

DISERTASI

**KINEMATIKA ALIRAN SEARAH DAN GERUSAN DASAR
PADA STRUKTUR HYBRID ENGINEERING
SECARA EKSPERIMENTAL**

*Directional Kinematics Flow and Base Scouring on
Hybrid Engineering Structure Experimentally*

**HENDRA HAFID
D013171021**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI
KINEMATIKA ALIRAN SEARAH DAN GERUSAN DASAR
PADA STRUKTUR *HYBRID ENGINEERING*
SECARA EKSPERIMENTAL

HENDRA HAFID
D013171021

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 03 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT
NIP. 196012311986091001

Co-Promotor



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

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST, MT
NIP. 198104252008121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



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

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



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

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Hendra Hafid
Nomor mahasiswa : D01301710021
Program studi : Doktor Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Kinematika Aliran Searah dan Gerusan Dasar pada Struktur *Hybrid Engineering* secara Eksperimental” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T., sebagai Promotor, Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, M.T., dan Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T., sebagai co-promotor-1 dan co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (Seminar Nasional Teknik Sipil XI 2022, Halaman 141-146, dan ISSN: 2459-9297) sebagai artikel dengan judul “Struktur *Hybrid Engineering* Sebagai *Permeable Breakwater* untuk Mereduksi Gelombang pada Pantai Berpasir” di Jurnal Internasional (Design Engineering, Volume 2023: Issue 01, Halaman 15-28, dan ISSN: 0011-9342) sebagai artikel dengan judul “*Directional Kinematics Flow and Base Scouring on Hybrid Engineering Structure Experimentally*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 3 Februari 2023

Yang menyatakan

A 10,000 Indonesian Rupiah banknote is shown with a signature written over it. The signature is in black ink and appears to be 'Hendra Hafid'. The banknote features the number '10000' and the text 'SPULUH RIBU RUPIAH' and 'SERBIMPEL'.

Hendra Hafid

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama pengembangan struktur *Hybrid Engineering* adalah hasil yang baik ditunjukkan pada penggunaan sebagai *breakwater* yang berfungsi juga sedimen trap pada pantai utara Jawa dan penggunaan bahan yang mudah didapatkan disekitar lokasi sehingga dengan penggunaan sebagai krib dan ambang dasar dapat menjadi alternatif penanganan erosi di pantai dan gerusan di sekitar pilar jembatan

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T. sebagai promotor, Dr. Eng. Farouk Maricar, M.T. sebagai co-promotor-1, dan Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T.,M.T. sebagai co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng., Alm. Prof. Dr. Eng. Dadang Ahmad Suriamihardja, M.Eng., Dr. Eng. Ir. Rita Tahir Lopa, M.T., dan Dr. Eng. Mukhsan Putra Hatta, S.T.,M.T. sebagai komisi tim penguji
3. Prof. Dr. Henny Herawati, S.T., M.T. sebagai penguji eksternal yang telah memberi masukan dan arahan dalam penyelesaian penulisan disertasi ini.
4. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor ilmu teknik sipil.
5. Kepala Laboratorium Hidrolika atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium. Terima kasih juga saya sampaikan kepada Bapak Ahmad atas bantuan dalam penggunaan peralatan laboratorium
6. Bapak/Ibu Dosen Pengajar di Program Doktor Teknik Sipil peminatan bidang keairan atas segala ilmu dan wawasan yang diberikan.

Akhirnya, kepada almarhum kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada teman-teman Program Doktor Ilmu Teknik Sipil angkatan 2017 atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Disertasi ini disusun dengan mengerahkan semua kemampuan dan potensi penulis, namun disertasi ini masih perlu disempurnakan untuk menjawab bermacam masalah erosi

dan gerusan. Untuk itu semua masukan, saran, dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan guna perbaikan dan kesempurnaan tulisan ini. Semoga disertasi ini membawa manfaat yang sebesar-besarnya untuk pemerhati bangunan air dan khususnya masyarakat dunia pendidikan

Penulis

Hendra Hafid

ABSTRAK

Hendra Hafid. *Kinematika Aliran Searah dan Gerusan Dasar pada Struktur Hybrid Engineering secara Eksperimental* (dibimbing oleh **Muhammad Arsyad Thaha, Farouk Maricar dan Bambang Bakri**).

Rekayasa *hybrid engineering* (HE) adalah teknologi memanfaatkan sumber daya alam yang ada disekitar dengan menggunakan bahan berupa batang dan ranting dari pohon yang disekitar lokasi. Batang dan ranting dipotong serta disusun membentuk suatu struktur pengendali abrasi dan gerusan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas dari teknologi *hybrid engineering* untuk diterapkan pada bangunan groin, krib dan ambang dasar untuk mereduksi arus searah baik di pantai maupun di sungai yang menyebabkan abrasi dan gerusan serta digunakan sebagai ambang dasar untuk mengamankan pilar jembatan dari gerusan. Penerapan *hybrid engineering* sebagai *breakwater* dan perangkap sedimen pada daerah pantai telah memberikan hasil yang baik sehingga dapat dikembangkan pada bangunan groin, krib dan ambang dasar yang bersifat permeable. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental laboratorium pada dengan melakukan simulasi pada model struktur HE. Tiga macam model struktur HE dengan permeabilitas dan lebar struktur disimulasi dengan beberapa variabel berpengaruh seperti kecepatan (v), kedalaman aliran (h), panjang struktur (B) dan diameter butiran sedimen (d_{50}). Simulasi dilakukan untuk menggambarkan pengaruh dari variabel tersebut baik secara tunggal maupun gabungan. Hasil yang didapatkan untuk kinematika aliran terjadi penurunan kecepatan pada bagian hulu dan terjadi peningkatan pada bagian hilir akibat adanya struktur HE yang menyebabkan penurunan kedalaman aliran bagian hilir, untuk kedalaman gerusan relatif (ds/B) akan semakin besar karena dipengaruhi oleh semakin kecilnya rasio permeabilitas struktur dan semakin besarnya diameter butiran sedimen serta semakin besarnya bilangan froude. Persamaan kedalaman gerusan relatif (ds/B) yang diperoleh dari hasil gabungan semua parameter adalah $ds/B = 2.154 + 0.047v/\sqrt{g \cdot h} - 0.002h/\sqrt{g \cdot t} - 7.482d_{50}/h - 0.615\gamma_s/\gamma_w - 0.552\zeta$ dan dari hasil perhitungan diperoleh nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.89$ dan koefisien korelasi 94% sehingga persamaan tersebut dapat digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan dibawah struktur *hybrid engineering*.

Kata kunci : *Hybrid Engineering*, permeabilitas struktur, kedalaman gerusan

ABSTRACT

Hendra Hafid. *Directional Kinematics Flow and Base Scouring on Hybrid Engineering Structure Experimentally* (supervised by **Muhammad Arsyad Thaha, Farouk Maricar** and **Bambang Bakri**)

Hybrid engineering (HE) is a technology that utilizes existing natural resources by using materials in the form of stems and branches from trees around the site. Stems and branches are cut and arranged to form a structure to control abrasion and scouring. This study aims to determine the effectiveness of hybrid engineering technology to be applied to groynes, cribs and ground sill to reduce direct currents both on the beach and in rivers which cause abrasion and scour and to be used as basic thresholds to secure bridge piers from scour. The application of hybrid engineering as a breakwater and sediment trap in coastal areas has yielded good results so that it can be developed on permeable permeable permeable groynes, cribs and ground sill. The research method used was laboratory experimental by simulating the structure HE models. Three kinds of HE structural models with permeability and structural width were simulated with several influential variables such as velocity (v), flow depth (h), structure length (B) and sediment grain diameter (d_{50}). Simulations are carried out to describe the effect of these variables either singly or in combination. The results obtained for flow kinematics show a decrease in velocity in the upstream section and an increase in the downstream section due to the presence of the structure HE which causes the downstream flow depth to decrease, the relative scour depth (ds/B) will be greater because it is influenced by the smaller the permeability ratio of the structure and the larger the diameter of the sediment grains and the greater the froude number. The equation for the relative scour depth (ds/B) obtained from the combined results of all parameters is $ds/B = 2.154 + 0.047v/\sqrt{g \cdot h} - 0.002h/\sqrt{g \cdot t^2} - 7.482d_{50}/h - 0.615\gamma_s/\gamma_w - 0.552\zeta$ and from the calculation results obtained the value of the coefficient of determination $R^2 = 0.89$ and the correlation coefficient of 94% so that this equation can be used to calculate the scour depth under a hybrid engineering structure.

Keywords : Hybrid Engineering, permeability of structure, depth scouring

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN DISERTASI	ii
PERSETUJUAN DISERTASI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSRTAK.....	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	6
C. Tujuan Penelitian.....	7
D. Manfaat Penelitian.....	7
E. Batasan Masalah.....	8
F. Kebaruan Penelitian	8
G. Sistematika Penulisan	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Gerusan.....	11
B. Gerusan lokal di sekitar struktur	25
C. Arus.....	33
D. Kinematika Aliran	37
E. Sturktur Hybrid Engineering (HE).....	45
F. Hukum Dasar Model	54
G. Penelitian Sebelumnya	58
H. Hipotesis	84
I. Kerangka Pikir Penelitian	85
BAB III METODE PENELITIAN	
A. Metode dan Jenis Penelitian.....	85

B.	Tempat dan Waktu Penelitian	87
C.	Sumber Data.....	87
D.	Deskripsi Alat Laboratorium	88
E.	Variabel yang diteliti	90
F.	Rancangan Penelitian	90
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	
A.	Analisa Dimensi.....	101
B.	Analisa Data.....	106
C.	Pembahasan	122
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
A.	Kesimpulan	156
B.	Saran.....	157
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
Tabel 1.	Matriks penelitian sebelumnya terkait struktur <i>hybrid engineering</i> ...	71
Tabel 2.	Data hasil simulasi pada waktu t1 (10 menit)	98
Tabel 3.	Data hasil simulasi pada waktu t2 (20 menit)	99
Tabel 4.	Data hasil simulasi pada waktu t3 (30 menit)	100
Tabel 5.	Variabel yang berpengaruh dalam penelitian	102
Tabel 6.	Tabulasi parameter untuk analisa dimensi	103
Tabel 7.	Penentuan Bilangan dan Berdimensi	105
Tabel 8.	Uji Gradasi Butiran Material Sedimen Pertama	107
Tabel 9.	Uji Gradasi Butiran Material Sedimen Kedua	108
Tabel 10.	Uji Gradasi Butiran Material Sedimen Ketiga	108
Tabel 11.	Hasil Uji Berat Jenis Sedimen Pertama	108
Tabel 12.	Hasil Uji Berat Jenis Sedimen Kedua	109
Tabel 13.	Hasil Uji Berat Jenis Sedimen Ketiga	109
Tabel 14.	Kecepatan aliran hasil pengukuran dan menggunakan persamaan manning	112
Tabel 15.	Perubahan kinematik aliran pada bagian hulu dan bagian hilir struktur HE	114
Tabel 16.	Selisih nilai ds/B hasil eksperimen dengan hasil persamaan	157

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
Gambar 1.	Akumulasi Sedimen balik struktur permeable menunjukkan mangrove secara alami tumbuh di wilayah pesisir Demak saat air surut	3
Gambar 2.	Struktur untuk penanganan abrasi akibat arus sejajar pantai dengan groin permeable.....	5
Gambar 3.	Struktur ambang dasar (<i>ground sill</i>) untuk mencegah gerusan pada pilar jembatan.....	6
Gambar 4.	Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breuser dan raudkivi, 1991:62)	14
Gambar 5.	Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breuser dan raudkivi, 1991:62)	14
Gambar 6.	Variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan ratio kecepatan tegangan geser u (Sumber : Local scour at abutmen; A Review, ASCE Journal 2004)	16
Gambar 7.	Variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan kedalaman aliran (h) (Sumber : Local scour at abutmen; A Review, ASCE Journal 2004).....	17
Gambar 8.	Variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan gradasi sedimen (d_{50}) (Sumber : Local scour at abutmen; A Review, ASCE Journal 2004).....	19
Gambar 9.	Penggolongan transpor sedimen menurut sumber sedimen, mekanisme transpor sedimen, dan pengukuran transpor sedimen	24
Gambar 10.	Groin yang berfungsi sebagai penghalang sedimen litoral	31
Gambar 11.	Beberapa tipe groin	31
Gambar 12.	Ilustrasi perubahan garis pantai akibat groin	33
Gambar 13.	Transpor sedimen sepanjang garis pantai	33
Gambar 14.	Garis pantai yang terbentuk di sekitar struktur groin	34
Gambar 15.	Aliran invisid dan viskos	39
Gambar 16.	Aliran seragam dan tak seragam di sekitar bendung	42
Gambar 17.	Aliran 1D, 2D dan 3D	44
Gambar 18.	Aliran rotasional	45

Gambar 19.	Konsepsi dasar struktur <i>Hybrid Engineering</i> dalam rehabilitasi ekosistem dan kawasan pantai yang terabrasi	46
Gambar 20.	a) Susunan pancang bambu sebagai dasar struktur HE, b) Pemilihan ranting pengisi struktur HE, c) Proses pengisian ranting di struktur HE dan d) Struktur HE yang sudah selesai dan siap digunakan	48
Gambar 21.	Skema Perencanaan dan Pelaksanaan Pembangunan Struktur HE	49
Gambar 22.	Penampang melintang (cross-section) struktur HE yang menggunakan struktur bambu penguat dan perangkai	52
Gambar 23.	Tampak atas (<i>bird view</i>) dari struktur HE yang menggunakan struktur bambu penguat dan perangkai	53
Gambar 24.	Kerangka Pikir Penelitian	85
Gambar 25.	Saluran Uji (<i>Flume Test</i>) Laboratorium Hidrolika Departemen Sipil Universitas Hasanuddin.....	88
Gambar 26.	Peralatan yang digunakan	89
Gambar 27.	Bagan Alir Rancangan Penelitian	92
Gambar 28.	Metode kerja saluran uji (<i>flume</i>)	93
Gambar 29.	Tampak depan model dan samping model.....	94
Gambar 30.	Gambar proyeksi dari model	95
Gambar 31.	(a) Model struktur HE dengan permeabilitas 25% (b) Model struktur HE dengan permeabilitas 47% (c) Model struktur HE dengan permeabilitas 61%.....	95
Gambar 32.	Titik-titik pengukuran kecepatan aliran	96
Gambar 33.	Skema gerusan dasar dibawah struktur pada saluran uji	102
Gambar 34.	Titik pengukuran pada saluran terbuka	110
Gambar 35.	Data kecepatan hasil pengukuran dan persamaan manning, (a) pada kemiringan 0.00005 (b) pada kemiringan 0.0028, (c) pada kemiringan 0.012	112
Gambar 36.	Skema perubahan kinematik aliran pada struktur HE	113
Gambar 37.	Hubungan antara Δv dengan permeabilitas struktur HE	115
Gambar 38.	Perubahan kecepatan aliran pada kemiringan 0.00005.....	116
Gambar 39.	Perubahan kecepatan aliran pada kemiringan 0.0028.....	117

