan serat kaca tersebut selanjutnya dikenal dengan nama *GFRP* yang merupakan singkatan dari kata *Glass Fiber Reinforced Polymer* atau *Glass Fiber Reinforced Plastic*.

Menurut El-Aris, B., dan Zaneldin, E. (2012), matriks tipikal yang digunakan adalah polimer berbasis *thermoset* yaitu *polyester*, *epoxy*, *vinylester*, dan *phenolic*. Dari berbagai polimer tersebut, *polyester* adalah jenis polimer yang paling banyak digunakan dalam aplikasi infrastruktur konstruksi/sipil dikarenakan harganya yang relatif murah dan juga kemudahan dalam proses produksi.

3. Klasifikasi dan jenis serat kaca pada material *GFRP*

Menurut Estrada, H. dan Lee, L.S. (2013), terdapat berbagai klasifikasi serat kaca yang tersedia untuk berbagai aplikasi, termasuk kaca "A" atau "AR" untuk ketahanan terhadap alkali (basa), kaca "C" untuk ketahanan terhadap korosi, kaca "E" untuk sifat elektrik yang ditingkatkan, kaca "S" dan "R" untuk kekuatan dan kekakuan yang tinggi, dan beberapa komposisi khusus serat kaca lainnya. *E-glass* memberikan kekuatan tarik yang tinggi dan karakteristik durabilitas (daya tahan) yang sangat baik, sehingga menyebabkan *E-glass* menjadi tipe serat kaca yang dijadikan sebagai standar umum dan merupakan jenis serat kaca yang paling banyak digunakan (Astrom, 1997 dalam Estrada, H. dan Lee, L.S., 2013). *S-glass* dan *R-glass* memberikan kekuatan, kekakuan, dan toleransi suhu yang lebih tinggi jika

dibandingkan dengan *E-glass*; namun harga *S-glass* dan *R-glass* dapat mencapai tiga sampai empat kali lipat dari harga *E-glass*.

Sathishkumar, T.P. et al. (2014) merangkum klasifikasi pokok serat kaca dan sifat-sifat fisiknya sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi serat kaca dan sifat-sifat fisiknya (Sathishkumar, T.P. et al., 2014)

No.	Klasifikasi	Sifat-sifat fisik (<i>physical properties</i>)
1	<i>A glass</i>	Durabilitas, kekuatan, dan resistivitas listrik yang lebih tinggi
2	<i>C glass</i>	Ketahanan korosi yang lebih tinggi
3	<i>D glass</i>	Konstanta dielektrik rendah
4	<i>E glass</i>	Kekuatan, dan resistivitas listrik yang lebih tinggi
5	<i>AR glass</i>	Ketahanan terhadap alkali
6	<i>R glass</i>	Kekuatan dan ketahanan terhadap asam yang lebih tinggi
7	<i>S glass</i>	Kekuatan tarik tertinggi
8	<i>S-2 glass</i>	Kekuatan, modulus, dan stabilitas yang tinggi

4. Proses manufaktur material *GFRP*

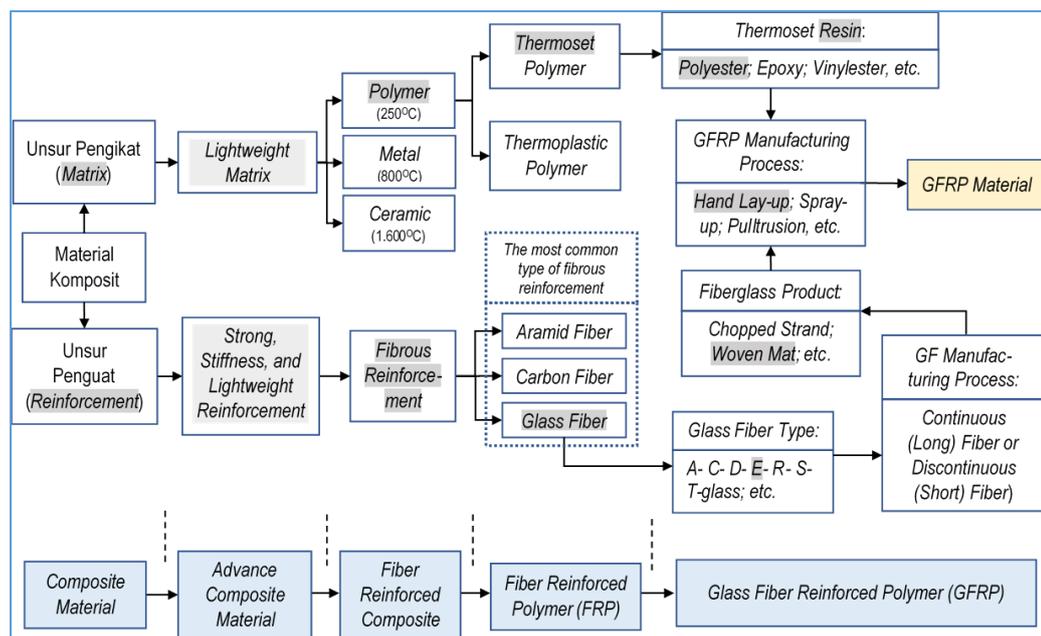
Menurut Hollaway, L.C. (2010), kualitas suatu produk material *FRP* ditentukan oleh hal-hal sebagai berikut:

- a) Sifat-sifat fisik dasar dari polimer dan serat;
- b) Interaksi permukaan (*surface interaction*) antara resin dan serat;
- c) Proporsi relatif dari polimer dan serat;
- d) Metode manufaktur dari material komposit;
- e) Sifat-sifat layanan (*in-service properties*) dari material *FRP*, seperti (1) ketahanan terhadap api, (2) ketahanan terhadap basa (*alkaline*) dan masuknya cairan ke dalam komposit *FRP*, (3) ketahanan terhadap permeabilitas, dan (4) durabilitas (daya tahan) dari komposit *FRP*.

Dari uraian tersebut di atas, terlihat bahwa kualitas material *FRP* salah satunya dipengaruhi juga oleh metode manufaktur dari material komposit tersebut. Menurut Rajak, D.K. et al. (2019), teknik pembuatan (*manufacture*) material *FRP* secara konvensional dapat dibedakan menjadi tiga metode, yaitu metode *hand lay-up*, metode *spray-up*, metode *pultrusion*.

5. Reviu hasil kajian pembuatan material *GFRP*

Berdasarkan hasil kajian terkait pembuatan material *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* ini maka hubungan antara material komposit, material komposit tingkat-lanjut (*advance composite material*), material *Fiber Reinforced Composite (FRC)*, material *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*, dan material *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, hingga proses terbentuknya produk material *GFRP* tersebut selanjutnya diilustrasikan dalam Gambar 16.



Gambar 16. Diagram hubungan antara material komposit, material komposit tingkat-lanjut, *Fiber Reinforced Composite (FRC)*, *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*, *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*, dan produk material *GFRP*

H. Kajian Penggunaan Material *GFRP* Sebagai Pasangan di Saluran Irigasi

1. Uji penggunaan material *GFRP* pada pembuatan saluran irigasi tersier di Malaysia.

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, Pang, L.H. (1978) telah melakukan penelitian penggunaan material berbahan *GFRP* yang diberi nama *fiberglass-reinforced polyester (FRP)*. Dalam pembuatan komponen flum tersebut, produk material *GFRP* yang dihasilkan menggunakan resin *polyester* dengan perkuatan produk serat kaca (*fiberglass*) yang dianyam (*woven*) menjadi bentuk tikar/matras (*mat*). Proses manufaktur dilakukan dengan cara konvensional yaitu dengan metode *hand lay-up*. Struktur flum *FRP* tersebut kaku (*rigid*) dan digunakan untuk pembangunan saluran tersier yang baru (*new construction*) yang dilaksanakan di Proyek Irigasi Tanjung Karang di Malaysia.

2. Penggunaan material *GFRP* untuk perbaikan saluran irigasi pasangan yang rusak di Jepang.

Selain Malaysia, Jepang juga pernah menerapkan penggunaan material *GFRP* untuk memperbaiki saluran irigasi pasangan yang mengalami kerusakan. Menurut Okazawa, H. et al. (2008), akibat usia konstruksi yang sudah lama maka setelah beberapa dekade terjadi banyak kerusakan infrastruktur saluran irigasi dan drainase yang ada di Jepang. Kerusakan tersebut umumnya berupa terjadinya retak (*crack*) dan juga rusaknya material pasangan saluran. Kerusakan tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien kekasaran hidrolis pada material pasangan dan memberikan banyak dampak negatif pada kondisi hidrolis di saluran, dan kapasitas alir saluran menjadi berkurang.

Perbaikan yang dilakukan pada ruas saluran yang mengalami kerusakan tersebut dilakukan dengan dua cara, yaitu: 1) dengan metode penempelan (*mounting*) panel dari resin atau beton ke dinding saluran eksisting, dan/atau 2) dengan metode pelamuran (*coating*) panel untuk mengaplikasikan cat resin (*resin paint*) yang telah digunakan. Jika metode perbaikan dengan memanfaatkan material

bekas struktur konstruksi memungkinkan untuk dapat diterapkan maka hal ini secara ekonomis akan mempermudah biaya perbaikan konstruksi. Oleh sebab itu, untuk perbaikan kecil (*minor*) pada suatu ruas saluran irigasi pada suatu daerah irigasi yang luas arealnya kecil hingga menengah, direkomendasikan untuk menggunakan metode perbaikan seperti itu.

Okazawa, H. et al. (2008) memberi nama material pasangan (*lining*) yang digunakan untuk perbaikan saluran irigasi yang rusak tersebut dengan istilah *flexible fiber reinforced plastic (FFRP)*, yaitu berupa material *FRP (fiber reinforced plastic)* yang lunak (*soft*). Panel untuk perbaikan pasangan saluran tersebut adalah berupa resin yang diperkuat dengan serat kaca (*glass fiber*). Panel tersebut mempunyai ketebalan 2 mm, dan bersifat kedap air (*water proof*) serta tahan karat (*anti-corrosion*).