Gambar 40.	Perubahan kecepatan aliran pada kemiringan 0.012.....	117
Gambar 41.	Profil muka air pada saluran uji tanpa model struktur HE.....	118
Gambar 42.	Profil muka air pada saluran uji pada model struktur dengan permeabilitas 25%.....	119
Gambar 43.	Profil muka air pada saluran uji pada model struktur dengan permeabilitas 48%.....	120
Gambar 44.	Profil muka air pada saluran uji pada model struktur dengan permeabilitas 61%.....	120
Gambar 45.	Hubungan perubahan aliran (Δh) dengan permeabilitas struktur...	121
Gambar 46.	Hubungan antara kecepatan (v) dengan kedalaman gerusan (ds) pada kemiringan 0.00005, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	123
Gambar 47.	Hubungan antara kecepatan (v) dengan kedalaman gerusan (ds) pada kemiringan 0.003, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	124
Gambar 48.	Hubungan antara kecepatan (v) dengan kedalaman gerusan (ds) pada kemiringan 0.012, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	125
Gambar 49.	Hubungan antara panjang model (B) dengan kedalaman gerusan (ds) pada kemiringan 0.00005, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	127
Gambar 50.	Hubungan antara panjang model (B) dengan kedalaman gerusan (ds) pada kemiringan 0.003, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	128
Gambar 51.	Hubungan antara panjang model (B) dengan kedalaman gerusan (ds), pada kemiringan 0.012, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	129
Gambar 52.	Hubungan antara permeabilitas (ζ) dengan kedalaman gerusan (ds/B) dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.14$, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	132
Gambar 53.	Hubungan antara permeabilitas (ζ) dengan kedalaman gerusan relatif (ds/B) dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.10$, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	133
Gambar 54.	Hubungan antara permeabilitas (ζ) dengan kedalaman gerusan (ds/B) dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.05$, (a) pada $t_1 = 10$ menit (b), pada $t_2 = 20$ menit, pada $t_3 = 30$ menit	134

Gambar 55.	Hubungan diameter butiran sedimen relatif d_{50}/h dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.00005 pada (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	136
Gambar 56.	Hubungan diameter butiran sedimen relatif d_{50}/h dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.0028, (a) pada t_1 (10 menit), (b) pada t_2 (20 menit), (c) pada t_3 (30 menit).....	137
Gambar 57.	Hubungan diameter butiran sedimen relatif d_{50}/h dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.012, (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	138
Gambar 58.	Hubungan kedalaman gerusan relatif ds/b dengan bilangan froude dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.14$, (a) pada t_1 (10 menit), (b) pada t_2 (20 menit), (c) pada t_3 (30 menit)	141
Gambar 59.	Hubungan kedalaman gerusan relatif ds/b dengan bilangan froude v/\sqrt{gh} dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.10$, (a) pada t_1 (10 menit), (b) pada t_2 (20 menit), (c) pada t_3 (30 menit)	143
Gambar 60.	Hubungan kedalaman gerusan relatif ds/b dengan bilangan froude v/\sqrt{gh} dengan $d_{50}/\gamma_s = 0.05$, (a) pada t_1 (10 menit), (b) pada t_2 (20 menit), (c) pada t_3 (30 menit)	145
Gambar 61.	Hubungan berat jenis sedimen relatif γ_w/γ_s dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.0005, (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	148
Gambar 62.	Hubungan berat jenis sedimen relatif γ_w/γ_s dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.0028, (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	149
Gambar 63.	Hubungan berat jenis sedimen relatif γ_w/γ_s dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan kemiringan dasar 0.012, (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	150
Gambar 64.	Hubungan kedalaman aliran relatif h/gt^2 dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan berat jenis sedimen relatif $\gamma_s/\gamma_w=2.71$ gr/cm ³ , (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	152
Gambar 65.	Hubungan kedalaman aliran relatif h/gt^2 dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan berat jenis sedimen relatif $\gamma_s/\gamma_w=2.70$ gr/cm ³ , (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	153
Gambar 66.	Hubungan kedalaman aliran relatif h/gt^2 dengan kedalaman gerusan relatif ds/B dengan berat jenis sedimen relatif $\gamma_s/\gamma_w=2.69$ gr/cm ³ , (a) t_1 (10 menit), (b) t_2 (20 menit), (c) t_3 (30 menit)	154
Gambar 67.	Hubungan antara kedalaman gerusan relatif ds/B hasil eksperimen dengan kedalaman gerusan relatif ds/B hasil analisis dengan gabungan semua parameter yang berpengaruh	155

- Gambar 68.** Hubungan kedalaman gerusan (d_s) dengan kedalaman aliran (h) . 161
- Gambar 69.** Hubungan kedalaman gerusan (d_s) dengan bilangan froude (fr) ... 162

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
v	= kecepatan
h	= kedalaman aliran
d_{50}	= ukuran diameter partikel sedimen
ζ	= permeabilitas / kerapatan struktur
g	= percepatan gravitasi (9,81 m/det ²)
μ	= kekentalan dinamik zat cair
t	= waktu
B	= panjang struktur
γ_s	= berat jenis sedimen
γ_w	= berat jenis air
Q	= debit aliran
R	= jari-jari hidrolis
n	= koefisien manning
i	= kemiringan saluran
da	= kedalaman aliran bagian hulu struktur HE
db	= kedalaman aliran bagian hilir struktur HE
vd	= kecepatan aliran pada bagian hulu struktur
vu	= kecepatan aliran pada bagian hilir struktur
u^*	= kecepatan tegangan geser
uc	= kecepatan aliran kritis
Fr	= bilangan froude
τ_0	= tegangan geser
τ_c	= tegangan geser kritis
$W1$	= berat piknometer
$W2$	= berat piknometer + tanah
WT	= berat tanah

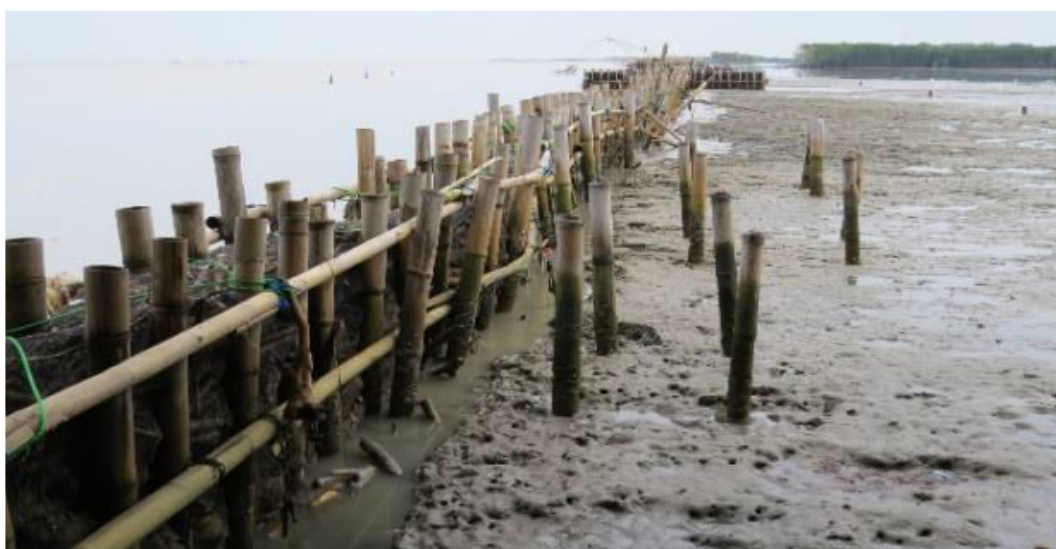
BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Struktur *Hybrid Engineering* (HE) adalah struktur lolos air (*permeable structure*) dari bahan bambu dan ranting kayu dengan prinsip utama dalam struktur HE adalah membuat ‘jebakan’ sedimen di kawasan pesisir yang terabrasi dan juga berfungsi untuk mencegah abrasi. Struktur *Hybrid Engineering* (HE) yang digunakan sebagai *permeable breakwater* berhasil untuk mengembalikan fungsi hutan mangrove adalah dengan membantu menciptakan lingkungan yang paling efektif untuk mangrove tumbuh secara alami. Filosofi untuk membiarkan mangrove ini tumbuh secara alami disebut sebagai “*Building with Nature*” atau “membangun dengan alam” yang mana lebih baik bekerja dengan alam daripada melawan alam. (Tonneijck, 2015). Ide sederhana tersebut diterapkan untuk menghentikan erosi pantai yaitu dengan mengembalikan keseimbangan sedimen di daerah pesisir. Dalam hal ini jumlah sedimen yang masuk harus lebih besar dari pada jumlah sedimen yang keluar (Winterwerp, 2014). Agar dapat menciptakan lingkungan mangrove yang dapat tumbuh dengan baik diperlukan pembangunan struktur *permeable breakwater* yang dapat menjaga kondisi perairan yang cukup tenang dan jumlah sedimen yang optimum yang membawa kandungan nutrisi. Fungsi dari *Permeable Breakwater* untuk melindungi mangrove dan menjaga sirkulasi jumlah sedimen yang ada di

pantai. Sampai dengan fungsi akar mangrove tersebut matang (remaja) dapat hidup bertahan sendiri. Dengan menggunakan konsep *Building with Nature* diharapkan pasokan sedimen yang keluar dari perairan menjadi sedikit sehingga terjadi penumpukan sedimen di belakang struktur seperti di gambar 1



Gambar 1. Akumulasi Sedimen balik struktur permeable menunjukkan mangrove secara alami tumbuh di wilayah pesisir Demak saat air surut

Kementerian Kelautan dan Perikanan sudah membangun struktur *Hybrid Engineering (HE)* di Kabupaten Serang (Provinsi Banten) sepanjang 2000 meter, Kabupaten Cirebon (Provinsi Jawa Barat) sepanjang 1250 meter, Kabupaten Demak dan Rembang (Provinsi Jawa Tengah) masing-masing sepanjang 3500 km dan 1000 meter serta Kabupaten Gresik (Provinsi Jawa Timur) sepanjang 1200 meter, dengan memperlihatkan hasil yang baik dalam kurun waktu 33 bulan efektif dalam mengatasi erosi pantai,

hal ini dibuktikan dengan banyaknya sedimen yang terbentuk setelah dibangunnya struktur HE (D.K Ariwanti, 2018)

Struktur HE telah memperlihatkan hasil yang baik, sehingga perlu dipikirkan pengembangan penggunaan struktur *Hybrid Engineering* (HE) untuk dapat juga digunakan untuk struktur lainnya yang sifatnya mereduksi arus khususnya arus searah. Karena struktur HE sifatnya memberikan hambatan terhadap kecepatan aliran, maka penggunaan struktur HE juga akan menimbulkan gerusan di bawah struktur karena aliran yang mengalami hambatan menyebabkan aliran vertikal kebawah yang mengakibatkan terjadinya gerusan di bawah struktur.

Penelitian ini akan mengkaji bagaimana gerusan lokal yang terjadi di bawah struktur apabila rekayasa *hybrid engineering* ini diterapkan pada struktur yang berfungsi untuk mereduksi arus searah yang bisa diterapkan sebagai *groin permeable* yang berfungsi untuk mereduksi arus sejajar pantai dan sebagai *grounsill* atau ambang dasar yang dapat digunakan untuk melindungi pilar jembatan serta sebagai krib sungai untuk sebagai pengarah aliran. Kemampuan dari struktur kedap air (*unpermeable*) atau konvensional ini dapat memantulkan keseluruhan energi, hal ini juga dapat menciptakan arus yang lebih besar yang dapat menyebabkan erosi di sisi lain dari struktur yang kontraproduktif. Bila dibandingkan dengan struktur *groin permeable* yang hanya merefleksikan sebagian kecil dari energi dari arus. Dengan demikian dapat mempertahankan tingkat sedimen yang baik di kedua sisi struktur. Setelah cukup sedimen yang terkumpul, maka dapat

dilanjutkan dengan menanam mangrove karena sedimen yang terkumpul sudah relatif stabil. Struktur groin *permeable* sudah banyak digunakan salah satu menggunakan kayu ulin atau bayam sebagai material yang tahan air seperti pada gambar 2. Adanya struktur HE ini dapat menjadi salah satu alternatif material untuk *groin permeable*.



Gambar 2. Struktur untuk penanganan abrasi akibat arus sejajar pantai dengan *groin permeable*

Untuk penanganan gerusan pada pilar jembatan dapat dipasang pada bagian hilir pilar jembatan sebagai ambang dasar (*groundsill*) sehingga dapat mereduksi arus sungai dan dapat mempertahankan sedimen di bagian hulu sehingga dapat melindungi pilar jembatan dari *scouring* seperti terlihat pada gambar 3, dimana ambang dasar terbuat dari struktur *sheet pile* beton yang sifatnya *impermeable*. Penggunaan struktur HE juga bisa menjadi salah satu alternatif material yang murah dan mudah didapatkan di sekitar lokasi untuk pembuatan ambang dasar yang sifatnya *permeable*.



Gambar 3. Struktur ambang dasar (*grundsill*) untuk mencegah gerusan pada pilar jembatan

Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai pertimbangan teknis dan efisiensi penggunaan struktur HE untuk penanganan abrasi pada arus sejajar pantai sebagai *groin permeable* dan penanganan gerusan pada pilar jembatan sebagai ambang dasar serta pengarah aliran sungai sebagai krib sungai.

B. Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pola profil aliran searah melalui struktur HE pada beberapa variasi kecepatan dan permeabilitas struktur.
2. Bagaimana memahami pengaruh dimensi struktur HE terhadap gerusan dasar dan perubahan kinematik aliran.

3. Bagaimana merumuskan hubungan kedalaman gerusan dan kinematik aliran dengan struktur HE.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menemukan pola profil aliran searah melalui struktur HE pada beberapa variasi kecepatan dan permeabilitas struktur.
2. Menemukan hubungan pengaruh dimensi struktur HE terhadap gerusan dasar dan perubahan kinematik aliran.
3. Mendapatkan hubungan kedalaman gerusan dan kinematik aliran dengan struktur HE.

D. Manfaat Penelitian

Diharapkan dengan selesainya penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam perencanaan model geometri struktur dengan rekayasa *hybrid engineering* yang efektif dan efisien dan menjadi alternatif bangunan air baik di pantai maupun di sungai yang murah karena bahan bakunya yang berupa ranting, batang pohon atau bambu yang dapat diperoleh dari daerah di sekitar pantai serta dapat dilakukan secara swadaya oleh masyarakat setempat.

E. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran yang diinginkan maka penelitian dibatasi pada :

1. Debit yang dibangkitkan adalah konstan dengan beberapa variasi berdasarkan kemiringan untuk mendapatkan beberapa variasi kecepatan aliran.
2. Aliran yang digunakan adalah aliran searah.
3. Pengaruh dinding saluran uji tidak diperhitungkan
4. Fluida yang digunakan adalah air tawar, salinitas dan pengaruh mineral air tidak diperhitungkan.

F. Kebaruan Penelitian

Kebaruan dari penelitian ini adalah pengembangan rekayasa *Hybrid Engineering* sebagai struktur lolos air yang bisa digunakan sebagai groin, krib dan *ground sill* karena struktur HE ini bahannya murah dan mudah dilaksanakan karena bahan bakunya tersedia di sekitar lokasi. Kebaruan yang lainnya adalah persamaan empiris kedalaman gerusan dalam fungsi koefisien permeabilitas struktur, kinematika aliran dan karakteristik sedimen dasar.

G. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disusun agar tetap terarah pada tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini. Sistematika penulisan yang dituliskan dalam penelitian ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini, berisi tentang latar belakang masalah penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian serta batasan penelitian serta sistematika penulisan. Bab ini menjelaskan permasalahan yang diamati, menjelaskan tujuan dan pentingnya hasil penelitian bagi pengembangan tipe pemecah gelombang, ruang lingkup sebagai batasan dalam penulisan, serta sistematika dan organisasi tentang pengenalan isi per bab dalam disertasi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang teori dasar tentang gerusan dan arus sejajar pantai, gerusan di bawah struktur dan informasi mengenai penelitian-penelitian terdahulu tentang struktur *hybrid engineering* serta kerangka pikir penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, dimana tempat penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dengan membuat model groin atau ambang dasar dengan struktur *hybrid engineering*, variabel yang akan diteliti baik variabel terikat maupun variabel bebas, pelaksanaan studi model dengan berbagai parameter, pelaksanaan simulasi dengan menggunakan saluran uji yang dapat diatur kemiringan dan kecepatan arus yang dibangkitkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data hasil penelitian dan analisis yang dilakukan serta pembahasannya, analisis yang dilakukan meliputi analisis data kecepatan, analisis data fluktuasi muka air, analisis data kedalaman dan volume gerusan, hubungan antara parameter serta temuan empirik dari penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan kesimpulan hasil analisis data penelitian sebagai hasil penelitian yang telah dilakukan yang berkaitan dengan tujuan penelitian serta saran untuk kelanjutan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Gerusan

Gerusan merupakan fenomena alam yang terjadi akibat erosi terhadap aliran air pada dasar dan tebing saluran alluvial. Juga merupakan proses menurunnya atau semakin dalamnya dasar sungai di bawah elevasi permukaan alami (datum) karena interaksi antara aliran dengan material dasar sungai. Gerusan yang terjadi disekitar pilar adalah akibat sistem pusaran (*vortex system*) yang timbul karena aliran dirintangi pilar tersebut. Aliran mendekati pilar dan tekanan stagnasi akan menurun dan menyebabkan aliran ke bawah (*down flow*) yaitu aliran dari kecepatan tinggi menjadi kecepatan rendah. Kekuatan *down flow* akan mencapai maksimum ketika berada tepat pada dasar saluran (Rahmadani, 2014).

Gerusan didefinisikan sebagai pembesaran dari aliran yang disertai dengan pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen yang ditranspor lebih besar dari pada sedimen yang disuplai. Transpor sedimen akan bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar (Laursen, 1952 dalam Daties, 2012).

Pada kondisi aliran bergerak terdapat keadaan gerusan yaitu gerusan batas, besarnya asimtotik terhadap waktu. Menurut Laursen sifat alami gerusan mempunyai fenomena sebagai berikut :

1. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material yang diangkut keluar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut masuk ke dalam daerah gerusan.
2. Besar gerusan akan berkurang apabila penampang basah di daerah gerusan bertambah (misal karena erosi). Untuk kondisi aliran bergerak akan terjadi suatu keadaan gerusan yang disebut gerusan batas, besarnya akan asimtotik terhadap waktu.

Menurut Ettema dan Raudkivi (1982) dalam Sukri (2018), perbedaan gerusan dapat dibagi menjadi:

a. Gerusan umum (*general scour*)

Gerusan yang terjadi akibat dari proses alam dan tidak berkaitan sama sekali dengan ada tidaknya bangunan sungai.

b. Gerusan di lokalisir (*constriction scour*)

Gerusan yang diakibatkan penyempitan alur sungai sehingga aliran menjadi terpusat.

c. Gerusan lokal (*local scour*)

Merupakan akibat langsung dari struktur pada alur sungai. Ada dua macam gerusan lokal menurut Wiyono A dkk (2006), yaitu:

- 1) *Clear water scour* Pergerakan sedimen hanya terjadi pada sekitar pilar. Ada dua macam :

a) Untuk $\left(\frac{V}{V_{Cr}}\right) \leq 0,5$

Gerusan lokal tidak terjadi dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

b) Untuk $0,5 \leq \left(\frac{V}{V_{Cr}}\right) \leq 1,0$

Gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

2) *Live bed scour* Terjadi karena adanya perpindahan sedimen.

Yaitu : jika

$$\left(\frac{V}{V_{Cr}}\right) > 1,0$$

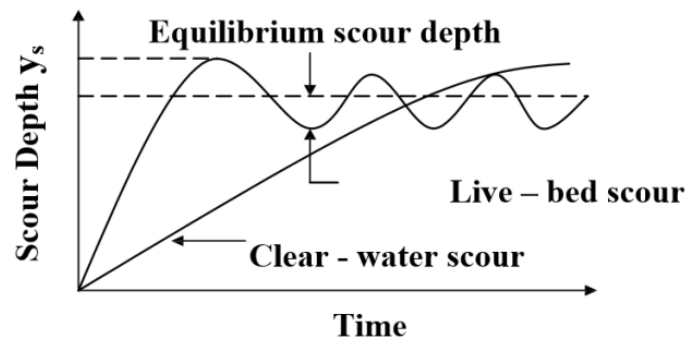
Keterangan :

V = kecepatan aliran rata-rata (m/detik)

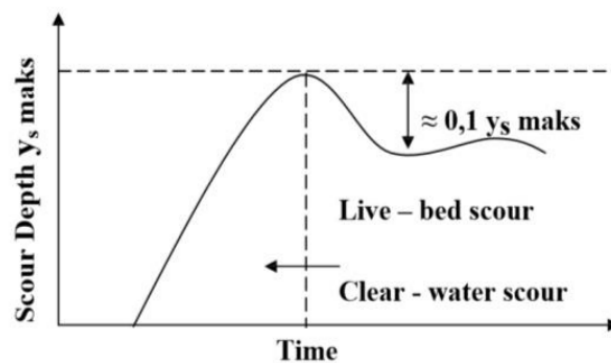
V_{Cr} = kecepatan aliran awal (m/detik)

Ketiga tipe gerusan tersebut dapat terjadi secara bersamaan. Gerusan dari jenis (2) dan (3) dapat dikelompokkan menjadi gerusan dengan air bersih (*clear water scour*) dan gerusan dengan air bersedimen (*live bed scour*). Gerusan dengan air bersih berkaitan dengan dasar sungai di sebelah hulu bangunan dalam keadaan diam (tidak ada material yang terangkut). Sedangkan gerusan dengan air bersedimen terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran menyebabkan material dasar bergerak. Hal tersebut menunjukkan bahwa tegangan geser pada saluran lebih besar dari nilai kritiknya. Kesetimbangan kedalaman gerusan dicapai pada daerah transisi antara *live bed scour* dan *clear water scour*.

Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu dapat dilihat pada gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breusers dan raudkivi, 1991:62)



Gambar 5. Hubungan kedalaman gerusan (y_s) dengan waktu (sumber: Breusers dan raudkivi, 1991:62)

Pada Grafik diatas menunjukkan bahwa kedalaman gerusan untuk *clear water* dan *live bed scour* merupakan fungsi dari kecepatan geser. Keseimbangan gerusan yang terjadi dipengaruhi oleh keadaan yang ditinjau yaitu gerusan dengan air tanpa sedimen (*clear water scour*) atau gerusan dengan air dengan sedimen (*live bed scour*). Pada

keadaan *clear water scour*, gerakan dasar sungai dianggap hanya terjadi pada sekitar pilar dan cenderung terjadi pada dasar yang kasar

1. Faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan

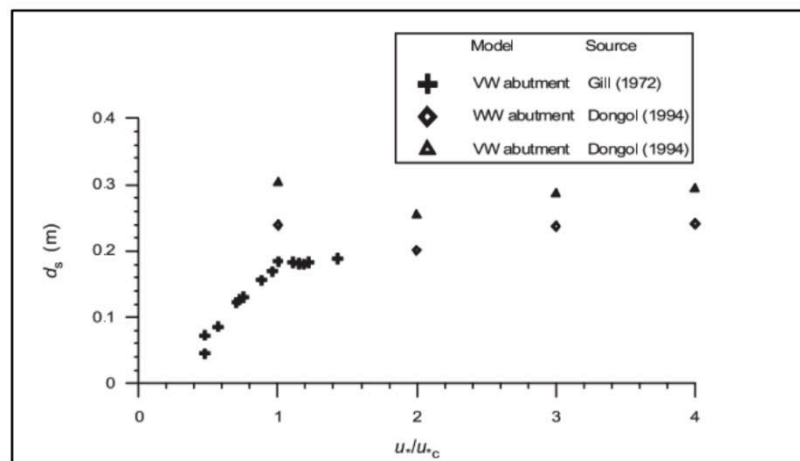
a. Kecepatan Aliran

Pengaruh pendekatan kecepatan aliran U adalah menggabungkan formula prediksi gerusan ke dalam bentuk bilangan Froude (Fr) atau kecepatan geser U^* . Garde, dkk (1961) dalam Dey (2004) menyimpulkan bahwa bilangan *Froude* untuk kecepatan aliran di saluran normal mewakili pengaruh kecepatan aliran pada kedalaman maksimum gerusan.

Secara umum pengenalan tegangan geser kecepatan U^* adalah parameter penting tidak hanya membedakan kondisi gerusan air jernih (*clear water scour*) dari gerusan dasar (*live bed scour*) tapi juga menggambarkan daya erosi aliran untuk ukuran sedimen yang diberikan. Pada kondisi *clear water scour*, kecepatan aliran kritis (U_c) untuk sedimen dasar adalah $\frac{U}{U_c} \leq 1$, sedangkan *live bed scour* terjadi ketika $\frac{U}{U_c} \geq 1$.

Menurut Dey (2004), pada pengenalan di bawah kondisi *clear water scour*, kedalaman maksimum terjadi ketika $U=U_c$. Kedalaman ini disebut ambang batas puncak. Untuk $\frac{U}{U_c} \leq 1$, di bawah kondisi *live bed scour*, kedalaman gerusan pada awalnya berkurang dengan meningkatnya kecepatan aliran mendekati capaian nilai minimum dan kemudian meningkat lagi menuju maksimum kedua. Maksimum kedua terjadi pada saat tahap transisi dasar dari angkutan sedimen di dasar sungai dan disebut

live-bed peak. Data yang terkumpul dari berbagai sumber di tunjukkan pada gambar 6, yaitu pengaruh rasio kecepatan tegangan geser $\frac{U^*}{U_{*c}}$ pada kedalaman gerusan.

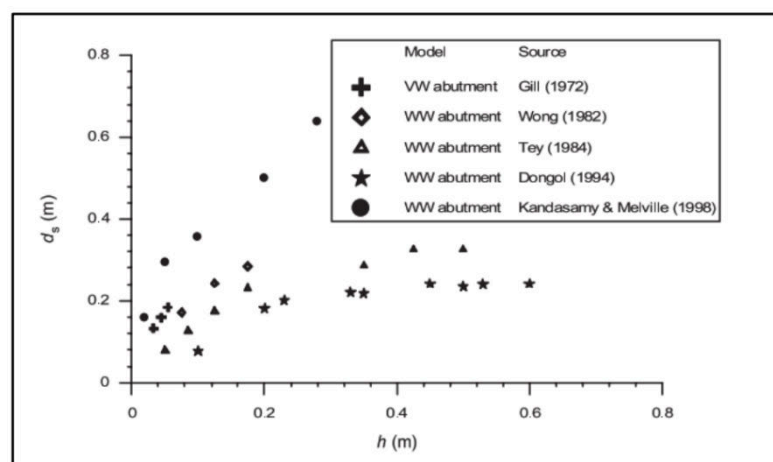


Gambar 6. Variasi Kedalaman Gerusan (d_s) dengan ratio kecepatan tegangan geser u^* (Sumber : Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004)

b. Kedalaman Aliran

Menurut Laursen (1952), pendekatan kedalaman aliran (h) adalah merupakan faktor penting dalam menentukan kedalaman gerusan. Hasil eksperimen Gill (1972), Wong (1982), Tey (1984) dan Kandasamy (1989) dalam Barbhuiya (2004) mengindikasikan bahwa nilai konstan dari rasio kecepatan tegangan geser $\frac{U^*}{U_{*c}}$, ahwa maksimum kedalaman gerusan akan meningkat dengan bertambahnya kedalaman aliran. Hal ini juga diamati bahwa kedalaman gerusan meningkat pada saat laju aliran menurun dengan meningkatnya kedalaman aliran. Pada penelitian yang lain, untuk kedalaman aliran rata-rata, kedalaman gerusan bergantung pada h dan l .