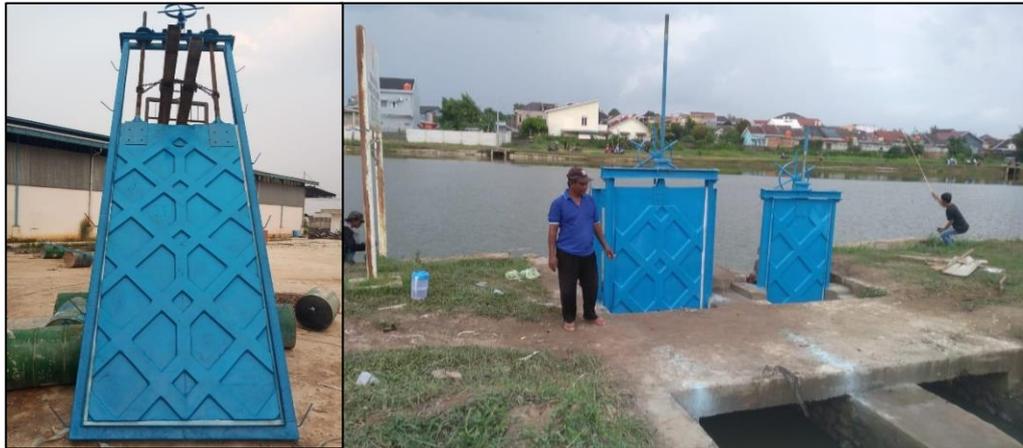
I. Kajian Pembuatan dan Penggunaan Material *GFRP* pada Bangunan Hidrolik di Indonesia

Penggunaan material *GFRP* pada sektor keairan di Indonesia akhir-akhir ini makin berkembang. Terdapat beberapa perusahaan di Indonesia yang sudah mampu memproduksi komponen bangunan air dengan material *GFRP* seperti pintu sorong, pintu klep, dan gorong-gorong yang dilengkapi dengan pintu klep. Komponen bangunan air dari material *GFRP* tersebut terutama banyak digunakan pada daerah irigasi rawa. Material *GFRP* tersebut mempunyai kelebihan mampu mengatasi serangan sulfat pada lahan rawa dengan kondisi air yang asam (ber-*pH* rendah).

1. Penggunaan material *GFRP* pada bangunan air di Provinsi Sumatera Selatan

Salah satu perusahaan di Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan (<https://www.instagram.com/andsinlisumberbaru/?hl=en>, diakses 20 November 2022) mempunyai pengalaman dalam membuat berbagai komponen bangunan air berbahan material *GFRP* seperti pintu sorong, pintu klep, dan gorong-gorong yang dilengkapi dengan pintu klep.

Baru-baru ini, perusahaan tersebut mendapat *order* dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang - Pemerintah Kota Palembang untuk membuat Pintu Sorong *GFRP* dan selanjutnya dipasang pada salah embung di Kota Palembang (Gambar 17).



Gambar 17. Contoh produk Pintu Sorong *GFRP* yang dipasang pada sistem pintu pengatur situ (embung) di Kota Palembang



Gambar 18. Contoh produk gorong-gorong dan pintu klep *GFRP* yang dipasang pada sistem saluran irigasi rawa di Desa Jungkal, Kecamatan Pampangan, Kabupaten Ogan Komering Ilir, Provinsi Sumatera Selatan pada tahun 2019

Pada tahun 2019, perusahaan tersebut juga mendapat *order* dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang – Pemerintah Kabupaten Ogan Komering Ilir, Provinsi Sumatera Selatan, untuk membuat komponen gorong-gorong berbahan material *GFRP* yang dilengkapi dengan pintu klep, dan selanjutnya

dipasang pada sistem saluran irigasi rawa di Desa Jungkal, Kecamatan Pampangan, Kabupaten Ogan Komering Ilir, Provinsi Sumatera Selatan (Gambar 18).

2. Penggunaan material *GFRP* pada bangunan air di Provinsi Kalimantan Tengah

Contoh perusahaan pembuat material *GFRP* lainnya adalah di Kota Lembang Provinsi Jawa Barat (<https://adjienyomanfiber.blogspot.com/>, diakses 10 Juni 2021). Perusahaan ini biasanya memproduksi komponen bangunan air dengan material berbahan *GFRP* berdasarkan *order* (pesanan) dari pihak lain, sesuai dengan profil komponen struktur yang diinginkan. Beberapa produk komponen bangunan air yang mampu diproduksi oleh perusahaan ini antara lain berupa pintu klep, gorong-gorong, kombinasi pintu klep dan gorong-gorong, dan pintu sorong (Gambar 19).



Gambar 19. Contoh produk material *GFRP* untuk digunakan sebagai komponen bangunan air yang dibuat oleh pabrik *GFRP* di Kota Lembang, Provinsi Jawa Barat

Pada awal tahun 2021 ini, perusahaan ini mendapat *order* dari Badan Restorasi Gambut dan Mangrove (BRGM) – RI untuk membuat komponen bangunan pintu air dari material *GFRP* yaitu berupa pintu klep dan kombinasi gorong-gorong dan pintu klep untuk ditempatkan pada sistem saluran irigasi rawa pasang surut di Desa Talio Hulu, Kecamatan Pandih Batu, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Selatan (Gambar 20 dan Gambar 21).



Gambar 20. Contoh produk pintu klep *GFRP* yang dipasang pada sistem bangunan air di saluran rawa di Desa Talio Hulu, Kecamatan Pandih Batu, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah



Gambar 21. Contoh produk gorong-gorong dan pintu klep *GFRP* yang dipasang pada sistem saluran air Daerah Irigasi Rawa di Desa Talio Hulu, Kecamatan Pandih Batu, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah

J. Optimasi Penggunaan Material *GFRP* pada Sistem Jaringan Irigasi di Indonesia

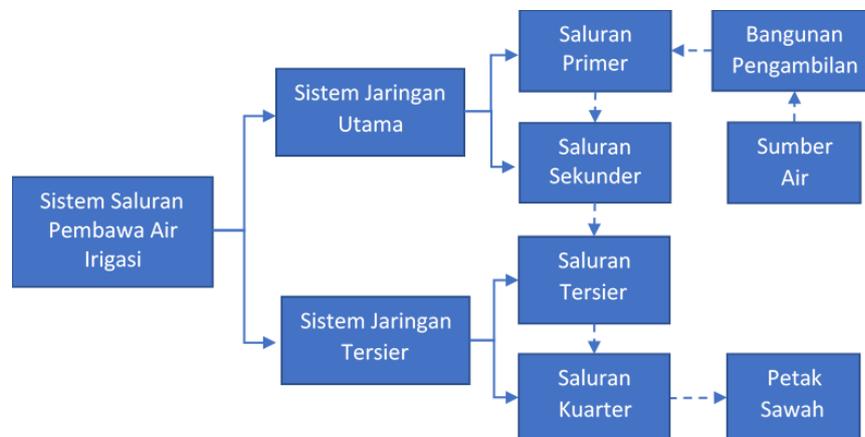
1. Sistem jaringan dan saluran pembawa air irigasi di Indonesia

Sistem Irigasi meliputi prasarana irigasi, air irigasi, manajemen irigasi, kelembagaan pengelolaan irigasi, dan sumber daya manusia. Jaringan Irigasi adalah saluran, bangunan, dan bangunan pelengkap yang merupakan satu kesatuan

yang diperlukan untuk penyediaan, pembagian, pemberian, penggunaan, dan pembuangan air irigasi (Kementerian PUPR RI, 2015).

Sistem saluran pembawa air irigasi yang terdapat dalam sistem jaringan irigasi terbagi atas sistem jaringan utama (*main system*) dan sistem jaringan tersier (*tertiary system*). Sistem jaringan utama terdiri dari dua jenis saluran pembawa, yaitu: (1) Saluran Primer, yang membawa air dari sumber air ke sistem saluran sekunder; dan (2) Saluran Sekunder, yang membawa air dari saluran primer ke sistem jaringan tersier. Sistem jaringan tersier terdiri dari dua jenis saluran pembawa, yaitu: (1) Saluran Tersier, yang membawa air dari bangunan sadap tersier ke boks bagi kuarter, dan (2) Saluran Kuarter, yang membawa air dari boks bagi kuarter untuk selanjutnya dialirkan/disadap langsung ke lahan persawahan yang ada dalam sistem petak kuarter (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013a).

Secara skematisasi, sistem saluran pembawa air irigasi mulai dari sumber air ke petak sawah ditampilkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Diagram sistem saluran pembawa dan perjalanan air irigasi dari sumber air ke petak sawah

2. Pendanaan pengembangan dan pengelolaan sistem irigasi di Indonesia

Berdasarkan ketentuan yang terdapat dalam Undang-undang Republik Indonesia Nomor: 17 Tahun 2019 tentang *Sumber Daya Air*, salah satu tugas Pemerintah dalam mengatur dan mengelola Sumber Daya Air adalah dengan

mengembangkan dan mengelola sistem irigasi sebagai satu kesatuan sistem pada daerah irigasi (Kementerian Hukum dan HAM RI, 2019).

Berdasarkan ketentuan yang terdapat pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor: 30/PRT/M/2015 tentang *Pengembangan dan Pengelolaan Sistem Irigasi*, maka kegiatan pengembangan dan pengelolaan irigasi pada sistem jaringan utama (*main system*) menjadi hak dan tanggung jawab Pemerintah, sedangkan kegiatan pengembangan dan pengelolaan irigasi pada sistem jaringan tersier (*tertiary system*) menjadi hak dan tanggung jawab petani melalui kelompok tani atau organisasi Perkumpulan Petani Pemakai Air (P3A). Pengembangan sistem irigasi meliputi kegiatan pembangunan jaringan irigasi baru dan/atau peningkatan jaringan irigasi yang sudah ada; sedangkan pengelolaan sistem irigasi meliputi kegiatan operasi, pemeliharaan, dan rehabilitasi jaringan irigasi (Kementerian PUPR RI, 2015).

Pada prakteknya, pendanaan untuk kegiatan pembangunan dan peningkatan sistem irigasi pada tingkat jaringan tersier umumnya masih banyak dilakukan oleh Pemerintah, sedangkan petani hanya bertanggung jawab dan berpartisipasi dalam kegiatan operasi, pemeliharaan, dan rehabilitasi.

Pada sistem jaringan utama (*main system*), dimensi saluran irigasi primer dan sekunder umumnya berukuran besar sehingga pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi saluran irigasi tersebut menjadi tanggung jawab pemerintah. Pada sistem jaringan tersier (*tertiary system*), dimensi saluran irigasi tersier dan kuarter umumnya berukuran kecil sehingga pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi saluran tersebut menjadi tanggung jawab petani.

3. Optimasi penggunaan material *GFRP* pada sistem saluran irigasi di Indonesia

Saluran tersier sebaiknya diberi pasangan (*lining*) bila kehilangan air akibat perkolasi akan tinggi atau kemiringan tanah lebih dari 1,0 sampai 1,5%. Dengan pasangan kemiringan saluran dapat diperbesar. Pasangan juga bermanfaat untuk mengurangi kehilangan air akibat rembesan atau memantapkan stabilitas tanggul.

Saluran irigasi kuarter tidak pernah diberi pasangan karena para petani diperbolehkan mengambil air dari saluran ini (Direktorat Irigasi dan Rawa, 2013c).

Berdasarkan hal tersebut diatas maka penggunaan pasangan dengan material *GFRP* di saluran irigasi hanya dikaji pada saluran primer, sekunder, dan tersier saja. Optimasi penggunaan material *GFRP* sebagai alternatif material pasangan di saluran irigasi (primer, sekunder, dan tersier) akan ditinjau dalam dua aspek, yaitu: (1) aspek pembiayaan untuk pembangunan/peningkatan saluran dan (2) aspek pemeliharaan dan rehabilitasi saluran.

a. Aspek pembiayaan untuk pembangunan/peningkatan saluran irigasi.