Melville (1992) dalam Dey dan Barbhuiya (2004) membedakan panjang dan pendeknya abutment. Disimpulkan bahwa untuk abutmen pendek ($l/h \geq 1$), kedalaman gerusan bebas dari kedalaman aliran; dan untuk abutmen panjang $l/h \geq 25$, kedalaman gerusan bergantung pada kedalaman aliran. Dey dan Barbhuiya (2004), melaporkan bahwa untuk kedalaman aliran yang lebih pendek, keseimbangan kedalaman gerusan meningkat signifikan dengan meningkatnya h ; dimana untuk kedalaman aliran yang lebih tinggi, keseimbangan kedalaman gerusan adalah bebas dari kedalaman aliran. Ada konsensus bahwa kedalaman gerusan maksimum meningkat pada tingkat yang menurun dengan peningkatan kedalaman aliran dan ada batas kedalaman yang sesuai dengan kedalaman gerusan maksimum adalah tidak tergantung pada kedalaman aliran. Data dikumpulkan dari berbagai sumber diplot pada Gambar 7 untuk mewakili variasi kedalaman gerusan dengan kedalaman aliran Gambar 7 Variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan Kedalaman aliran (h).

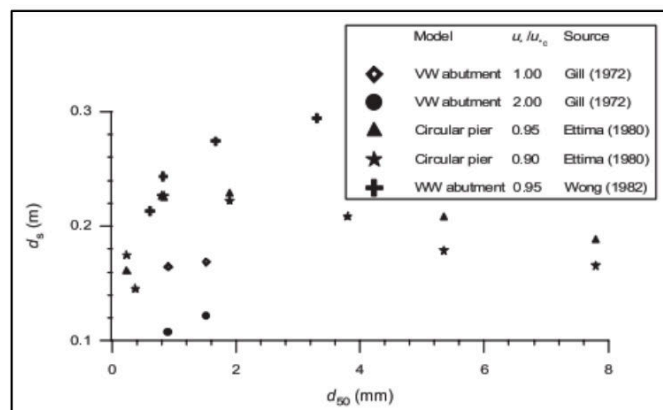


Gambar 7. Variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan Kedalaman aliran (h), (Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004)

c. Ukuran dan Gradasi Butir Sedimen

Karakteristik sedimen dasar berasal dari kurva distribusi ukuran partikel. Dua parameter yang paling sering digunakan adalah diameter sedimen rata-rata d_{50} (atau d) dan standar deviasi $\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0.5}$ dari distribusi ukuran partikel, yang merupakan ukuran keseragaman dari sedimen dasar. Ettema (1980) dan Raudkivi & Ettema (1983) menemukan bahwa kedalaman maksimum pada keseimbangan *clear water scour* d_s di pilar jembatan tergantung pada gradasi sedimen d_s . Mereka mengusulkan hubungan untuk memperkirakan kedalaman gerusan kesetimbangan dalam sedimen tidak seragam dalam hal standar deviasi σ_g diberikan oleh : $\frac{d_s \sigma_g}{D} = K_\sigma d_s / D$

Dey dan Barbhuiya (2004) melakukan percobaan untuk mempelajari efek dari lapis baja tipis pada kedalaman gerusan di abutment. Mereka menyimpulkan bahwa kedalaman gerusan pada abutment dengan lapisan pelindung dalam kondisi gerusan air jernih di bawah batas stabilitas dari permukaan partikel permukaan (mendekati kecepatan aliran hampir sama dengan kecepatan kritis untuk gerakan ambang permukaan partikel) adalah selalu lebih besar dari tanpa lapisan pelindung untuk partikel sedimen dasar yang sama. Pada gambar 8 memperlihatkan hubungan gradasi sedimen d_{50} dengan kedalaman gerusan (d_s).



Gambar 8. Variasi kedalaman gerusan d_s dengan gradasi sedimen d_{50} , (Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004)

Laursen (1960) dalam Dey (2004) menemukan bahwa kedalaman gerusan maksimum dipengaruhi oleh ukuran sedimen pada kondisi *clear water scour* tetapi tidak di kondisi *live bed scour*. Menurut Gill (1972) untuk dua ukuran sedimen ($d = 1,52$ mm dan $0,914$ mm) terindikasi memiliki nilai yang sama dari $\frac{\tau_0}{\tau_c} < 1$, kedalaman gerusan lebih besar dengan sedimen yang kasar dibandingkan dengan sedimen yang halus, dimana $\tau_c =$ tegangan geser kritis untuk partikel sedimen. Untuk *wing-wall*, *spill-through* and *semicircular abutmen*, wong (1982) menemukan kedalaman gerusan meningkat seiring meningkatnya ukuran sedimen dasar untuk nilai konstan dari τ_0/τ_c , dimana mendekati keseragaman.

2. Pengendalian Gerusan Dasar

Pengendalian gerusan di abutmen jembatan antara lain dilakukan dengan membuat riprap yaitu dengan menempatkan batuan kasar di sekitar abutmen tersebut. Seperti pada penelitian Bonasoundas dan Breusers dan

Roudkivi (1991) dalam Prasetyo (2006). Dimensi riprap terdiri atas riprap $6b$, panjang $7b$, ketebalan $b/3$, dimana b adalah lebar pilar dan ukuran minimum batuan, d_r adalah $d_r(cm) = 6 - 3,3 U + 4U^2$.

Hal ini dikuatkan oleh Graf (1998) dalam Prasetyo (2006) yang menyatakan bahwa riprap adalah perlindungan paling efektif untuk mengendalikan lubang gerusan yaitu dengan menimbun batuan kedalam lubang gerusan tersebut dengan lebar $2-3b$ dan tebal $3d_r$. Untuk menetapkan ukuran batuan, d_r (m), hubungan secara empiris adalah $U_d \cong 2.4\sqrt{d_r}$ dengan U_d adalah kecepatan rata-rata pada debit rencana.

Menurut Sosrodarsono (1994) dalam Mulyandari (2010), perlindungan terhadap gerusan lokal adalah dengan membuat ambang. Ambang merupakan suatu bangunan pengendali gerusan yang bertujuan untuk menjaga agar dasar sungai tidak turun secara berlebihan dan diharapkan dengan adanya hambatan tersebut maka gerusan lokal pada bangunan sungai dapat direduksi. Ambang diletakkan di hilir abutment jembatan dibangun pada posisi porosnya tegak lurus arah aliran (Suyono Sosrodarsono (1994) dalam Mulyandari (2010)).

Selain perlindungan tersebut di atas, menurut Abdurrosyid, J (2004:20) pemasangan proteksi berupa hambatan tirai di hulu abutmen dapat mereduksi kedalaman gerusan di abutmen *Spill-through* sebesar 26,58% dan akan mencapai nilai maksimum pada jarak tirai yang optimum terhadap as abutmen. Jarak optimum untuk saluran majemuk dicapai sejauh 1,75 kali lebar dasar abutmen ($1,75 L_b$) pada kondisi *live bed scour*.

Untuk ketinggian hambatan, menurut Pari dkk (2016) dalam Nirhamzah (2022) disarankan 2 – 2,75 kali dari ketinggian muka air. Untuk luasan pori, menurut Kordnaeji, dkk (2017) dalam Nirhamzah (2022) diasumsikan 25% pada pengukuran kekeruhan di hambatan.

3. Gerak awal sedimen

Awal gerak butiran sedimen dasar merupakan awal terjadinya angkutan sedimen di suatu sungai atau saluran terbuka, dan oleh karenanya merupakan hal penting dalam perhitungan angkutan sedimen dan merupakan kondisi batas antara aliran tanpa angkutan sedimen dasar dan aliran dengan angkutan sedimen dasar.

Awal gerak butir sedimen sangat penting dalam kaitannya dengan studi tentang transpor sedimen, degradasi dasar sungai, desain saluran stabil, dsb. Dalam desain saluran stabil, salah satu metode adalah kemiringan dan dimensi saluran dibuat sedemikian hingga aliran tidak menimbulkan erosi di dasar dan tebing saluran. Karena pergerakan butir sedimen sangat tidak teratur, maka sangat sulit untuk mendefinisikan dengan pasti sifat atau kondisi aliran yang menyebabkan butir sedimen mulai bergerak kondisi kritis (awal gerak butir sedimen). Beberapa pendekatan dalam mendefinisikan awal gerak butir sedimen (dikaitkan dengan kondisi aliran):

- a. sudah ada satu butir sedimen yang bergerak
- b. sejumlah butir sedimen sudah bergerak
- c. butir material dasar secara umum sudah bergerak

- d. terjadi pergerakan butir sedimen dan awal gerak sedimen adalah situasi saat jumlah transpor sedimen sama dengan nol.

Gaya-gaya hidrodinamik yang timbul sebagai akibat adanya aliran, bekerja pada material sedimen dasar yang cenderung menyebabkan butiran sedimen tersebut bergerak. Kondisi dimana gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja menyebabkan suatu butiran mulai bergerak disebut kondisi kritis atau gerak awal butiran sedimen. Hasil dari penelitian tentang gerak awal suatu butiran sedimen menunjukkan sangat subjektif sekali karena sifat fisik dari material sedimen tidak sama. Seperti material yang mempunyai kandungan fraksi lanau atau lempung yang cenderung mempunyai sifat kohesif, gaya-gaya yang melawan gaya hidrodinamik lebih disebabkan oleh sifat kohesifitasnya. Berbeda dengan material yang sifat kohesifnya kecil seperti pasir atau batuan, gaya perlawanan terhadap gaya hidrodinamik lebih disebabkan oleh gaya berat butiran itu sendiri. Gerak awal butiran dasar dapat dijelaskan dengan cara seperti (Graf, 1984):

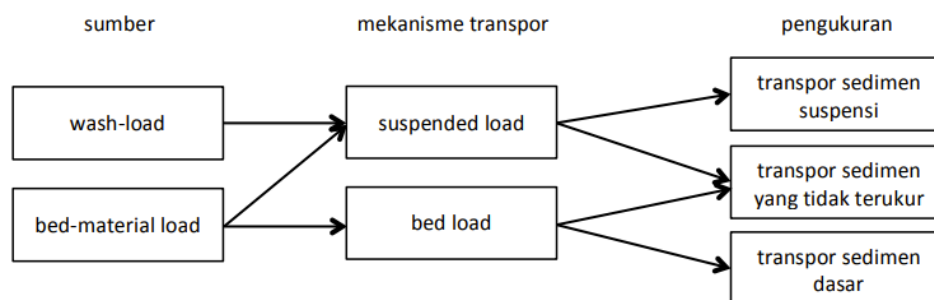
Dengan menggunakan persamaan kecepatan kritis yakni:

- a. Dengan mempertimbangkan pengaruh aliran terhadap butiran.
- b. Dengan kondisi tegangan gesek kritis yakni dengan mempertimbangkan hambatan gesek dari aliran butiran.
- c. Kriteria gaya angkat yakni dengan mempertimbangkan perbedaan tegangan yang menyebabkan terjadinya gradien kecepatan.

4. Transport sedimen

Aliran di sungai tidak hanya berupa aliran air, tetapi seringkali dibarengi dengan pergerakan material padat yang dikenal dengan istilah transpor sedimen. Transpor sedimen berkaitan erat dengan aliran air. Transpor sedimen terjadi karena adanya aliran air. Transpor sedimen menyebabkan erosi atau deposisi. Dua hal ini mengakibatkan perubahan geometri sungai. Perubahan geometri sungai mengubah aliran air. Perubahan aliran air mengubah transpor sedimen. Hubungan timbal balik antara aliran air, transpor sedimen, dan geometri sungai ini lah wujud dinamika sungai. Ilmu yang mempelajari dinamika sungai dalam kaitan dengan interaksi antara aliran air, transpor sedimen, dan geometri sungai dikenal dengan nama morfologi sungai. Sedimen di sungai bersumber dari material dasar sungai. Karena gaya-gaya hidrodinamik aliran air, sebagian material dasar bergerak karena gaya-gaya internal butir material dasar sungai tidak mampu menahan gaya dorong aliran air. Butir material dasar sungai tidak hanya bergerak di dekat dasar dengan cara bergeser, berguling, atau loncat, namun dapat pula meninggalkan dasar sungai, melayang dalam aliran air. Gerakan butir material dasar di dekat dasar dikenal sebagai transpor sedimen dasar (*bed load*) dan gerakan butir material dasar yang melayang bersama aliran dikenal sebagai transpor sedimen suspensi (*suspended load*). Selain berasal dari material dasar sungai, sedimen di sungai berasal dari *wash load*. Ini adalah material padat yang sangat halus, lebih halus daripada 0.062 milimeter, dan berjumlah sangat kecil. *Wash load* diperhitungkan sebagai bagian dari *suspended*

load. Dalam konteks pengukuran transpor sedimen, debit transpor sedimen total adalah debit transpor sedimen dasar dan debit transpor sedimen suspensi. Hasil pengukuran debit transpor sedimen suspensi mengandung seluruh *wash load* dan dapat saja mengandung *bed load*. Jika hasil pengukuran transpor sedimen dijumlahkan, kemungkinan tidak sama dengan debit sedimen total. Ada sebagian transpor sedimen yang tidak dapat diukur. Pada gambar 9 memperlihatkan penggolongan sedimen, mekanisme transpor dan cara pengukuran sedimen.



Gambar 9. Penggolongan transpor sedimen menurut sumber sedimen, mekanisme transpor sedimen, dan pengukuran transpor sedimen

Dalam kaitannya dengan pengukuran transpor sedimen, maka penggolongan transpor sedimen antara transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi sangat penting. Masing-masing jenis transpor sedimen ini memiliki prosedur pengukuran sendiri. Sebaliknya, penggolongan antara material dasar dan *wash load* berperan dalam studi morfologi sungai. Informasi mengenai material dasar penting untuk studi

erosi-sedimentasi, sedang informasi mengenai *wash load* penting untuk studi sedimentasi di tempat-tempat yang memiliki kecepatan aliran rendah sedemikian hingga partikel halus dapat mengendap. Ini terjadi antara lain di waduk dan di hulu bendung.

B. Gerusan lokal di sekitar struktur

Gerusan lokal (*local scouring*) merupakan proses alamiah yang terjadi di sungai akibat pengaruh morfologi sungai atau adanya bangunan air yang menghalangi aliran, misalnya pangkal jembatan, pilar jembatan, abutmen, krib sungai dll. Adanya bangunan air tersebut menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti kecepatan aliran dan turbulensi, sehingga menimbulkan perubahan transpor sedimen dan terjadinya gerusan.

Dalam dan panjang gerusan lokal sangat dipengaruhi oleh debit, kemiringan dasar sungai, diameter butiran, tinggi terjun dan waktu. Makin lama terjadinya limpasan air dan makin besar debit aliran, maka makin dalam dan makin panjang gerusan lokal yang terjadi. Selain itu apabila dasar sungai terdiri dari material lepas yang berdiameter butiran kecil seperti pasir dan kerikil dan kemiringan dasar sungai cukup besar, maka gerusan yang terjadi akan lebih cepat bertambah dalam dan berkembang ke hilir. Gerusan lokal ini akan terus berkembang makin dalam dan makin panjang ke arah hilir sejalan dengan bertambahnya waktu dan debit, sehingga pada gilirannya bangunan akan mengalami kegagalan konstruksi

seperti yang sering kita jumpai pada kasus rusaknya bangunan sungai setelah banjir besar.

1. Ambang dasar (*Groundsill*)

Groundsill merupakan salah satu struktur ambang melintang sungai sehingga dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk mengurangi kecepatan aliran sungai pada bagian hulu strukturnya. Selain daripada itu, *groundsill* juga mungkin dapat meningkatkan laju pengendapan sedimen di bagian hulu strukturnya dikarenakan struktur *groundsill* dapat menjadi penghalang pergerakan sedimen ke bagian hilir sehingga sedimen yang terhalang dapat mengendap di bagian hulu struktur *groundsill* tersebut. Pada umumnya, *groundsill* dibuat di bagian hilir suatu bangunan sungai yang rusak atau terancam rusak disebabkan oleh gerusan seperti pada struktur pondasi bangunan jembatan, tebing sungai runtuh dan longsor akibat erosi di alur sungai dan kombinasi peristiwa erosi dasar sungai dan tebing sungai. Keberadaan *groundsill* diharapkan dapat mengurangi masalah gerusan yang terjadi di dasar sungai sehingga dapat melindungi bangunan-bangunan yang ada pada aliran sungai.

Adanya struktur *grounsill* merupakan bangunan yang terletak melintang, yang dapat mengakibatkan perubahan pola aliran. Bangunan seperti *grounsill* ini selain dapat merubah pola aliran juga dapat menimbulkan perubahan bentuk dasar saluran seperti penggerusan. Gerusan lokal yang terjadi pada *grounsill* biasanya terjadi pada bagian hilir.

Dampak dari gerusan lokal harus diwaspadai karena berpengaruh pada penurunan stabilitas keamanan bangunan air.

Groundsill dibagi menjadi dua jenis yaitu :

a. *Bed Gindle Work* atau ambang dasar tipe datar

Tipe dari jenis ini dimanfaatkan untuk mempertahankan muka dasar sungai tidak mengalami penurunan.

b. *Head Work* atau ambang dasar tipe pelimpah

Berkebalikan dengan tipe datar, *groundsill* ini mempunyai terjunan. Hal ini menyebabkan muka dasar sungai di bagian hulu cenderung mempunyai ketinggian lebih tinggi dibandingkan muka dasar hilir. Pembuatan ambang jenis ini memiliki maksud agar muka dasar sungai menjadi lebih landai.

Apabila ingin melakukan pembangunan ambang tipe pelimpah maka sebaiknya melakukan perencanaan sesuai dengan kinerja hidrolis. Hal ini dilakukan agar apa yang direncanakan dapat berfungsi sesuai dengan apa yang diharapkan. Hal tersebut dapat dibentuk denah penempatan dengan peletakan tegak lurus dari arah sungai.

Jenis ambang yang dimanfaatkan dalam proses pembangunan *groundsill* adalah tegak lurus. Hal ini dikarenakan harganya jauh lebih murah dan ekonomis. Selain itu, pelaksanaannya sangat mudah diterapkan. Sedangkan tipe diagonal sangat jarang digunakan karena ambangnya menjadi semakin panjang dengan aliran permukaan air memusat di bagian tengah ambang. Harga pengerjaan jenis ambang ini jauh lebih mahal.

Jenis ambang berdasarkan konstruksinya dapat dibedakan menjadi 3 yaitu ambang beton, ambang pasangan batu dan ambang matras.

a. Ambang Beton

Bahan materialnya terbuat dari beton cor dengan kelengkapan hubungan dasar blok beton. Jenis konstruksi ini memiliki keunggulan diantaranya, perawatan dan pemeliharannya sangat mudah. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan penambahan lapisan blok beton dengan cara menimbun lapisan berikutnya. Sehingga lapisan sebelumnya atau yang lama tertimbun lapisan baru. Hal ini dapat berlangsung apabila terjadi proses penurunan bawahan sungai.

b. Ambang Pasangan Batu

Biasanya dapat dibuat dari ambang dengan permukaan datar dengan tinggi tekanan lebih kecil. Penggunaan batu-batuan yang dihamparkan dan blok beton biasanya dimanfaatkan untuk pondasi tubuh *groundsill*. Selain itu, bagian permukaannya dilapisai hamparan pasangan batu baik batu kosong maupun batu biasa. Pemilihan batu biasa diperoleh dari sungai yang memiliki arus kuat dan keras.

c. Ambang matras

Jenis ambang ini dibuat dari sekumpulan batang dan disusun mencapai elevasi ambang. Jenis dari ambang ini terdiri atas jenis matras ranting, matras kayu dan matras beton.

Pembuatan desain mercu perlu memikirkan perancangan ketinggian ambang secara tepat. Gambaran tersebut diperlukan agar pelaksanaannya

dapat mengatasi atau menghindari penggerusan di bagian hilir pada ambang. Apabila ketinggian terlalu rendah maka dapat dipastikan bahwa fungsinya menjadi tidak vital apalagi jika banjir datang menerjang.

Perlu melakukan perencanaan ketinggian ambang dengan capaian tinggi berkisar 0-2 meter. Hal tersebut disesuaikan dengan kegunaannya untuk mempertahankan kemiringan sungai agar tidak dapat digerus arus air.

Apabila pembangunan ambang terlalu tinggi dapat menimbulkan bahaya piping. Perlu mengaitkannya dengan fungsi, agar desain ambang sesuai dengan kebutuhan dan kuat melakukan penahanan sedimen dan benturan. Biasanya, berbenturan dengan batang pohon maupun batuan sedimen.

Sebagai bentuk struktur bangunan, ambang dasar sungai mempunyai beberapa bagian. Setiap bagian struktur memiliki fungsi. Beberapa diantaranya meliputi, *Main dam* atau tubuh bendungan, *Apron Hilir*, *Apron Depan*, *Side Wall* dan *Rip Rap*.

a. *Main dam*

Bagian utama pada struktur bangunan ambang. Bagian ini perlu melakukan perhitungan dengan sistem hidrolis saat menentukan ketinggian mercu. Hal ini dilakukan agar perubahan gradasi bentukan alur sungai di bagian dasar memiliki kestabilan dan keamanan yang terjamin.

Apabila desain mercu semakin meninggi maka terjadi penurunan gaya tarikan pada aliran sungai. Apabila dasar sungai memiliki ketinggian terlalu tinggi di hulu maka dapat menyebabkan penggerusan di bagian hilir ambang. Lantai terjun memiliki fungsi secara live dengan energi loncatan air sehingga memiliki tingkat kelandaian khusus.

b. *Apron Hilir*

Bagian dari kolam olah yang memiliki panjang dan ketinggian yang sudah ditentukan berdasarkan nilai ketinggian yang diperoleh muka air hulu. Hal tersebut memiliki fungsi untuk menjaga dasar sungai dari perputaran air secara melingkar yang terjatuh di lantai terjunan.

c. *Apron depan*

Bagian ini terletak di bagian hulu dengan memiliki fungsi untuk mengatasi bahaya piping.

d. *Side Wall*

Bagian yang paling rentang terhadap bahaya piping. Cara mengatasinya dengan pemberian tirai. Namun, di daerah bertanah keras sangat sulit untuk dilakukan. Bangunan ini memiliki fungsi untuk mengarahkan aliran sungai dan sangat rentang terhadap gerusan air.

e. *Rip rap*

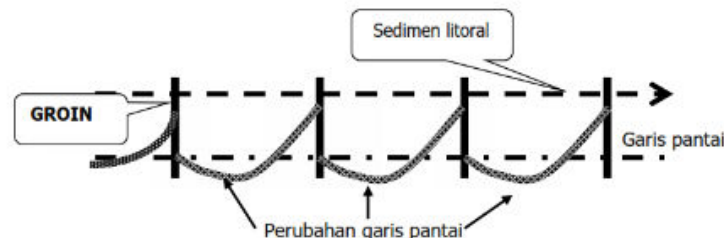
Bagian ini merupakan bagian tambahan di dalam struktur bangunan ambang. Bagian ini memiliki fungsi pelindung dasar sungai dari pengaruh perputaran aliran air. Pembuatannya dapat dilakukan dengan

bronjongan batu-batuan. Lapisan ini lebih dikenal dengan nama lantai konsolidasi.

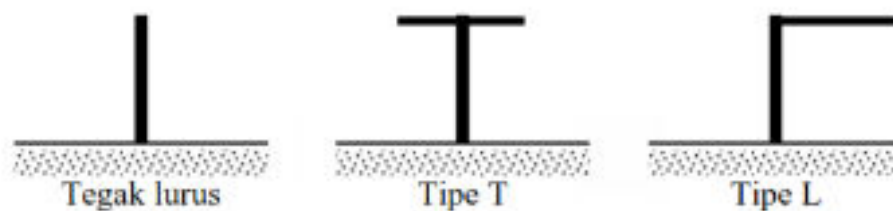
Struktur bangunan *ground sill* sangat penting dalam menunjang konstruksi jembatan. Hal ini dilakukan agar dasar sungai tidak mudah mengalami penurunan. Apabila tidak dilakukan pembangunan ambang dasar, maka dikhawatirkan akan mempersingkat umur jembatan yang dibangun.

2. Groyne

Groyne adalah struktur pelindung pantai yang didesain untuk menahan *longshore sediment / material*. Terdiri dari struktur tipis dengan panjang bervariasi, tinggi bervariasi, dibuat tegak lurus dengan garis pantai seperti yang terlihat pada gambar 10 dan beberapa tipe *groyne* pada gambar 11.



Gambar 10. Groyne yang berfungsi sebagai penghalang sedimen litoral



Gambar 11. Beberapa tipe *Groyne*

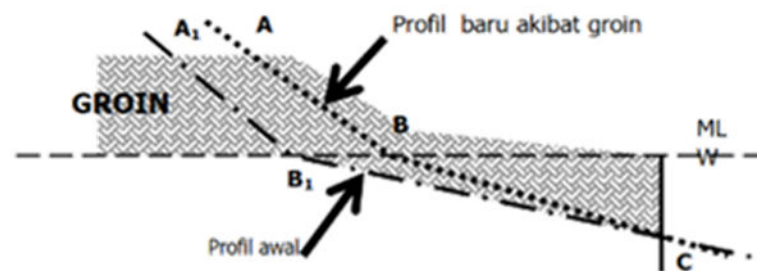
Beberapa defenisi tentang *Groin*

- *Groin* hanya bisa digunakan untuk menahan *longshore transport*.
- Perubahan pantai/garis pantai di dekat *groin* tergantung besar dan arah *longshore transport*.
- Pengendapan/penahanan *longshore* material oleh *groin* akan merubah profil pantai, akan menjaga kerusakan profil alaminya.
- Air yang terdorong oleh gelombang ke dalam *groin* akan atau kadang-kadang kembali ke laut sebagai Arus Rip.
- Prosentase dari *longshore transport* yang melalui *groin* akan tergantung pada; Dimensi *groin*, Dimensi *fillet*, Muka air dan Kondisi gelombang.
- *Material longshore* yang terkumpul di daerah *updrift* tertahan untuk mencapai daerah *down drift*.
- Untuk mencegah terjadi perubahan garis pantai yang ekstrim *Permeable Groin* (mempunyai kisi-kisi) dan dapat juga dengan *Adjustable Groin* yaitu *groin* yang tingginya dapat dilepas atau dirubah tergantung kebutuhan.
- Perubahan profil pantai dekat *groin* dapat digambarkan seperti yang terlihat dalam gambar 12.

$A_1B_1 \parallel AB$

A_1B_1C = Profil awal garis pantai

ABC = Profil baru garis pantai akibat *groin*



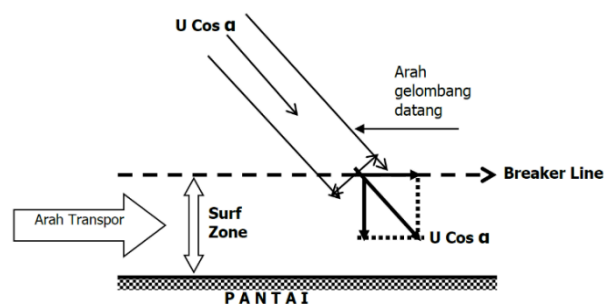
Gambar 12. Ilustrasi perubahan garis pantai akibat groin

Di samping itu pemasangan groin juga akan mengubah pola aliran di sekitarnya yang dapat menyebabkan gerusan di bawah struktur akibat adanya hambatan sehingga arus akan mengarah vertikal ke bawah.