Pada sistem jaringan utama (*main system*), dimensi saluran primer dan sekunder umumnya berukuran besar. Saat ini permasalahan harga awal material *GFRP* yang mahal merupakan hal yang pokok dalam mempertimbangkan penerapan material *GFRP* dalam pelaksanaan konstruksi di saluran irigasi. Apabila penggunaan material *GFRP* ini akan diterapkan pada sistem jaringan utama maka perlu dipertimbangkan biaya pelaksanaan konstruksi material ini jika dibandingkan dengan material tradisional pada umumnya.

Pada sistem jaringan tersier, dimensi saluran tersier umumnya relatif kecil. Apabila penggunaan material *GFRP* ini akan diterapkan pada saluran tersier maka biaya pelaksanaan konstruksi material ini juga akan menjadi relatif lebih kecil.

b. Aspek pemeliharaan dan rehabilitasi saluran irigasi.

Pada sistem jaringan utama (*main system*), pelaksanaan kegiatan pemeliharaan atau rehabilitasi saluran irigasi primer dan sekunder yang dilaksanakan oleh Pemerintah umumnya banyak dilakukan dengan menggunakan alat berat yaitu berupa *excavator*. Jika material *GFRP* akan diterapkan pada sistem jaringan utama, maka kondisi *bucket* ekskavator yang tajam akan menimbulkan kerentanan terhadap rusaknya material *GFRP*.

Pada sistem jaringan tersier (*tertiary system*), pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan rehabilitasi saluran irigasi tersier dan kuarter yang dilaksanakan oleh kelompok tani (P3A) umumnya banyak dilakukan dengan cara manual, yaitu

dengan menggunakan tenaga manusia dan dengan memakai peralatan bantu sederhana seperti cangkul dan sekop. Untuk itu penggunaan material *GFRP* sebagai pasangan (*lining*) di saluran tersier akan lebih memungkinkan untuk diterapkan.

Berdasarkan hasil kajian terhadap dua aspek tersebut di atas, maka alternatif penggunaan material *GFRP* sebagai material pasangan (*lining*) di saluran irigasi akan lebih optimal jika hanya diterapkan di saluran tersier saja. Dimensi saluran tersier yang relatif kecil dan metode pemeliharaan/rehabilitasi saluran yang sederhana menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan alternatif tersebut.

K. Kajian Publikasi Ilmiah untuk Nilai Koefisien Kekasaran Hidrolis untuk Material *GFRP*

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, Pang, L.H. (1978) telah melakukan penelitian penggunaan material berbahan *GFRP* untuk pembangunan saluran tersier yang baru (*new construction*). Namun dalam rancangan pembuatannya tidak dilakukan kajian terhadap besarnya nilai koefisien kekasaran hidrolis saluran untuk produk flum berbahan material *GFRP* tersebut.

Dari penelusuran jurnal dan artikel terkait lainnya untuk mengetahui besarnya nilai koefisien kekasaran hidrolis saluran untuk material berbahan *GFRP* ditemukan bahwa banyak perusahaan perpipaan di dunia yang telah mencantumkan nilai koefisien kekasaran Manning n dalam spesifikasi produk perpipaan mereka. Selain itu Okazawa, H. et al., (2008) juga telah memberikan nilai koefisien kekasaran Manning n dalam penelitian mereka terkait penggunaan material *GFRP* untuk melapisi saluran pasangan beton lama yang mengalami kerusakan di Jepang.

1. Produk perpipaan komersial berbahan material *GFRP*.

Saat ini banyak perusahaan di dunia yang telah membuat berbagai produk perpipaan komersial dengan material berbahan *GFRP*, dan dalam spesifikasi produknya dicantumkan juga nilai koefisien kekasaran Manning n untuk produk perpipaan dari masing-masing perusahaan tersebut. Disini akan diberikan dua contoh tentang hal tersebut.

a. Grandpipe™

Grandpipe™ (<https://grandpipe.com/en/product-information>, diakses 5 Maret 2021) adalah sebuah perusahaan industri perpipaan dari Turki yang banyak membuat produk perpipaan berbahan material *GFRP*. Dalam informasi produk perpipaan yang dimuat dalam situs perusahaan tersebut dicantumkan nilai koefisien kekasaran Manning $n = 0,009$ untuk material pipa yang diberi nama *GRP* (*Glass-reinforced plastics*). Contoh produk pipa berbahan *GFRP* dari Grandpipe tersebut disajikan dalam Gambar 23.



Gambar 23. Contoh produk pipa berbahan *GFRP* keluaran *Grandpipe™*

b. Jiubo Composite™

Jiubo Composite™ (<http://www.aldfp.com/News/Comparison-of-FRP-Pipe-and-pipe-flow-185.html>, diakses 5 Maret 2021) adalah sebuah perusahaan dari China yang banyak membuat aneka produk dengan material berbahan *GFRP*.



Gambar 24. Contoh produk pipa berbahan *GFRP* keluaran *Jiubo Composite™*

Salah satu produk yang mereka buat adalah pipa dengan material berbahan *GFRP* yang diberi nama *FRP (Fiber-reinforced plastics)* (Gambar 24).

Dalam informasi produk yang dimuat dalam situs perusahaan tersebut dicantumkan nilai koefisien kekasaran Manning untuk material pipa *GFRP* yang diproduksi adalah $n = 0,0084$.

Walaupun telah mencantumkan nilai koefisien kekasaran Manning n untuk kedua produk perpipaan tersebut, namun nilai koefisien kekasaran Manning n untuk produk material *GFRP* tersebut secara ilmiah belum dapat dipertanggungjawabkan. Kedua perusahaan hanya menyampaikan informasi produk mereka secara sepihak dan tidak mempublikasikannya dalam suatu jurnal ilmiah yang resmi yang memerlukan penjelasan lebih rinci terkait pertanyaan “Bagaimana” (*How*) caranya nilai koefisien kekasaran Manning n tersebut diperoleh. Selain itu tipikal produk berbentuk pipa (*close conduit*) sedangkan dalam pelaksanaan penelitian ini menggunakan tipikal saluran terbuka (*open canal*).

2. Hasil penelitian *flexible FRP liner* di Jepang

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, Okazawa, H. et al. (2008) telah melakukan kajian penggunaan material berbahan *GFRP* yang diberi nama *FRP (Fiber-Reinforced Plastic)* yang lentur (*flexible*) sebagai material pasangan (*lining*) untuk memperbaiki saluran pasangan beton yang rusak di Jepang. Selanjutnya Okazawa, H. et al. (2008) melakukan studi eksperimental di laboratorium untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning dari produk material *Flexible FRP* yang telah diinstalasi tersebut. Hasil penelitian mereka mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning n sebesar 0,0094.

Terdapat beberapa kekurangan terkait hasil penelitian yang dilakukan oleh Okazawa, H. et al. (2008) tersebut, yaitu meliputi aspek publikasi ilmiah, aspek penggunaan, dan aspek teknis.

a. Aspek publikasi ilmiah

Naskah penelitian Okazawa, H. et al. (2008) tersebut diterbitkan dalam *Journal of Agriculture Science, Tokyo University of Agriculture, Vol. 53, No. 3.*

Naskah jurnal dalam edisi Bahasa Inggris hanya memuat naskah tulisan dalam bentuk Abstrak.

Upaya lebih lanjut untuk mencari naskah dalam bentuk tulisan penuh (*full paper*) hanya mendapatkan laporan *full paper* dalam edisi Bahasa Jepang. Selain itu juga, dari total lima halaman (halaman 194 hingga halaman 199) naskah *full paper* tersebut terdapat dua halaman yang hilang (tidak lengkap), yaitu halaman 196 dan 198. Untuk memahami lebih rinci terkait naskah penelitian tersebut telah dilakukan upaya juga untuk terlebih dahulu menterjemahkan naskah tulisan *full paper* tersebut dari Bahasa Jepang ke Bahasa Inggris, dan selanjutnya dari Bahasa Inggris ke Bahasa Indonesia.

b. Aspek penggunaan dan teknis

Penelitian yang telah dilakukan oleh Okazawa, H. et al. (2008) tersebut juga berbeda dalam aspek penggunaan (*in-service*) jika dibandingkan dengan pelaksanaan penelitian yang dilakukan. Produk *flexible FRP liner* yang diuji oleh Okazawa, H. et al. (2008) tersebut digunakan sebagai material pasangan (*lining*) untuk memperbaiki (*repair*) saluran pasangan beton lama yang rusak dan mengalami kebocoran, yaitu dengan cara melapisi/menempelkan produk *flexible FRP liner* pada lapisan permukaan pasangan beton yang sudah ada (*existing*). Dalam hal ini terdapat perbedaaan penggunaan (*in-service*) antara tipikal produk *flexible FRP liner* tersebut dengan tipikal produk *GFRP* yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian. Tipikal produk *GFRP* yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian adalah berupa material *GFRP* yang kaku (*rigid*) dan direncanakan untuk digunakan sebagai material pasangan (*lining*) pada saluran irigasi tersier yang baru dibangun (*new construction*) atau melapisi saluran irigasi tanah.

Dalam naskah penelitian tersebut, penggunaan produk *flexible FRP liner* tersebut tidak menjelaskan secara rinci hal-hal terkait dengan jenis resin dan serat kaca yang digunakan, proporsi campuran antara resin dan *fiber glass mat*, serta proses manufaktur produk *flexible FRP liner* tersebut. Hal-hal tersebut tersebut perlu disampaikan untuk mengetahui gambaran karakteristik dan kualitas dari material *FRP* yang digunakan (Hollaway, L.C., 2010).