C. Arus

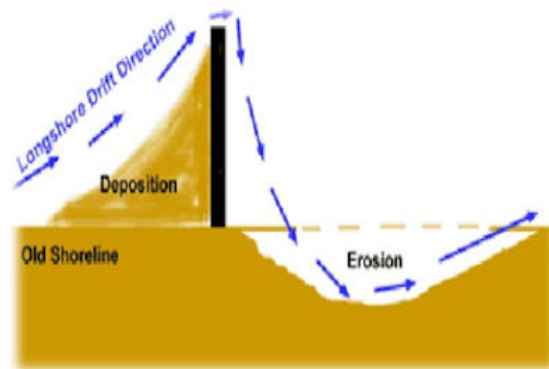
1. Arus laut

Arus menyusur pantai (*long shore current*) terbentuk karena arah gelombang pecah membentuk sudut terhadap garis pantai. Arus menyusur pantai terbentuk di dalam *surf zone* dan dapat membangkitkan transpor sedimen menyusur pantai seperti yang ditunjukkan gambar 13. Transpor sedimen inilah yang dapat menyebabkan erosi di sekitar garis pantai.



Gambar 13. Transpor sedimen sepanjang garis pantai

Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan bangunan pelindung pantai jenis groin. Groin merupakan bangunan pelindung pantai yang berfungsi untuk mengendalikan angkutan sedimen menyusur pantai dengan cara meredam kecepatan arus menyusur pantai sehingga tidak terjadi erosi dan sedimentasi. Struktur groin biasanya dibangun memanjang tegak lurus garis pantai dengan material keras seperti batu alam dan batu buatan (tetrapod, quadripod, dolos dan tribar). Pada salah satu sisi groin terkumpul sedimen sementara erosi garis pantai juga terjadi pada salah satu sisi yang lain. Garis pantai yang terbentuk di sekitar struktur groin ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Garis pantai yang terbentuk di sekitar struktur groin

Jumlah sedimen yang tertangkap dan jumlah pasir yang tererosi tidak dapat diprediksi secara pasti sehingga akan menjadi permasalahan jika jumlah pasir yang tererosi lebih banyak. Apabila hal tersebut terjadi maka groin tidak bekerja sesuai fungsinya. Permasalahan tersebut dapat

dijumpai pada groin dengan struktur *impermeable* atau tidak dapat ditembus arus.

Permasalahan groin dengan struktur *impermeable* dapat diatasi dengan membuat struktur groin menjadi *permeable* atau dapat ditembus arus namun tetap dapat meredam kecepatan arus. Namun demikian, dampak secara langsung dari groin *permeable* terhadap garis pantai masih belum dapat dipastikan dan penelitian mengenai groin *permeable* pun masih sangat terbatas.

2. Arus sungai

Arus sungai merupakan berbagai macam bentuk dan kecepatan aliran sungai, baik dari permukaan hingga dasar sungai atau arah yang dituju aliran air yang disebabkan perbedaan tinggi atau kemiringan tanah. Biasanya arus tercepat adalah ketika mendekati permukaan. Kecepatan aliran tergantung pada *gradient* dan ukuran sungai. Dengan volume yang sama, ukuran sungai yang lebih sempit atau *gradient* yang lebih besar akan mempunyai kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sungai yang memiliki ukuran yang lebih lebar atau *gradient* yang lebih kecil.

Distribusi kecepatan aliran dalam saluran biasanya sangat bervariasi dari satu titik ke titik lainnya (tidak merata) pada seluruh tampang saluran terbuka. Hal ini dapat dijelaskan dengan konsep kekentalan fluida dan kekasaran saluran dimana perbedaan tersebut disebabkan adanya tegangan geser di dinding dan dasar saluran. Rumus yang dipakai dalam penelitian ini adalah rumus untuk menghitung kecepatan aliran yaitu :

$$Q = V \cdot A \quad (2)$$

Keterangan :

V = Kecepatan aliran (m/detik)

Q = Debit aliran (m³/detik)

A = Luas penampang (m²)

Kecepatan aliran rata – rata di suatu bagian penampang basah diperoleh dari hasil pengukuran kecepatan rata – rata dari titik kedalamannya. Kecepatan aliran rata – rata di suatu vertikal diperoleh dari hasil pengukuran kecepatan aliran satu, dua atau tiga titik, yang pelaksanaannya tergantung pada kondisi aliran, kedalaman aliran, lebar aliran dan sarana yang tersedia. Jenis dan cara pengukuran tersebut adalah sebagai berikut :

- a) Pada 0,6 d, dilaksanakan apabila kedalaman air kurang dari 0,75 m .
- b) Pada 0,6 d, dari permukaan air, juga dilakukan untuk mengukur debit banjir apabila cara pengukuran pada 0,2 d dan 0,8 d tidak dapat dilaksanakan karena aliran berubah cepat sehingga waktu yang tersedia relatif pendek.
- c) Pengukuran kecepatan aliran dua titik, dilaksanakan pada 0,2 d dan 0,8 d dari permukaan air, apabila kedalaman air lebih dari 0,75 m.
- d) Pada kedalaman lebih dari 0.75 m dapat juga dilakukan pengukuran kecepatan aliran tiga titik yaitu pada 0,2 d, 0,6 d, dan 0,8 d dari permukaan air.

D. Kinematika Aliran

Kinematika aliran merupakan gerak partikel zat cair tanpa meninjau gaya yang menyebabkan gerak tersebut. Dalam hal ini di pelajari kecepatan di setiap titik dalam medan aliran pada setiap saat. Di dalam aliran zat cair gerak partikel sulit diikuti, oleh karena itu biasanya di tentukan kecepatan pada suatu titik sebagai fungsi waktu. Setelah kecepatan didapat maka dapat di peroleh distribusi tekanan dan kemudian gaya yang bekerja pada zat cair. Macam macam aliran aliran zat cair dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam seperti berikut :

1. Aliran invisid dan viskos
2. Aliran kompersibel dan tak kompersibel
3. Aliran laminar dan turbulen
4. Aliran mantap (*steady flow*) dan tak mantap (*unsteady flow*)
5. Aliran seragam dan tak seragam
6. Aliran satu, dua, dan tiga dimensi
7. Aliran rotasional dan tak rotasional

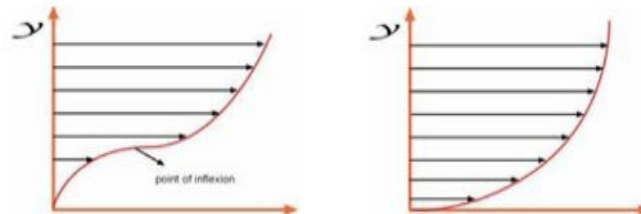
1. Aliran invisid dan viskos

Aliran invisid adalah aliran dimana kekentalan zat cair, μ , dianggap nol (zat cair ideal). Sebenarnya zat cair dengan kekentalan nol tidak ada di alam, tetapi dengan anggapan tersebut akan sangat menyederhanakan permasalahan yang sangat kompleks dalam hidraulika. Karena zat cair tidak mempunyai kekentalan maka tidak terjadi tegangan geser antara partikel zat cair dan antara zat cair dan bidang batas. Pada kondisi tertentu,

anggapan $\mu=0$ dapat diterima untuk zat cair dengan kekentalan kecil seperti air. Aliran inviscid suatu fluida diasumsikan mempunyai viskositas nol. Jika viskositas nol maka konduktivitas thermal fluida tersebut juga nol dan tidak akan terjadi perpindahan kalor kecuali dengan cara radiasi. Dalam prakteknya, fluida inviscid tidak ada, karena pada setiap fluida timbul tegangan geser apabila padanya dikenakan juga suatu laju perpindahan regangan.

Aliran viskos adalah aliran di mana kekentalan diperhitungkan (zat cair riil). Keadaan ini menyebabkan timbulnya tegangan geser antara partikel zat cair yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Apabila zat cair riil mengalir melalui bidang batas yang diam, zat cair yang berhubungan langsung dengan bidang batas tersebut akan mempunyai kecepatan nol (diam). Kecepatan zat cair akan bertambah sesuai dengan jarak dari bidang tersebut. Apabila medan aliran sangat dalam/lebar, di luar suatu jarak tertentu dari bidang batas, aliran tidak lagi dipengaruhi oleh hambatan bidang batas. Pada daerah tersebut kecepatan aliran hampir seragam. Bagian aliran yang berada dekat dengan bidang batas, di mana terjadi perubahan kecepatan yang besar dikenal dengan lapis batas (*boundary layer*). Di daerah lapis batas ini tegangan geser terbentuk di antara lapis-lapis zat cair yang bergerak dengan kecepatan berbeda karena adanya kekentalan zat cair dan turbulensi yang menyebabkan partikel zat cair bergerak dari lapis yang satu ke lapis lainnya. Di luar lapis batas tersebut pengaruh tegangan geser yang terjadi karena adanya bidang batas dapat

diabaikan dan zat cair dapat dianggap sebagai zat cair ideal. Gambar 15 memperlihatkan bentuk aliran inviscid dan viskos.



Gambar 15. Aliran inviscid dan viskos

2. Aliran kompersibel dan tak kompersibel

Semua fluida (termasuk zat cair) adalah kompersibel sehingga rapat massanya berubah dengan perubahan tekanan. Pada aliran mantap dengan perubahan rapat massa kecil, sering dilakukan penyederhanaan dengan menganggap bahwa zat cair adalah tak kompersibel dan rapat massa adalah konstan. Oleh karena zat cair mempunyai kemampatan yang sangat kecil, maka dalam analisis mantap sering dilakukan anggapan zat cair tak kompersibel. Tetapi pada aliran tak mantap sering dilakukan melalui pipa di mana bisa terjadi perubahan tekanan yang sangat besar, maka kompersibilitas zat cair harus diperhitungkan. Bila kerapatan massa fluida berubah terhadap perubahan tekanan fluida maka dikatakan aliran bersifat kompersibel. Sedang bila praktis tak berubah terhadap perubahan tekanan yang ada dalam sistem, maka aliran itu dikatakan bersifat tak kompersibel. Zat cair umumnya dapat dianggap mengalir secara tak kompersibel sedang gas secara umum dipandang mengalir secara kompersibel. Walaupun kasus-kasus tertentu mungkin aliran gas dapat pula dipandang sebagai tak

kompersibel, yaitu bila perubahan kerapatan massa dalam sistem yang ditinjau praktis dapat diabaikan.

3. Aliran laminar dan turbulen

Aliran fluida mengikuti bentuknya, sewaktu mengalir aliran fluida membentuk suatu jenis / bentuk. Jenis dan bentuk dari pergerakan fluida adalah :

a. Aliran Laminar

Aliran laminar adalah aliran fluida yang membentuk menyerupai garis lurus. Aliran laminar terjadi apabila partikel-partikel zat cair bergerak teratur dengan membentuk garis lintasan *kontinyu* dan tidak saling berpotongan. Aliran laminar terjadi apabila kecepatan aliran rendah, ukuran saluran sangat kecil dan zat cair mempunyai kekentalan besar.

b. Aliran Turbulen

Aliran Turbulen adalah aliran fluida yang tidak membentuk suatu garis lurus. Aliran ini terbentuk ketika menemui hambatan. Aliran dimana pergerakan dari partikel – partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida kebagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata di seluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian – kerugian aliran. Pada aliran turbulen , partikel-partikel zat cair bergerak tidak teratur dan garis lintasannya saling berpotongan. Aliran turbulen terjadi apabila kecepatan aliran besar, saluran

besar dan zat cair mempunyai kekentalan kecil. Aliran di sungai, saluran irigasi/drainasi, dan di laut adalah contoh dari aliran turbulen.

Karakteristik aliran turbulen dapat dilakukan komputasi, dengan persamaan menggunakan kecepatan rata-rata U dan fluktuasi dari $u'(t)$ sehingga persamaan kecepatan aliran menjadi :

$$U(t) = U + U'(t) \quad (3)$$

Secara umum, karakteristik dari aliran turbulen ini dinotasikan sebagai kecepatan rata-rata (U, V, W, P dan lainnya) dan kecepatan yang berfluktuasi (y', v', w', p' dan lainnya).

4. Aliran mantap (*steady flow*) dan tak mantap (*unsteady flow*)

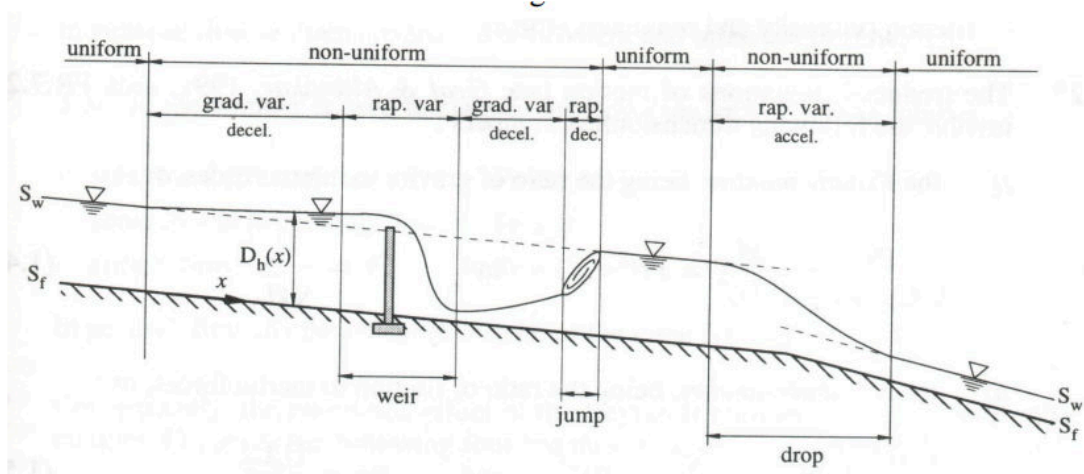
Aliran mantap (*steady flow*) terjadi jika variabel dari aliran (seperti kecepatan V , tekanan p , rapat massa r , tampang aliran A , debit Q , dsb) di sembarang titik pada zat cair tidak berubah dengan waktu.