3. Keterbaruan (*novelty*) dari penelitian

Perbandingan antara hasil nilai koefisien kekasaran hidrolis (*hydraulic roughness coefficient*) untuk Material *GFRP* yang telah dikaji tersebut dengan pelaksanaan penelitian selanjutnya diuraikan di bawah ini.

a) Penelitian penggunaan *FRP* di Malaysia

Secara umum penelitian yang dilakukan oleh Pang, L.H. (1978) mempunyai kemiripan dengan penelitian yang dilakukan. Material *GFRP* digunakan untuk membuat saluran terbuka yang baru dengan tipe kaku (*rigid*) dan diberi nama *FRP* (*fiberglass-reinforced polyester*). Dalam hal ini Pang, L.H. (1978) juga menjelaskan penggunaan tipe resin dan serat kaca serta metode manufaktur dari material *GFRP* tersebut. Walaupun hasil penelitian tersebut telah dipublikasikan secara ilmiah, namun penelitian tersebut tidak melakukan kajian tentang nilai koefisien kekasaran hidrolis dari material *GFRP* yang telah digunakan.

b) Produk perpipaan komersial

Secara umum produk perpipaan komersial yang dibuat oleh Grandpipe™ (Turki) dan Jiubo Composite™ (China) adalah berupa saluran pipa (*close conduit*) yang bersifat kaku (*rigid*) dan digunakan untuk konstruksi saluran pipa yang baru (*new construction*). Kedua produsen pipa tersebut tidak menjelaskan tentang jenis resin, dan tipe serat kaca yang digunakan, serta metode manufaktur dari kedua produk pipa tersebut. Walaupun telah mencantumkan nilai koefisien kekasaran Manning untuk masing-masing produk pipa (Grandpipe, $n = 0,009$ dan Jiubo Composite, $n = 0,0084$) namun nilai koefisien kekasaran pipa tersebut belum dapat dipertanggungjawabkan karena tidak dipublikasikan secara ilmiah.

c) Penelitian *FRP liner* di Jepang

Secara spesifik penelitian yang dilakukan oleh Okazawa, H. et al. (2008) adalah untuk mengetahui koefisien kekasaran hidrolis pada pada material *GFRP* yang digunakan untuk melapisi saluran irigasi lama yang mengalami kerusakan ringan yaitu berupa retakan (*crack*) pada pasangan beton *existing*. Material *GFRP* tersebut diberi nama *FRP* (*Fiber Reinforced Plastics*) dengan karakteristik material yang lentur (*flexible*). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, nilai koefisien

kekasaran Manning yang diperoleh adalah $n= 0,0094$. Selain publikasi ilmiahnya kurang lengkap, penelitian yang dilakukan oleh Okazawa, H. et al. (2008) juga tidak melakukan kajian terkait jenis resin, dan tipe serat kaca yang digunakan, serta metode manufaktur yang dilakukan.

d) Perbedaan dan keterbaruan (*novelty*) pada material *GFRP* yang dilakukan pada pelaksanaan penelitian

Dari hasil perbandingan tersebut di atas, terdapat perbedaan dan aspek keterbaruan (*novelty*) pada material *GFRP* yang digunakan pada pelaksanaan penelitian, yaitu sebagai berikut:

- a) Material *GFRP* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan material yang ada di Indonesia. Selain itu juga untuk proses manufakturnya dilakukan oleh tenaga kerja lokal yang ada di Indonesia;
- b) Material *GFRP* yang digunakan berbentuk saluran terbuka (*open channel*) yang berbentuk kaku (*rigid*) dan direncanakan untuk digunakan pada pembuatan saluran irigasi baru (*new construction*) atau melapisi saluran irigasi tanah;
- c) Dalam penelitian ini akan dilakukan pencatatan data terkait jenis resin, dan tipe serat kaca yang digunakan, serta metode manufaktur yang dilakukan;
- d) Setelah hasil penelitian untuk koefisien kekasaran Manning n diperoleh, selanjutnya hasil penelitian tersebut nantinya akan dipublikasikan secara ilmiah melalui suatu jurnal internasional yang terakreditasi.

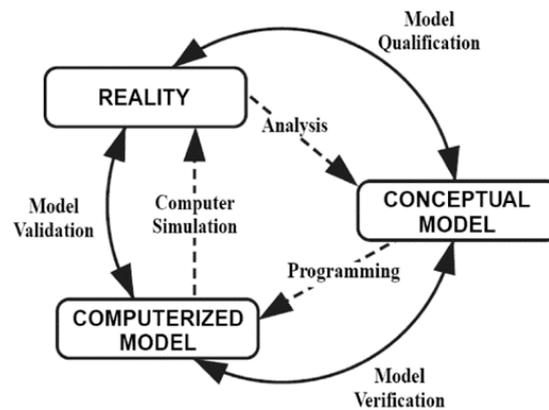
L. Kajian Pemodelan Hidrolik

1. Pengertian model secara umum

Menurut Vrijdag, A. et al. (2009), model konseptual dikembangkan dengan analisis realitas. Model konseptual dapat berasal dari berbagai tingkat kompleksitas. Siklus pengembangan yang diperlukan untuk mendapatkan model konseptual tersebut diilustrasikan pada Gambar 25.

Tugas dari pembuat model (*modeller*) adalah 'memenuhi syarat (*qualify*)' model, dimana menurut Vrijdag, A. et al. (2009), SCS (the Society for Computer Simulation) mendefinisikan "kualifikasi" sebagai penentuan kecukupan model

konseptual untuk memberikan tingkat kesepakatan (*agreement*) yang dapat diterima untuk domain aplikasi yang dimaksud. Definisi ini menyiratkan bahwa tujuan simulasi model harus mengarahkan ekstraksi model konseptual dari kenyataan (*reality*).



Gambar 25. Siklus pengembangan dari suatu model simulasi (Schlesinger S., 1979 dalam Vrijdag, A. et al., 2009)

2. Pemodelan hidrolik

Pemodelan hidraulik merupakan suatu perangkat yang sering digunakan oleh para insinyur hidraulik untuk mencari atau menghasilkan suatu disain yang optimum dalam penelitian, studi kelayakan, dan perencanaan serta perancangan proyek-proyek industri/konstruksi. Dalam menangani masalah tersebut, model hidraulik yang dipakai (dapat model skala fisik dan dapat juga model numerik) digunakan untuk mempelajari perilaku hidraulik dan dampak suatu disain serta menginterpretasikan hasil-hasilnya pada kondisi-kondisi hidrodinamika dan meteorologi yang kompleks (Suryadarma Hasyim dan Cahyono, 1995).

Studi model hidrolik banyak digunakan untuk mendukung perencanaan bangunan air. Ada dua tipe model hidrolik, yaitu model matematik dan model fisik. Model matematik dapat digunakan apabila permasalahan yang ada dapat dirumuskan secara matematis. Persamaan matematik tersebut kemudian diselesaikan secara numerik dengan menggunakan bantuan komputer. Model fisik digunakan apabila fenomena fisik dapat direproduksi dengan kesamaan yang cukup

dengan memperkecil dimensi bangunan yang sesungguhnya. Kedua tipe model tersebut digunakan untuk tipe permasalahan yang berbeda, meskipun sering untuk suatu permasalahan kedua model tersebut dapat digunakan. Dalam hal yang terakhir, diperlukan pemilihan tipe model yang akan digunakan (Bambang Triatmodjo, 1993).

Keputusan pembuatan model didasarkan pada pertimbangan ekonomi. Suatu model fisik yang kecil, biayanya lebih kecil jika dibandingkan dengan prototip yang akan dibuat, dan hasilnya akan dapat memberikan hasil perencanaan yang lebih baik dan teliti. Akan tetapi biasanya model tersebut lebih mahal jika dibandingkan dengan studi analitis atau model matematik. Oleh karena itu pembuatan model fisik menjadi tidak ekonomis apabila masalah yang ada dapat diselesaikan dengan baik oleh model matematik (Bambang Triatmodjo, 1993).

3. Pemodelan fisik

Pengamatan langsung di lapangan untuk masalah teknik yang berhubungan dengan aliran fluida pada pekerjaan yang besar, seperti sungai, pelabuhan, atau bangunan pelimpah bendungan; akan memakan biaya yang besar dan waktu yang lama. Untuk menghindari kendala tersebut, pengamatan bisa dilakukan dengan membuat bentuk miniatur dari permasalahan di laboratorium; yang dikenal dengan studi model fisik. Model fisik mempunyai bentuk serupa dengan permasalahan yang dipelajari tetapi dengan ukuran yang lebih kecil. Sesuai dengan perkembangan alat ukur yang semakin baik, penggunaan model fisik dan kepercayaan pada studi model fisik semakin meningkat. Insinyur sipil membuat model bangunan air, sungai, *estuary*, pelabuhan, pantai, dan sebagainya untuk memperoleh penyelesaian-penyelesaian yang lebih dapat dipercaya dalam perencanaan (Bambang Triatmodjo, 1993).

Bentuk sesungguhnya dari bangunan yang diselidiki disebut prototip, dan model bisa lebih besar, sama besar, atau yang biasa dilakukan adalah lebih kecil dari prototip. Hubungan antara model dan prototip dipengaruhi oleh hukum-hukum sifat sebangun hidrolis. Sifat sebangun ini memperhatikan beberapa aspek, yaitu sebangun geometrik, sebangun kinematik, dan sebangun dinamik. Perbandingan

antara prototip dan model disebut dengan skala model. Sebangun geometrik dipenuhi apabila model dan prototip mempunyai bentuk yang sama tetapi berbeda ukuran. Hal ini berarti bahwa perbandingan antara semua ukuran panjang yang bersangkutan termasuk kekasaran antara model dan prototip adalah sama. Sebangun kinematik terjadi antara prototip dan model jika prototip dan model sebangun geometrik, dan perbandingan kecepatan dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototip dan model untuk seluruh pengaliran adalah sama. -Jika prototip dan model sebangun geometrik dan kinematik, dan gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototip untuk seluruh pengaliran mempunyai perbandingan yang sama dan bekerja pada arah yang sama, maka dikatakan sebangun dinamik.

4. Pemodelan matematik

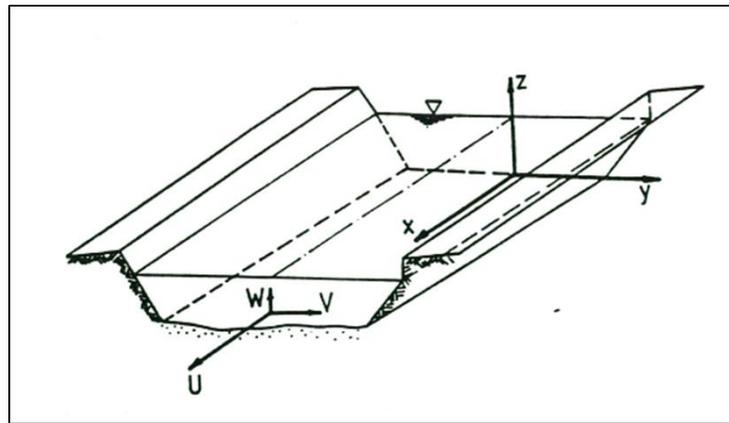
Sebuah model fisik diekspresikan sebagai satu set persamaan matematika. Dalam simulasi numerik, persamaan pengatur (*governing equations*) didiskritisasi oleh algoritma atau metode numerik, mengubah model matematika menjadi model komputasi diskrit. Model komputasi tersebut diimplementasikan dalam suatu perangkat lunak di komputer; implementasi ini sering disebut kode komputer, dan eksekusi kode disebut simulasi (Geffray, C. et al., 2019).

a. Konsep pembuatan model matematik.

Aliran di sungai umumnya bervariasi dalam waktu (*time*) dan ruang (*space*), dan pada dasarnya berwujud tiga-dimensi (lihat Gambar 26). Untuk beberapa aplikasi rekayasa, perubahan waktu (*time*) dapat dianggap sangat lambat sehingga situasi aliran-tetap (*steady flow*) dapat diasumsikan. Di sisi lain untuk banyak permasalahan rekayasa, hanya nilai rata-rata tertentu yang diperlukan (Przedwojski, B. et al., 1995).

Dengan demikian, model dua dimensi (2-D) atau satu dimensi (1-D) yang disederhanakan berikut dipertimbangkan untuk digunakan:

- 1) Model vertikal dua-dimensi (2DV); Model ini diperoleh dengan perata-rataan dalam arah lateral. Semua parameter tergantung pada koordinat longitudinal dan vertikal.
- 2) Model horisontal dua-dimensi (2DH); Model ini diperoleh dengan perata-rataan pada kedalaman pada titik tertentu. Semua parameter berubah baik dalam arah longitudinal maupun lateral.
- 3) Model satu-dimensi (1D); Model ini diperoleh dengan perata-rataan pada suatu penampang melintang. Nilai yang dihasilkan tergantung pada koordinat longitudinal.



Gambar 26. Sistem koordinat kartesian pada aliran tiga dimensi di sungai Przedwojski, B. et al., 1995)

Bentuk persamaan matematik dasar tiga-dimensi (3-D) untuk pergerakan air di sungai dapat ditulis sebagai berikut (Jansen et al., 1979 dalam Przedwojski, B. et al., 1995):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(UV) + \frac{\partial}{\partial z}(UW) + g \frac{\partial z_w}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2) + \frac{\partial}{\partial z}(VW) + g \frac{\partial z_w}{\partial y} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UW) + \frac{\partial}{\partial y}(VW) + \frac{\partial}{\partial z}(W^2) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = -g \quad (34)$$

Selanjutnya persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (35)$$

Sistem koordinat kartesian dapat dilihat kembali pada Gambar 26. U , V , dan W adalah komponen kecepatan aliran dalam arah x , y , dan z ; g adalah percepatan gravitasi; dan z_w adalah taraf muka air di atas datum referensi. Dalam persamaan-persamaan tersebut, beberapa batasan dan asumsi yang dibuat meliputi:

- 1) Rapat massa fluida ρ diasumsikan konstan;
- 2) Parameter viskositas diabaikan;
- 3) Percepatan geostropik akibat rotasi bumi diabaikan;
- 4) Karena topografi dasar sungai normal yang landai maka percepatan vertikal dan gaya akibat tegangan vertikal per satuan massa dapat diasumsikan kecil dibandingkan dengan percepatan gravitasi, sehingga persamaan gerak ketiga (Persamaan 34) dapat didiaproksimasikan oleh tekanan hidrostatis.

Sebagai gambaran umum konsep pembuatan model matematik 1-D untuk gerakan aliran air (hidrodinamika) tak tunak di sungai secara ringkas dapat dijelaskan sebagai berikut (Suryadarma Hasyim dan Cahyono, 1995):

- 1) Melakukan penurunan persamaan aliran air (hidrodinamika) 1-D dalam bentuk Persamaan Kontinuitas:

$$A \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial A}{\partial x} + B_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (36)$$

dan Persamaan Momentum:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} = (S_o - S_f) \quad (37)$$

dimana, A = luas penampang basah (m^2); B_s = lebar dasar sungai/saluran (m); h = kedalaman aliran (m); S_o = kemiringan dasar saluran; dan S_f = kemiringan garis energi.

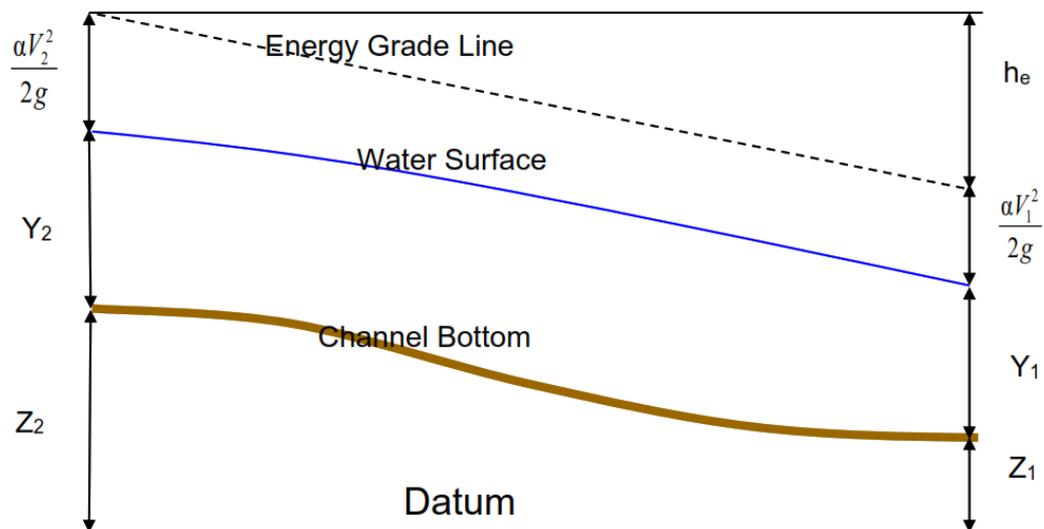
- 2) Mencari solusi numerik persamaan hidrodinamika dengan metode karakteristik;
- 3) Melakukan penyelesaian persamaan hidrodinamika dengan metode selisih hingga (*finite difference*);
- 4) Melakukan komputasi model dengan bantuan bahasa pemrograman komputer.

b. Model matematik terapan: *software* HEC-RAS.

Saat ini sudah banyak tersedia perangkat lunak (*software*) terapan yang digunakan sebagai alat bantu (*tools*) untuk mensimulasikan aliran air di saluran terbuka. Beberapa keluaran *software* tersebut antara lain SOBEK, TUFLOW, HEC-

RAS dan lain-lain. Di antara beberapa *software* tersebut, *software* HEC-RAS adalah yang paling populer dan banyak digunakan secara luas di dunia serta untuk beberapa versi dapat diakses secara gratis (*open source*) (Pandya, U. and Patel, D., 2019).

Menurut Brunner, G.W. (2016), *software* HEC-RAS mampu melakukan perhitungan dan simulasi aliran tunak (*steady flow*) dan aliran tak-tunak (*unsteady flow*) untuk model aliran satu dimensi (1-D) dan juga model aliran dua dimensi (2-D) untuk aliran tak-tunak. Komputasi aliran tunak (*steady flow*) untuk model aliran 1 Dimensi (1-D) baik untuk saluran alam maupun saluran buatan dilakukan melalui perhitungan profil permukaan air (*water surface profiles*). Selain itu, perangkat lunak HEC-RAS juga dapat menentukan profil permukaan air untuk karakteristik kecepatan aliran subkritis, superkritis, dan campuran. Persamaan untuk menghitung profil permukaan air melibatkan penyelesaian persamaan energi secara iteratif dari satu penampang ke penampang berikutnya (Gambar 27).



Gambar 27. Ilustrasi bentuk persamaan energi dalam suatu ruang tilik pada saluran terbuka (Brunner, G.W., 2016)

Persamaan dasar hidrolika yang digunakan adalah dalam bentuk persamaan energi, dimana persamaan energi antara dua penampang dalam suatu ruang tilik (*control volume*) dinyatakan sebagai berikut (Brunner, G.W., 2016)

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (38)$$

dimana, Z_1, Z_2 = elevasi saluran utama; Y_1, Y_2 = kedalaman aliran pada suatu penampang melintang saluran; v_1, v_2 = kecepatan rata-rata aliran (debit dibagi dengan luas penampang basah); a_1, a_2 = koefisien kecepatan; g = percepatan gravitasi; h_e = kehilangan tinggi-energi (*headloss*).

Kehilangan tinggi energi (h_e) di antara dua penampang melintang saluran meliputi kehilangan energi akibat friksi, kontraksi, dan ekspansi. Persamaan kehilangan tinggi-energi tersebut dapat ditulis sebagai berikut (Brunner, G.W., 2016):

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (39)$$

dimana, h_e = kehilangan tinggi energi; L = panjang kapasitas debit yang melewati ruas saluran; \bar{S}_f = kemiringan friksi (*energy grade line*) antara dua penampang melintang saluran; C = koefisien kehilangan energi akibat kontraksi atau ekspansi.

Persamaan tahanan aliran (*flow resistance*) yang digunakan untuk estimasi kehilangan energi akibat friksi dihitung dengan suatu kemiringan friksi (kemiringan garis energi) dari formula Manning untuk aliran seragam. Persamaan tahanan aliran tersebut selanjutnya dapat ditulis dalam bentuk (Vedmani, Rabindra Kumar Panda and Vinay Kumar Pandey, 2020 dan Brunner, G.W., 2016):

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (40)$$

dimana, Q = debit (m^3/s); K = hantaran (*conveyance*) saluran, S_f = kemiringan friksi (kemiringan garis energi).

Hantaran (*conveyance*) pada suatu penampang melintang saluran (dalam Satuan Internasional SI) didapat dari persamaan berikut ini (Vedmani, Rabindra Kumar Panda and Vinay Kumar Pandey, 2020 dan Brunner, G.W., 2016):

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (41)$$

Dimana: A = luas penampang basah (m^2); n = koefisien kekasaran Manning; R = jari-jari hidrolis (m).

c. Data masukan dalam simulasi aliran 1-D dengan *software* HEC-RAS

Secara umum, perhitungan hidrodinamika dan simulasi aliran 1-D dengan *software* HEC-RAS membutuhkan data masukan berupa data tipe aliran (*steady flow data* dan *unsteady flow data*) dan data geometrik saluran. Data geometrik dibutuhkan untuk setiap perhitungan tipe aliran. Untuk tipe aliran tunak (*steady flow*) data yang diperlukan sebagai masukan adalah data rezim aliran, data syarat-syarat batas, dan data informasi debit (debit puncak atau data aliran pada suatu kondisi waktu tertentu) (Brunner, G.W., 2016).

Untuk tipe aliran tak-tunak (*unsteady flow*), seperti karakteristik aliran di sungai, data masukan yang diperlukan terdiri dari data geometrik (*geometric data*) dan data aliran tak tetap (*unsteady flow data*). *Geometric data* meliputi pembuatan skema sistem sungai (*river system schematic*), pemasukan data tampang lintang (*cross section*) sungai, pertemuan sungai (*junction*), data bangunan air (*hydraulic structure*) di sungai (seperti jembatan, bendung, *storage area* dan lain-lain), dan interpolasi antara *cross section*. *Unsteady flow data* terdiri dari dua bagian, yaitu data syarat-syarat batas (*boundary conditions*) dan data kondisi awal (*initial conditions*). *Boundary conditions* dapat terdiri dari *external boundary conditions* (meliputi *upstream boundary conditions* dan *downstream boundary conditions*) dan *internal boundary conditions* (meliputi kondisi aliran yang terletak antara *upstream boundary conditions* dan *downstream boundary conditions*). Tipe syarat batas yang dapat digunakan sebagai pilihan dalam masukan *unsteady flow data* ada bermacam-macam. Untuk *upstream boundary conditions* pilihannya dapat berupa *stage hydrograph*, *flow hydrograph*, atau *stage/flow hydrograph*. Untuk *downstream boundary conditions* pilihannya dapat berupa *stage hydrograph*, *flow hydrograph*, *stage/flow hydrograph*, *rating curve*, atau *normal depth*. Untuk *internal boundary conditions* pilihannya dapat berupa *lateral inflow hydrograph*, *uniform lateral inflow hydrograph*, atau *groundwater interflow* (HEC, 2002 dalam Suryadarma Hasyim, dkk., 2006).