Aliran tak mantap (*unsteady flow*) terjadi jika variabel aliran pada setiap titik berubah dengan waktu. Contoh aliran tak mantap adalah perubahan debit di dalam pipa atau saluran, aliran banjir di sungai, aliran di estuari (muara sungai) yang dipengaruhi pasang surut. Analisis dari aliran ini adalah sangat kompleks, biasanya penyelesaiannya dilakukan secara numerik dengan menggunakan komputer.

5. Aliran seragam dan tak seragam

Aliran disebut seragam (*uniform flow*) apabila tidak ada perubahan besar dan arah dari kecepatan dari satu titik ke titik yang lain di sepanjang

aliran. Demikian juga dengan variabel-variabel lainnya seperti tekanan, rapat massa, kedalaman, debit, dsb. Aliran di saluran panjang dengan debit dan penampang tetap adalah contoh dari aliran seragam. Aliran seragam merupakan aliran yang tidak berubah-ubah menurut tempat. Konsep aliran seragam dan aliran kritis sangat diperlukan dalam peninjauan aliran berubah dengan cepat atau berubah lambat laun. Perhitungan kedalaman kritis dan kedalaman normal sangat penting untuk menentukan perubahan permukaan aliran akibat gangguan pada aliran. Aliran tak seragam (*non uniform flow*) terjadi jika semua variabel aliran berubah dengan jarak. Gambar 16 adalah contoh dari aliran tak seragam adalah aliran di sungai atau di saluran di daerah dekat terjunan atau bendung.



Gambar 16. Aliran seragam dan tak seragam di sekitar bendung

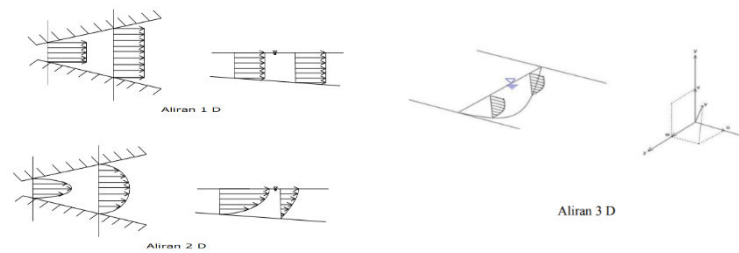
5. Aliran satu, dua, dan tiga dimensi

Dalam aliran satu dimensi (1-D), kecepatan di setiap titik pada tampang lintang mempunyai besar dan arah yang sama. Sebenarnya jenis aliran semacam ini sangat jarang terjadi. Tetapi dalam analisa hidraulika,

aliran tiga dimensi dapat disederhanakan menjadi satu dimensi berdasarkan beberapa anggapan, misalnya mengabaikan perubahan kecepatan vertikal dan melintang terhadap kecepatan pada arah memanjang.

Keadaan pada tampang lintang adalah nilai rerata dari kecepatan, rapat massa, dan sifat-sifat lainnya. Aliran satu dimensi jika parameter aliran (seperti kecepatan, tekanan, kedalaman, dll) pada suatu saat tertentu dalam waktu hanya bervariasi dalam arah aliran dan tidak di seluruh penampang. Flow mungkin goyah, dalam hal ini parameter berbeda dalam waktu tetapi masih belum di seluruh penampang. Contoh aliran satu dimensi adalah aliran dalam pipa .

Dalam aliran dua dimensi (2-D), semua partikel dianggap mengalir dalam bidang sepanjang aliran, sehingga tidak ada aliran tegak lurus pada bidang tersebut. Untuk aliran di saluran yang sangat lebar, misalnya di pantai, maka anggapan aliran dua dimensi mendatar adalah lebih sesuai. Aliran dua dimensi jika dapat diasumsikan bahwa parameter aliran bervariasi dalam arah aliran dan dalam satu arah di sudut kanan ke arah ini. Arus dalam aliran dua dimensi melengkung garis pada pesawat dan adalah sama pada semua pesawat paralel. Contohnya adalah aliran atas musuh bendung arus yang khas. Gambar 17 adalah aliran tiga dimensi (3D) komponen kecepatan yang ditinjau pada koordinat ruang X, Y, Z yaitu u, v, w .



Gambar 17. Aliran 1D, 2D dan 3D

6. Aliran rotasional dan tak rotasional

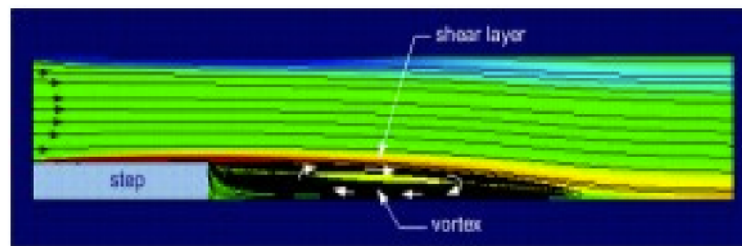
Aliran irrotasional adalah aliran dimana nilai rotasinya atau setiap komponen vektor rotasinya sama dengan nol. Contoh aliran irrotasional adalah medan aliran pada aliran seragam. Penjabaran matematisnya disajikan pada persamaan berikut :

$$\omega = \frac{1}{2} \nabla \times V = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$\Omega = 2\omega = \nabla \times v \quad (5)$$

Omega (kapital) sering dinotasikan sebagai vortisitas (vorticity), sehingga didefinisikan sebagai sebuah vektor yang nilainya dua kalinya vektor rotasi.

Sedangkan aliran rotasional adalah aliran dimana nilai rotasinya atau setiap komponen vektor rotasinya tidak sama dengan nol. Hal ini berarti medan aliran dengan kecepatan vektor V atau curl V tidak sama dengan nol. Contoh dari aliran rotasional ditampilkan pada gambar 18.



Gambar 18. Aliran rotasional

Pada Gambar 18, tampak terjadi pusaran/vortex yang disebabkan ketidakseragaman aliran oleh perubahan penampang akibat terjunan. Namun jauh dari terjunan, aliran masih seragam sehingga aliran irrotasional.

E. Struktur *Hybrid Engineering (HE)*

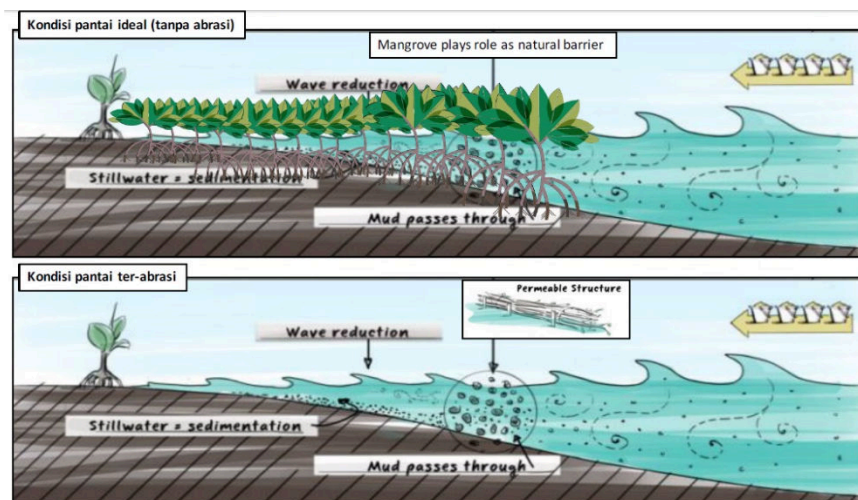
1. Konsep rekayasa struktur *Hybrid Engineering*

Secara alamiah, ekosistem pesisir seperti mangrove memiliki beberapa fungsi seperti akar untuk mengikat sedimen untuk kasus pantai dengan material dominan lumpur sehingga mengurangi dampak pengikisan akibat aksi gelombang. Batang mangrove dengan kerapatan tinggi berfungsi untuk mengurangi atau meredam energi gelombang sehingga dampak hempasannya tidak signifikan dalam mempengaruhi dinamika angkutan sedimen di kawasan pesisir.

Ketika barrier alami tersebut hilang ada beberapa opsi dalam perlindungan kawasan pesisir misalnya menggunakan opsistruktur keras/beton (*grey structure*), opsi gabungan antara struktur keras dan struktur alami (*green-grey structure*) dan opsi struktur alami murni (*green structure*).

Untuk pendekatan alami, pendekatan dengan memanfaatkan proses alam dikenal juga dengan istilah *Building with Nature (BwN)* atau Membangun dengan Alam.

Artinya, memanfaatkan proses-proses alam dalam optimalisasi fungsi struktur atau rekayasa dalam memulihkan kawasan yang rusak. Sejak tahun 2015, Kementerian Kelautan dan Perikanan menerapkan prinsip BwN dalam upaya rehabilitasi ekosistem di kawasan pantai utara Jawa dan di beberapa tempat lainnya di luar Jawa. Gambar 19 memperlihatkan bagaimana konsepsi dasar struktur Hybrid Engineering dalam rehabilitasi ekosistem dan kawasan pantai yang terabrasi.



Gambar 19. Konsepsi dasar struktur *Hybrid Engineering* dalam rehabilitasi ekosistem dan kawasan pantai yang terabrasi.

Sumber Gambar: *Ecoshape Consortium*, 2016

Rekayasa ekosistem yang dilakukan dinamakan *Hybrid Engineering* (HE) dengan membangun struktur lolos air (*permeable structure*) dari bahan bambu dan ranting kayu. Prinsip utama dalam struktur HE adalah membuat 'jebakan' sedimen di kawasan pesisir yang terabrasi. Pada saat

pasang, gelombang datang dengan material lumpur (*suspended material*) akan terbawa ke belakang struktur dan pada saat surut material lumpur tersebut tersimpan atau terkumpul di belakang struktur HE. Dalam waktu tertentu, lumpur di belakang struktur HE tersebut akan mengisi kembali bagian pantai yang ter-abrasi.

Prinsip penting yang perlu dipahami dalam implementasi struktur HE adalah struktur ini bukan berfungsi sebagai alat penahan ombak (APO), tetapi sebagai *sediment trapping* atau jebakan sedimen yang mereplikasi fungsi akar mangrove dalam kondisi ideal. Komponen dari struktur HE terdiri dari 2 pagar bambu yang dibangun sejajar dengan jarak 0.4 – 1.0 meter. Pagar bambu dibangun dari susunan bambu yang dipancangkan di dasar laut sampai batas sedimen keras dengan jarak antar bambu ~0.25 m. Tergantung kriteria kestabilan struktur yang diinginkan, susunan bambu pancang bisa diperkuat dengan bambu pangikat yang dipasang melintang melewati 10 – 20 batang bambu (Gambar 20a).

Ruang di antara pagar bambu diisi dengan ranting pohon berserat seperti ranting jati, mahoni atau ranting karet dengan diameter besar dari 3 cm tetapi tidak terlalu besar agar susunan ranting bisa maksimal dalam menangkap sedimen (Gambar 20a dan 20b).

Pengisian ranting dilakukan secara bertahap dimana ranting pada lapisan dasar laut harus masuk setidaknya ~0.5 m di bawah lumpur lunak. Susunan ranting akan mengalami penyusutan setelah 1-3 hari berada di dalam

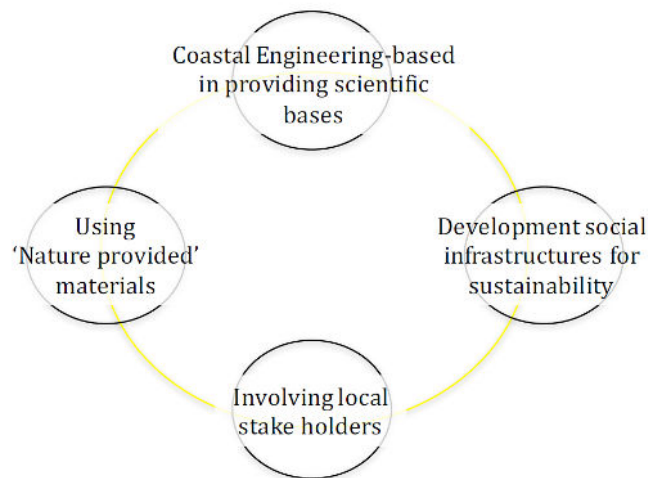
pengaruh air laut sehingga ranting harus ditambah sampai ketinggian yang cukup (batas ketinggian maksimal pasang surut, Gambar 20c dan 20d)



Gambar 20. a) Susunan pancang bambu sebagai dasar struktur HE, b) Pemilihan ranting pengisi struktur HE c) Proses pengisian ranting di struktur HE d) Struktur HE yang sudah selesai dan siap digunakan
Sumber Gambar: *Ecoshape Consortium*, 2016

2. Komponen perencanaan struktur HE

Perencanaan pembangunan struktur HE membawa pendekatan rekayasa/teknik pantai untuk melihat penyebab abrasi dan potensi sukses atau tidaknya intervensi struktur HE yang akan dibangun di lokasi kegiatan (Gambar 21).



Gambar 21. Skema Perencanaan dan Pelaksanaan Pembangunan Struktur HE

Studi pendahuluan dalam perencanaan mencakup batimetri, ketebalan sedimen dasar dan konsentrasi sedimen layang untuk estimasi sumber sedimen bagi struktur HE. Dinamika arus dan gelombang dianalisa dalam hubungannya dengan angkutan sedimen akibat arus dan gelombang pada saat sebelum dan sesudah pembangunan struktur HE (Gambar 21). Analisa kestabilan struktur HE merupakan elemen penting dalam membuat perencanaan. Mengacu kepada fungsinya yang lebih banyak ke *sediment trapping* dan bukan ke Alat Pemecah Ombak (APO), stabilitasi struktur perlu dianalisis dalam kaitannya dengan estimasi tinggi gelombang maksimum dimana struktur HE dapat bertahan.