5. Evaluasi dan penilaian kinerja model hidrolik

a. Verifikasi, validasi, dan kalibrasi model

Menurut Apaydin, G. dan Sevgi, L. (2010), tantangan dalam memecahkan masalah rekayasa kehidupan nyata (*real-life engineering*) adalah keandalan hasilnya. Keandalan dicapai setelah serangkaian uji VV&K, yaitu uji Validasi (model), Verifikasi (data), dan Kalibrasi (kode).

Menurut Vrijdag, A. et al. (2009), “Verifikasi” didefinisikan oleh ASME (The American Society of Mechanical Engineers) sebagai proses penentuan bahwa model komputasi secara akurat mewakili model matematika yang mendasari dan solusinya. Menurut Oberkampf, W. L. et. al. (2003) dalam Vrijdag, A. et. al. (2009), verifikasi sebaiknya dilakukan dengan perbandingan terhadap solusi analitik.

Menurut Vrijdag, A. et al. (2009), dengan tersedianya model yang sudah terverifikasi, langkah selanjutnya adalah mengkalibrasi model simulasi. Fase kalibrasi diperlukan untuk meningkatkan kecocokan antara hasil komputasi dan data eksperimen yang diperoleh dalam eksperimen kalibrasi. Dengan menyesuaikan parameter model simulasi yang tidak pasti, tingkat kecocokan seringkali dapat ditingkatkan secara signifikan.

Menurut Tacker, B. H. (2004) dalam Vrijdag, A. et al. (2009), “Kalibrasi” didefinisikan sebagai proses penyesuaian parameter pemodelan numerik atau fisik dalam model komputasi untuk tujuan meningkatkan kesesuaian dengan data eksperimen. Kalibrasi sering disebut sebagai penyetelan, pencocokan atau sebagai estimasi atau identifikasi parameter. Semua istilah ini mengacu pada aktivitas yang sama. Kalibrasi model simulasi hanya dimungkinkan jika pengukuran sistem nyata (parsial) tersedia. Menurut Ma, L. et al. (2000) dalam Vrijdag, A. et al. (2009), “analisis sensitivitas” adalah proses penentuan laju perubahan keluaran model sehubungan dengan perubahan masukan model (parameter). Ini adalah proses yang diperlukan untuk mengidentifikasi parameter kunci dan presisi parameter yang diperlukan untuk kalibrasi.

Selanjutnya, menurut Vrijdag, A. et al. (2009), “Validasi” didefinisikan sebagai proses penentuan sejauh mana suatu model merupakan representasi akurat dari dunia nyata dari perspektif tujuan penggunaan model tersebut.

Tujuan dari model simulasi adalah untuk membuat prediksi perilaku sistem kehidupan nyata. Karena model simulasi tidak pernah dapat sepenuhnya menangkap fenomena fisik kompleks yang berkontribusi pada perilaku sistem, prediksi simulasi selalu salah, dalam artian tidak pernah benar-benar sesuai dengan kenyataan. Namun model simulasi masih dapat digunakan, selama pengguna memiliki beberapa gagasan tentang seberapa baik prediksi model sesuai dengan kenyataan. Validasi menilai kesesuaian hasil simulasi dengan data eksperimen. Tujuan validasi ini adalah untuk meningkatkan kepercayaan pada prediksi model yang tidak divalidasi (Vrijdag, A. et al., 2009).

b. Metode evaluasi model.

Menurut Moriasi, D. N. et al. (2007), berdasarkan rekomendasi dari ASCE (1993) dan Legates and McCabe (1999) maka evaluasi model adalah dengan menggunakan teknik grafis (*graphical techniques*) dan statistik kuantitatif (*quantitative statistics*).

1) Teknik grafis

Menurut ASCE (1993) dalam Moriasi, D. N. et al. (2007), teknik grafis memberikan suatu perbandingan visual pada data konstituen yang disimulasikan dan yang diukur sehingga digunakan sebagai tinjauan pertama pada kinerja model. Menurut Legates dan McCabe (1999) dalam Moriasi, D. N. et al. (2007), teknik grafis adalah sangat penting untuk evaluasi model yang tepat. Dalam melakukan evaluasi pemodelan simulasi suatu daerah aliran sungai, Moriasi, D. N. et al. (2007) menggunakan dua teknik grafis yang umum dan sangat baik untuk digunakan yaitu grafik hidrograf dan persen kurva probabilitas terlampaui (*percent exceedance probability curves*).

2) Metode statistik kuantitatif

Dalam melakukan evaluasi pemodelan simulasi suatu daerah aliran sungai dengan metode statistik, Moriasi, D. N. et al. (2007) melakukan kajian tiga

kelompok model statistik, yaitu a) *standard regression*, b) *dimensionless*, dan c) *error index*. Dari tiga kelompok model statistik tersebut maka Moriasi, D. N. et al. (2007) merekomendasikan penggunaan tiga metode statistik sebagai metode untuk evaluasi model, yaitu: a) metode Nash-Sutcliffe efficiency (*NSE*), yang terdapat dalam kelompok model statistik *dimensionless*, dan b) metode Percent Bias (*PBIAS*), dan c) metode RMSE-observations standard deviation ratio (*RSR*), yang terdapat dalam kelompok model statistik *error index*.

c. Penilaian kinerja model

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, teknik grafis memberikan tinjauan evaluasi model visual. Memanfaatkan teknik-teknik penting ini biasanya harus menjadi langkah pertama dalam evaluasi model. Suatu kecocokan visual yang umum antara data konstituen yang diamati dan disimulasikan menunjukkan kalibrasi dan validasi yang memadai pada rentang konstituen yang disimulasikan (Singh, J. et al., 2004 dalam Moriasi, D. N. et al., 2007). Prosedur kalibrasi biasanya melibatkan analisis sensitivitas yang diikuti dengan kalibrasi manual atau otomatis. Teknik analisis sensitivitas yang paling mendasar menggunakan diferensiasi parsial, sedangkan metode yang paling sederhana melibatkan nilai parameter pengusik (*perturbing parameter*) satu per satu (Hamby, D. M., 1994 dalam Moriasi, D. N. et al., 2007).

Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai untuk *NSE*, *PBIAS*, dan *RSR*. Dengan nilai tersebut, kinerja model dapat dinilai berdasarkan penilaian kinerja secara umum. Dalam kajian pustaka ini hanya ulasan penilaian kinerja model dengan metode *NSE* saja yang akan disampaikan, sedangkan untuk metode *PBIAS* dan *RSR* dapat dilihat pada Moriasi, D. N. et al. (2007).

Formula untuk perhitungan nilai *NSE* tersebut adalah sebagai berikut (Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970 dan Moriasi, D. N. et al., 2007):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (42)$$

dimana:

- N = jumlah pengamatan yang dilakukan;
 Y_i^{obs} = data observasi hasil pemodelan fisik;
 Y_i^{sim} = data hasil simulasi pada pemodelan matematik;
 Y^{mean} = nilai rata-rata data observasi/pemodelan fisik.

Kinerja terbaik dari nilai prediksi atau model matematik dengan data pengamatan atau model fisik dapat diperoleh jika nilai $NSE = 1$. Untuk menilai kinerja dalam proses verifikasi dan kalibrasi model dilakukan *rating* kinerja hasil pemodelan. Kinerja model dinyatakan “sangat baik (*very good*)” jika nilai NSE lebih besar dari 0,75. Kinerja model dinyatakan “baik (*good*)” jika nilai NSE berada pada kisaran 0,65 hingga sama/kurang dari 0,75. Kinerja model dinyatakan “cukup (*satisfactory*)” jika nilai NSE berada pada kisaran 0,5 hingga sama/kurang dari 0,65. Kinerja model dinyatakan “tidak cukup (*unsatisfactory*)” jika nilai NSE sama/kurang dari 0,5. Tabel 5 merangkum hubungan antara nilai NSE (NSE Index) dengan penilaian kinerja model (*performance rating*).

Tabel 5. Penilaian kinerja model dengan metode NSE

No.	<i>Performance Rating</i>	<i>NSE Index</i>
1.	Sangat baik (<i>very good</i>)	$0,75 < NSE \leq 1,00$
2.	Baik (<i>good</i>)	$0,65 < NSE \leq 0,75$
3.	Cukup (<i>satisfactory</i>)	$0,5 < NSE \leq 0,65$
4.	Kurang (<i>unsatisfactory</i>)	$NSE \leq 0,50$

M. Kajian Metode untuk Mendapatkan Nilai Koefisien Kekasaran Manning Secara Eksperimental di Laboratorium

Terdapat berbagai referensi untuk mengetahui metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien kekasasaran Manning n secara eksperimental di laboratorium. Dalam hal ini, kajian metode yang digunakan hanya mengambil referensi dari penelitian yang dilakukan oleh para peneliti di lembaga pendidikan

tinggi yang ada di Indonesia dengan pertimbangan bahwa alat uji flum yang digunakan secara tipikal umumnya hampir sama.

Beberapa jurnal yang terkait dengan penelitian untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning n untuk material berbahan non tradisional secara eksperimental di laboratorium pendidikan di Indonesia tersebut dijelaskan secara singkat di bawah ini.

1) Kombinasi material *fiber* bergelombang dan material kaca

Al Amin, M.B. dkk. (2013) melakukan penelitian untuk menyelidiki pengaruh perubahan kedalaman aliran terhadap nilai kekasaran Manning pada saluran komposit atau nilai koefisien kekasaran Manning ekuivalen (n_e). Penelitian dilakukan dengan mengalirkan air pada model saluran terbuka dengan pasangan *fiber* bergelombang pada dasar saluran dan kaca pada dinding saluran. Pengujian dilakukan dengan menggunakan model saluran terbuka (flum) yang terdapat di Laboratorium Mekanika Fluida dan Hidrolika Jurusan Teknik Sipil Universitas Sriwijaya, Palembang.

2) Material Akrilik

Putro, H. dan Hadihardaja, J. (2013) melakukan penelitian secara eksperimental untuk mendeskripsikan perbedaan koefisien kekasaran Manning n pada material saluran yang sama namun dengan kemiringan dan debit aliran yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan menggunakan model saluran terbuka dengan menggunakan material pasangan (*lining*) berbahan akrilik. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pengaliran Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro, Semarang.

3) Material *PVC (Polyvinyl Chloride)*

Mera, M. dan Robi, R. (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui besarnya nilai koefisien kekasaran Manning untuk material pasangan homogen berupa material berbahan *PVC (Polyvinyl Chloride)*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan model saluran terbuka (flum) yang terdapat di Laboratorium Mekanika Fluida dan Hidrolika Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas, Padang.

Dari kajian terhadap ketiga penelitian tersebut di atas, tujuan dan metode penelitian yang dilakukan oleh Mera, M. dan Robi, R. (2013) mempunyai kemiripan dengan tujuan dan metode penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini. Sehingga untuk itu metode penelitian yang dilakukan oleh Mera, M. dan Robi, R. (2013) digunakan sebagai referensi pokok dalam pelaksanaan penelitian ini.

1. Kajian metode untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning untuk material *PVC* secara eksperimental oleh Mera, M. dan Robi, R. (2013)

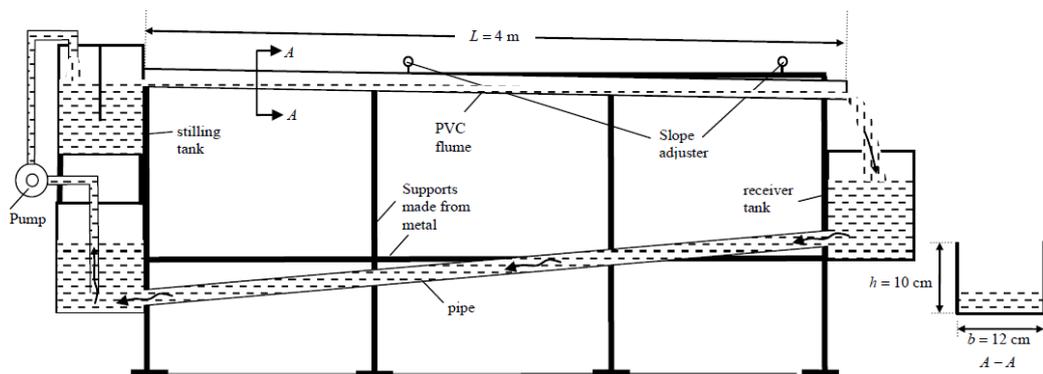
Menurut Mera, M. dan Robi, R. (2013), studi terdahulu terkait penggunaan *PVC (Polyvinyl Chloride)* sebagai material pasangan saluran telah dilakukan oleh beberapa peneliti, yaitu Mays (2000, 2011), Strum (2001), dan Kay (2008), namun penggunaannya difokuskan pada produk perpipaan. Selain itu menurut Mera, M. dan Robi, R. (2013), suatu kajian khusus telah dilakukan oleh Gribbin (2007) yang melaporkan koefisien kekasaran Manning untuk Material *PVC* dengan nilai n berkisar antara 0,007 hingga 0,011, namun tipe salurannya berupa gorong-gorong tertutup (*closed culvert*). Berdasarkan hal tersebut maka Mera, M. dan Robi, R. (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui nilai koefisien kekasaran Manning untuk material *PVC* yang akan digunakan sebagai pasangan di saluran terbuka. Metode penelitian yang dilakukan oleh Mera, M. dan Robi, R. (2013) selanjutnya diuraikan di bawah ini.

a. Bahan dan alat.

Bahan yang digunakan sebagai material pasangan dalam pengujian adalah berupa produk talang *PVC* komersial dengan merk Maspion™, tipe *AW (anti weight)* berwarna putih. Dimensi satu unit talang *PVC* tersebut adalah panjang $L = 4$ meter, lebar $b = 12,0$ cm, dan tinggi $h = 10$ cm.

Peralatan yang digunakan untuk pengujian adalah model saluran terbuka (flum) yang ada di Laboratorium Mekanika Fluida dan Hidrolika Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas, Padang. Talang *PVC* tersebut disokong oleh rangka metal yang ada di perangkat flum dan perangkat flum tersebut dapat mengatur

kemiringan talang sesuai dengan kemiringan yang diinginkan. Di ujung talang bagian hulu dipasang tangki penenang (*stilling tank*). Sedangkan di ujung talang bagian hilir, aliran air dijatuhkan ke tangki penerima (*receiver tank*). Sirkulasi air diatur dengan memompa kembali air dari tangki penerima ke tangki penenang. Sketsa perangkat model saluran terbuka dengan talang *PVC* tersebut disajikan dalam Gambar 28.



Gambar 28. Sketsa talang *PVC* dan perangkat model saluran terbuka yang dilengkapi dengan pengatur kemiringan (*slope adjusters*) (Mera, M. dan Robi, R., 2013)

b. Perhitungan hidrolis untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning.

Untuk menghitung debit (Q), air yang keluar di ujung talang bagian hilir ditampung dengan menggunakan sebuah wadah/ember. Selanjutnya dilakukan pengukuran volume air yang tertampung di ember (V) dan juga waktu yang dibutuhkan untuk memenuhi ember tersebut (Δt). Hal ini dilakukan sebanyak lima kali untuk setiap kemiringan saluran (S), dan debit rata-rata dihitung dengan rumus (Mera, M. dan Robi, R., 2013):

$$Q = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{V_i}{\Delta t_i} \quad (43)$$

Tinggi aliran air (y) di dalam talang diukur dengan sebuah mistar ukur. Pengukuran dilakukan saat keadaan aliran sudah tunak (*steady state*) dan tinggi muka air adalah sama pada beberapa titik di pertengahan ruas talang. Selanjutnya

variabel hidrolis lainnya seperti luas basah A , keliling basah P , dan jari-jari hidrolis R dari penampang melintang talang dapat ditentukan dengan rumus:

$$A = by = 0,12y \quad (44)$$

$$P = b + 2y = 0,12 + 2y \quad (45)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0,12y}{0,12+2y} \quad (46)$$

Menurut Dingman (2009) dalam Mera, M. dan Robi, R. (2013), Robert Manning pada tahun 1889 mengembangkan rumus empiris untuk perhitungan aliran seragam (*uniform flow*) di saluran terbuka dengan rumus modifikasi sebagai berikut:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (47)$$

dimana Q adalah debit yang nilainya didapat dari Persamaan (43).

Semua variable dalam Persamaan (47) sudah diketahui, kecuali nilai variabel n . Untuk mempermudah proses perhitungan nilai n maka Persamaan (47) ditulis ulang dalam bentuk:

$$n = \frac{1}{Q} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (48)$$

c. Kondisi aliran kritis (*critical state*).

Jika aliran dalam kondisi kritis (*critical state*), tinggi kecepatan (*velocity head*) adalah sama dengan setengah kedalaman hidrolis (*hydraulic depth*), dan dapat diekspresikan dalam bentuk:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{D}{2} \quad (49)$$

Kedalaman hidrolis D didefinisikan sebagai rasio antara luas penampang basah A dengan lebar permukaan aliran air di dalam flum T . Dalam kasus saluran dengan penampang persegi empat, nilai lebar atas adalah sama dengan lebar dasar b , sehingga nilai kedalaman hidrolis adalah sama dengan nilai kedalaman aliran ($D = y$). Mensubstitusikan Persamaan (44) ke dalam Persamaan (49), lalu disederhanakan maka hasil substitusi persamaan tersebut menjadi:

$$y = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2g}} = y_c \quad (50)$$

dimana y_c adalah kedalaman air pada keadaan aliran kritis. Jika kedalaman aliran (y_c) yang diprediksi dengan Persamaan (50) adalah lebih besar dari kedalaman aliran yang diukur (y), maka aliran tersebut berada pada keadaan super kritis, namun jika sebaliknya maka aliran tersebut berada pada keadaan sub kritis.

d. Teknik pengumpulan data dan perhitungan nilai koefisien kekasaran Manning.

Mera, M. dan Robi, R. (2013) melakukan pengukuran debit Q sebanyak lima kali dan melakukan pengaturan kemiringan dasar S sebanyak 10 kali dengan interval setiap 1 cm / 400 cm. Semua pelaksanaan tersebut dilakukan secara menerus, dan pompa juga dihidupkan terus tanpa berhenti. Hasil pengukuran untuk beberapa kedalaman air di talang, volume air di ember, dan waktu yang dibutuhkan, dan juga hasil perhitungan kecepatan aliran disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengukuran kedalaman air y di talang *PVC*, volume air V di ember, dan waktu yang dibutuhkan Δt untuk menghitung besarnya debit aliran Q (Mera, M. dan Robi, R., 2013)

i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)
	measured	measured	measured	calculated		measured	measured	measured	calculated
S measured in 1cm/400cm					S measured in 2cm/400cm				
1	2,40	1170	1,82	643	1	1,90	1100	1,72	640
2	2,40	1280	1,94	660	2	1,90	1260	1,81	696
3	2,40	1170	1,75	669	3	1,90	1310	2,00	655
4	2,40	1360	1,90	716	4	1,90	1150	1,72	669
5	2,40	1290	1,94	665	5	1,90	1120	1,59	704
Average Q = 670 cm³/s					Average Q = 673 cm³/s				

i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)
	measured	measured	measured	calculated		measured	measured	measured	calculated
S measured in 3cm/400cm					S measured in 4cm/400cm				
1	1,60	1160	1,72	674	1	1,45	1120	1,65	679
2	1,60	1185	1,81	655	2	1,45	1240	1,69	734
3	1,60	1270	1,94	655	3	1,45	1250	1,78	702
4	1,60	1055	1,53	690	4	1,45	1300	1,79	727
5	1,60	1160	1,78	652	5	1,45	1250	1,78	702
Average Q = 665 cm³/s					Average Q = 709 cm³/s				

Tabel 6. (lanjutan) Hasil pengukuran kedalaman air y di talang, volume air V di ember, dan waktu yang dibutuhkan Δt untuk menghitung besarnya debit Q (Mera, M. dan Robi, R., 2013)

i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)
	measured	measured	measured	calculated		measured	measured	measured	calculated
S measured in 5cm/400cm					S measured in 6cm/400cm				
1	1,25	1360	1,91	712	1	1,10	1300	1,78	730
2	1,25	1400	2,06	680	2	1,10	1490	2,16	690
3	1,25	1510	2,22	680	3	1,10	1360	1,87	727
4	1,25	1390	2,03	685	4	1,10	1440	2,03	709
5	1,25	1370	2,00	685	5	1,10	1490	2,19	680
Average Q = 688 cm ³ /s					Average Q = 707 cm ³ /s				

i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)
	measured	measured	measured	calculated		measured	measured	measured	calculated
S measured in 7cm/400cm					S measured in 8cm/400cm				
1	1,05	1330	1,97	675	1	1,00	1580	2,22	712
2	1,05	1370	1,97	695	2	1,00	1420	2,12	670
3	1,05	1220	1,69	722	3	1,00	1360	1,87	727
4	1,05	1460	2,25	649	4	1,00	1290	1,87	690
5	1,05	1260	1,78	708	5	1,00	1440	2,09	689
Average Q = 690 cm ³ /s					Average Q = 698 cm ³ /s				

i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	i	y (cm)	V (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)
	measured	measured	measured	calculated		measured	measured	measured	calculated
S measured in 9cm/400cm					S measured in 10cm/400cm				
1	0,98	1480	2,19	676	1	0,95	1330	1,88	707
2	0,98	1350	1,85	730	2	0,95	1420	2,03	700
3	0,98	1430	1,97	726	3	0,95	1420	2,00	710
4	0,98	1500	2,28	658	4	0,95	1610	2,34	688
5	0,98	1430	2,19	653	5	0,95	1370	1,88	729
Average Q = 688 cm ³ /s					Average Q = 707 cm ³ /s				

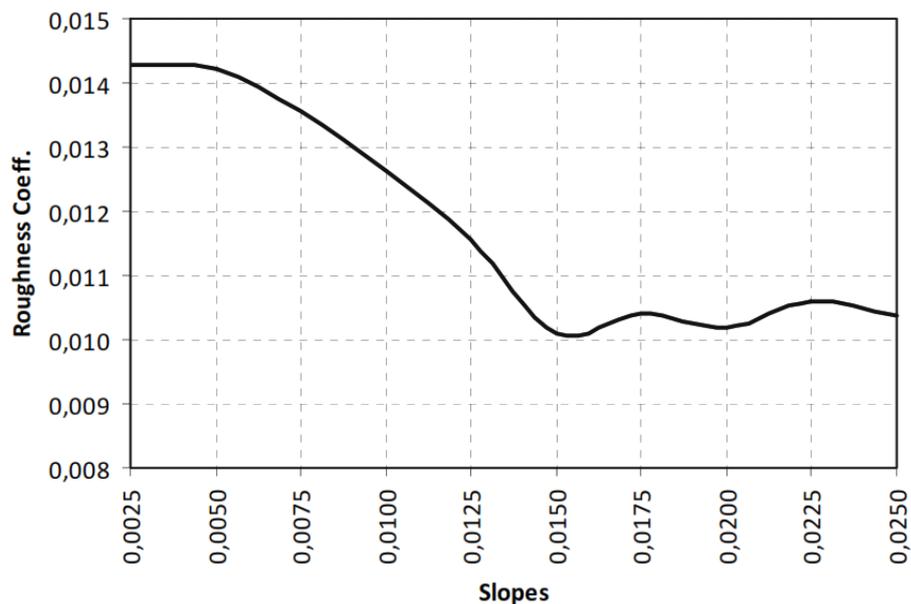
Langkah selanjutnya adalah memprediksi koefisien kekasaran Manning n dengan menggunakan kedalaman aliran (y) dan debit aliran (Q) berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 6. Menggunakan Persamaan (44), (45), (46), (48), dan (50), hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Prediksi nilai koefisien kekasaran Manning n ($b = 12$ cm) untuk material PVC (Mera, M. dan Robi, R., 2013)

S (cm/cm)	y (cm)	Q (cm ³ /s)	A (cm ²)	P (cm)	R (cm)	n	y_c (cm)	State of Flow
0,0025	2,40	670	28,80	16,80	1,714	0,0143	1,47	sub-critical
0,0050	1,90	673	22,80	15,80	1,443	0,0142	1,47	sub-critical
0,0075	1,60	665	19,20	15,20	1,263	0,0136	1,46	sub-critical
0,0100	1,45	709	17,40	14,90	1,168	0,0126	1,53	super-critical
0,0125	1,25	688	15,00	14,50	1,034	0,0116	1,50	super-critical
0,0150	1,10	707	13,20	14,20	0,930	0,0101	1,52	super-critical
0,0175	1,05	690	12,60	14,10	0,894	0,0104	1,50	super-critical
0,0200	1,00	698	12,00	14,00	0,857	0,0102	1,51	super-critical
0,0225	0,98	688	11,76	13,96	0,842	0,0106	1,50	super-critical
0,0250	0,95	707	11,40	13,90	0,820	0,0104	1,52	super-critical

e. Analisis data untuk mendapatkan nilai koefisien kekasaran Manning

Berdasarkan Tabel 7, hubungan antara kemiringan (*slope*) S dan koefisien kekasaran (*roughness coefficient*) hidrolis n talang ditunjukkan pada Gambar 29.



Gambar 29. Grafik hubungan antara kemiringan dasar S dan koefisien kekasaran n talang PVC (Mera, M. dan Robi, R.,2013)

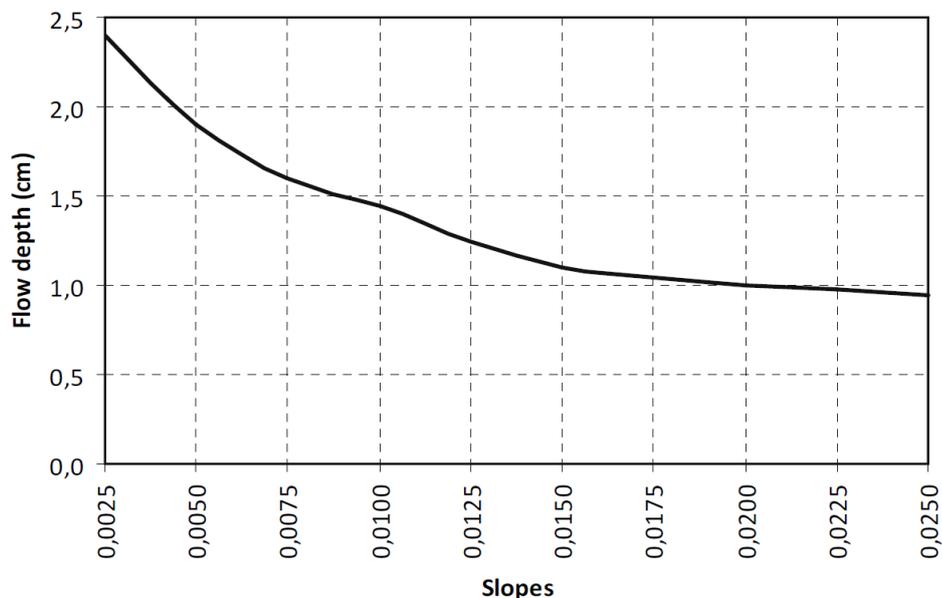
Pada Gambar 29 tersebut dapat dilihat bahwa nilai koefisien kekasaran hidrolis berubah (tidak tetap) jika kemiringan saluran divariasikan/dirubah. Nilai

koefisien kekasaran hidrolis cenderung meningkat ketika kemiringannya landai. Namun, ketika kemiringannya di atas 5 cm / 400 cm (atau 0,0125), koefisien kekasaran hidrolis cenderung stabil pada kisaran 0,010 hingga 0,011. Dilihat dari keadaan aliran, koefisien kekasaran hidrolis adalah lebih stabil pada keadaan aliran super-kritis daripada pada keadaan aliran subkritis.

f. Analisis secara keseluruhan dan kesimpulan

Nilai koefisien kekasaran Manning n untuk talang *PVC* berkisar antara 0,010 sampai 0,014. Untuk penggunaan secara praktis dapat digunakan koefisien kekasaran Manning dengan nilai $n = 0,011$, dan dengan mengatur kemiringan dasar lebih dari 0,0125 maka aliran berada pada kondisi super kritis.

Nilai koefisien kekasaran Manning n untuk talang *PVC* yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sedikit lebih tinggi dari koefisien kekasaran untuk pipa *PVC* seperti yang dilaporkan oleh Gribbin (2007) yaitu dengan kisaran nilai $n = 0,007$ hingga 0,011. Peningkatan kemiringan (*slope*) dasar saluran dari 0,0025 menjadi 0,0250 menyebabkan kedalaman aliran (*flow depth*) turun secara signifikan menjadi 40% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30.



Gambar 30. Grafik hubungan antara kemiringan dasar S dan kedalaman aliran y pada talang *PVC* (Mera, M. dan Robi, R., 2013)

2. Alternatif perhitungan debit dengan menggunakan *current meter*

Jika Mera, M. dan Robi, R. (2013) melakukan pengukuran debit dengan cara mengukur volume air yang masuk ke dalam suatu wadah dalam interval waktu tertentu, maka terdapat alternatif lainnya untuk mengukur debit yaitu dengan menggunakan alat pengukur arus atau *current meter*. Terdapat berbagai merk dan tipe *current meter* yang tersedia di pasaran dan untuk setiap produk *current meter* tersebut mempunyai spesifikasi dan manual masing-masing. Pengukuran kecepatan aliran (kecepatan rata-rata) dengan menggunakan *current meter* dilakukan pada kedalaman 0,6 dari setiap kedalaman aliran (y) yang terjadi (Subramanya, K., 2008). Dalam interval waktu tertentu (Δt), dilakukan pencatatan terhadap jumlah putaran (N) yang terjadi di perangkat *current meter* tersebut. Tergantung dari jenis peralatan *current meter* yang digunakan, secara umum rumus perhitungan kecepatan aliran adalah sebagai berikut (Putro, H. dan Hadihardaja, J., 2013):

$$\bar{v} = a \times \frac{N}{\Delta t} + b \quad (51)$$

dimana,

\bar{v} = kecepatan aliran rata-rata (m/s);

a dan b = konstanta yang diberikan dalam spesifikasi produk *current meter* yang digunakan;

N = jumlah putaran yang terjadi pada pengukuran kecepatan pada interval waktu (Δt) tertentu.

Debit Q selanjutnya dihitung dengan melakukan perkalian antara nilai kecepatan aliran rata-rata \bar{v} yang diperoleh dari Persamaan (51) dengan luas penampang basah A pada aliran yang terjadi di dalam flum.

N. Hipotesis

Berdasarkan hasil evaluasi awal untuk nilai koefisien kekasaran Manning yang diperoleh dari spesifikasi produk perpipaan komersial (*Grandpipe*TM dan *Jiubo Composite*TM) dan hasil pengujian *FFRP* oleh Okazawa, H. et al. (2008) maka nilai koefisien kekasaran Manning n untuk material pasangan berbahan *GFRP*

dengan tipe kaku (*rigid*) hasil olahan pabrik di Indonesia yang diperoleh dari hasil pengujian nantinya diperkirakan berada pada kisaran $n = 0,0084 - 0,0094$.

Apabila nilai koefisien kekasaran Manning n tersebut diganti dengan nilai koefisien kekasaran Strickler ($k = 1/n$) maka nilai koefisien kekasaran Strickler untuk material pasangan berbahan *GFRP* tersebut berada pada kisaran $k = 119 - 106$.

Perbandingan nilai koefisien kekasaran Manning n dan nilai koefisien kekasaran Strickler k untuk tiga tipe material yang dapat digunakan sebagai pasangan pada saluran irigasi di Indonesia selanjutnya disajikan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hipotesis perbandingan nilai koefisien kekasaran Manning n dan nilai koefisien kekasaran Strickler k untuk kajian tiga tipe penggunaan material pasangan di saluran irigasi di Indonesia

No.	Jenis Pasangan (<i>Lining</i>)	Nilai Koefisien Kekasaran Hidrolis	
		Strickler ($k = 1/n$)	Manning ($n = 1/k$)
1.	Pasangan Batu	60	0,0167
2.	Beton	70	0,0143
3.	<i>GFRP</i>	119 - 106	0,0084 - 0,0094