Komponen bahan dipilih dari material yang tersedia luas di lokasi kegiatan. Sebagai material utama pembuatan pagar, di sepanjang pantai utara Jawa digunakan bambu. Akan tetapi di Kalimantan misalnya bambu

tidak tersedia, maka bisa diganti dengan kayu ulin atau kayu lainnya. Di tempat lain seperti di pulau-pulau kecil dan terluar Indonesia dimana kayu dan bambu sama-sama sulit didapatkan, maka material utama pagar bisa diganti dengan pipa paralon yang diisi dengan semen sebagai pengganti bambu atau kayu. Pemilihan material yang tersedia di lokasi kegiatan dimaksudkan agar dalam perawatan struktur nantinya dapat secara swadaya dilakukan oleh masyarakat penerima manfaat.

Pelibatan pemangku kebijakan terkait di lokasi kegiatan baik pada masa perencanaan dan pelaksanaan pembangunan struktur HE sangat penting. Permasalahan status lahan sebelum dan sesudah munculnya tanah timbul bisa menjadi persoalan pelik di daerah. Sehingga keterlibatan aparat pemerintah sampai tingkat desa sangat penting tidak hanya dalam menjelaskan status lahan lokasi pembangunan HE, tetapi juga dalam menentukan pengelolaan tanah timbul setelah kawasan yang terabrasi pulih kembali.

Pada saat pembangunan struktur HE selesai, pemeliharaan secara terus menerus merupakan komponen kunci agar struktur HE dapat berdayaguna maksimal dalam fungsi rehabilitasi kawasan terabrasi. Untuk itu, dibutuhkan institusionalisasi penyelenggaraan pemeliharaan struktur HE yang disiapkan dari awal. Pola swadaya masyarakat dengan menggunakan alokasi dana desa merupakan opsi yang paling memungkinkan agar pemeliharaan bisa berkelanjutan.

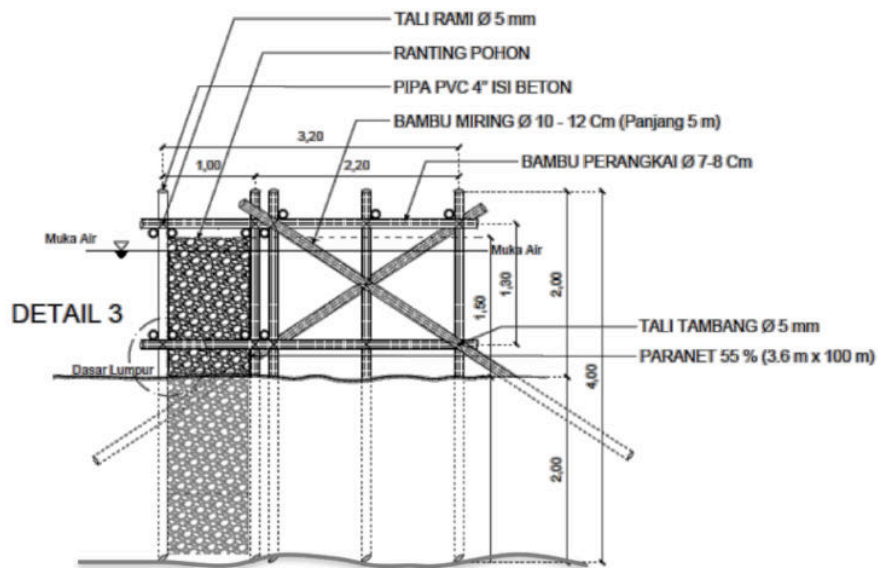
3. Desain umum struktur HE

Komponen struktur HE pada dasarnya hanya terdiri dari dua bagian yakni komponen bambu pancang dan ranting pengisi di antara dua pagar bambu. Akan tetapi, bergantung kepada hasil analisa gelombang dan kriteria stabilitas dari struktur HE menghadapi aksi gelombang, tambahan bambu perangkai (posisi menyilang dari bambu pancang) dan struktur bambu penguat sesuai kebutuhan.

Panjang bambu pancang disesuaikan dengan hasil pengamatan ketebalan lapisan sedimen (lumpur) dan ketinggian pasang surut khususnya ketinggian maksimal pada saat pasang tertinggi sebagai batas atas pengisian ranting.

Pemancangan bambu di tiap segmen sebaiknya dilakukan dengan menggunakan alat ukur *theodolite* untuk menjamin simetri dan konsistensi dari dimensi struktur. Untuk pemancangan bambu di lokasi bekas mangrove, biasanya ada kendala dimana bambu tidak bisa dipancang sesuai kedalaman yang diharapkan. Untuk kondisi ini, disarankan menggunakan alat pemancang menggunakan kompresor udara agar bambu dapat ditekan sampai kedalaman yang diinginkan.

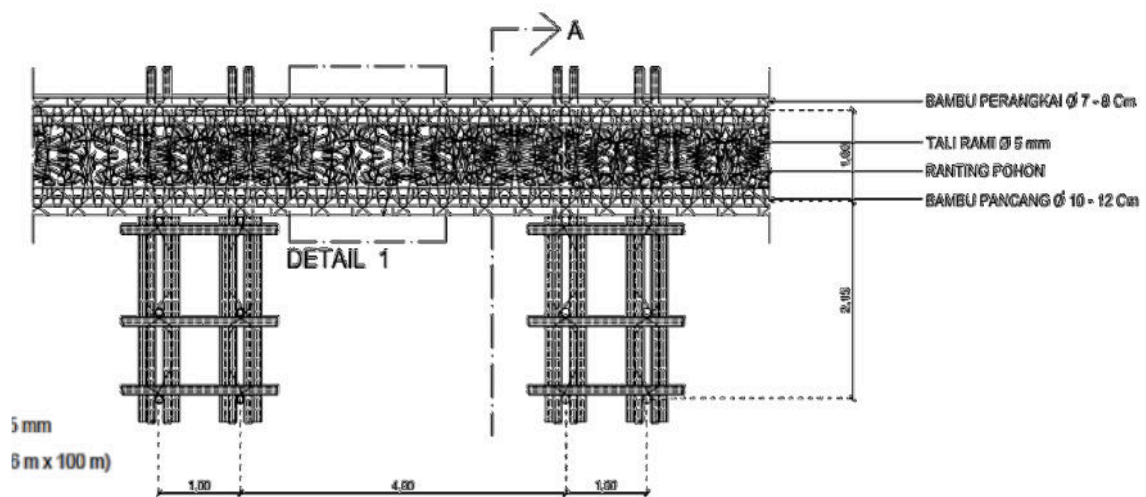
Kedalaman ideal pengisian ranting adalah masuk sampai batas kedalaman lumpur keras seperti seperti pada Gambar 22, akan tetapi pelaksanaan di lapangan sangat sulit karena pengisian ranting dilakukan dengan tenaga manusia. Batas pengisian ranting di bawah lumpur paling tidak 0.5 m di bawah batas permukaan lumpur lunak.



Gambar 22. Penampang melintang (*cross-section*) struktur HE yang menggunakan struktur bambu penguat dan perangkai

Pengisian ranting dilakukan bertahap dari dasar lumpur lunak sampai ketinggian maksimal di batas HHWS (*Highest High- Water Level*) tetapi langsung dalam satu segmen. Bertahap maksudnya pemasangan ranting dilakukan sedikit demi sedikit agar pemadatan ranting sempurna.

Komponen pendukung seperti struktur penguat seperti pada Gambar 23 dapat dibuat atau tidak tergantung kebutuhan dan panjang segmen struktur HE. Untuk struktur HE yang dibangun di lokasi dengan kondisi ombak besar dan kedalaman lumpur lunak yang dangkal maka diperlukan komponen struktur penguat yang cukup rapat untuk menjamin kestabilan struktur.



Gambar 23. Tampak atas (*bird view*) dari struktur HE yang menggunakan struktur bambu penguat dan perangkai

Komponen penunjang lainnya adalah bambu perangkai atau bambu yang dipasang menyilang (horizontal) untuk mengikat 15 – 20 batang bambu pancang. Komponen ini dipasang juga melihat kebutuhan akan stabilitas struktur. Untuk struktur yang membutuhkan bambu perangkai, maka komponen ini dipasang dua lajur yakni pada ketinggian ~ 25 cm di atas permukaan lumpur lunak dan pada ketinggian yang sama dengan level muka air pada saat pasang tertinggi (HHWS | *Highest High-Water Level*).

F. Hukum Dasar Model

Konsep dasar pemodelan dengan bantuan skala model adalah membentuk kembali masalah atau fenomena yang ada di prototipe dalam skala yang lebih kecil, sehingga fenomena yang terjadi di model akan sebangun (mirip) dengan yang ada di prototipe. Kesebangunan yang dimaksud adalah berupa sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik (Nur Yuwono, 1996).

Hubungan antara model dan prototipe diturunkan dengan skala, untuk masing-masing parameter mempunyai skala tersendiri dan besarnya tidak sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai yang ada di prototipe dengan nilai parameter tersebut pada model.

1. Sebangun Geometrik

Sebangun geometrik adalah suatu kesebangunan dimana bentuk yang ada di model sama dengan bentuk prototipe tetapi ukuran bisa berbeda. Perbandingan antara semua ukuran panjang antara model dan prototipe adalah sama. Ada dua macam kesebangunan geometrik, yaitu sebangun geometrik sempurna (tanpa distorsi) dan sebangun geometrik dengan distorsi (*distorted*). Pada sebangun geometrik sempurna skala panjang arah horisontal (skala panjang) dan skala panjang arah vertikal (skala tinggi) adalah sama, sedangkan pada *distorted* model skala panjang dan skala tinggi tidak sama. Jika memungkinkan sebaiknya skala dibuat tanpa distorsi, namun jika terpaksa, maka skala dapat dibuat distorsi. Sebangun geometrik dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots (6)$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} \dots\dots\dots (7)$$

Dengan :

n_L = skala panjang

n_h = skala tinggi

L_p = ukuran panjang prototipe

L_m = ukuran panjang model

h_p = ukuran tinggi pada prototipe

h_m = ukuran tinggi pada model

2. Sebangun Kinematik

Sebangun kinematik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan aliran di dua titik pada model dan prototipe pada arah yang sama adalah sama besar. Pada model tanpa distorsi, perbandingan kecepatan dan percepatan pada semua arah adalah sama, sedangkan pada model dengan distorsi perbandingan yang sama hanya pada arah tertentu saja, yaitu pada arah vertikal atau horizontal. Oleh sebab itu pada permasalahan yang menyangkut tiga dimensi sebaiknya tidak menggunakan *distorted* model. Skala kecepatan diberi notasi n_v , skala percepatan n_a , dan skala waktu n_T didefinisikan sebagai berikut :

$$n_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{n_L}{n_T} \quad \text{untuk kecepatan} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_L}{n_T^2} \quad \text{untuk percepatan} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_L^2}{n_T} \quad \text{untuk debit aliran} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$n_T = \frac{T_p}{T_m} \quad \text{untuk waktu} \quad \dots\dots\dots (11)$$

3. Sebangun Dinamik

Sebangun dinamik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan kinematik, serta perbandingan gaya-gaya yang bekerja pada model dan prototipe untuk seluruh pengaliran pada arah yang sama adalah sama besar. Gaya-gaya yang dimaksud adalah gaya inersia, gaya tekanan, gaya berat, gaya gesek, gaya kenyal dan tegangan permukaan.

Beberapa sebangun dinamik yaitu sebangun dinamik Reynold (*Reynold number*) yang diekspresikan sebagai perbandingan gaya inersia terhadap gaya gesek, sebangun dinamik froude (*froude number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya gravitasi, bilangan Cauchy (*Cauchy Number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya elastik serta bilangan Weiber (*Weiber Number*) yaitu perbandingan antara gaya inersia dan gaya tegangan permukaan.

Untuk penelitian refleksi dan transmisi gelombang terhadap gelombang yang merambat banyak dipengaruhi gaya gravitasi sehingga digunakan kesebangunan Froude. Dengan pertimbangan fasilitas yang ada

di laboratorium, maka pada penelitian ini, akan menggunakan skala panjang yang sama dengan skala tinggi (*undistorted models*) dan menggunakan kesebangunan Froude.

$$Fr = \frac{(\rho L^3) \left(\frac{v^2}{L}\right)}{\rho g L^3} = \frac{v^2}{gL} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Dengan demikian bila gaya gravitasi memegang peranan penting dalam permasalahan, maka perbandingan gaya inersia dan gaya gravitasi pada model dan prototipe harus sama.

$$n_{Fr} = \frac{n_v}{n_L^{0.5}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$n_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

Oleh karena digunakan model tanpa distorsi, maka skala panjang gelombang n_L , skala panjang struktur n_B , skala kedalaman n_d dan skala sarat n_s adalah sama seperti berikut :

$$n_L = n_B = n_H = n_d = n_s \quad \dots\dots\dots (15)$$

Sedangkan skala waktu n_T dan skala gravitasi ditulis seperti berikut:

$$n_T = n_L^{1/2} \text{ atau } n_T = \sqrt{n_L} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Semua gaya-gaya tersebut di atas merupakan fungsi variabel tetap. Variabel yang mempengaruhi gaya-gaya tersebut di klasifikasikan dalam tiga tipe ;

- a. *Linear dimensions* didefinisikan sebagai kondisi batas geometrik seperti panjang (L), lebar (B), tinggi (d), dan kedalaman air (H).
- b. *Fluida Properties* disebut sebagai kerapatan fluida (ρ), viskositas (μ), tegangan permukaan (λ), dan elastisitas (E).
- c. *Kinematic and dynamic characteristics of flow* disebut sebagai kecepatan aliran (v), intensitas tekanan (p), percepatan gravitasi (g).

G. Penelitian Sebelumnya

Penelitian-penelitian terdahulu yang relevansinya berkaitan dengan substansi penelitian, baik yang dilakukan diluar negeri maupun dalam negeri meliputi efektivitas dan efesiensi struktur *Hybrid Engineering* sebagai peredam gelombang maupun untuk mengatasi erosi dan penahan sedimen serta penelitian tentang pengendalian gerusan di sungai dan di saluran terbuka

Menurut A Masruniwati, F Maricar, MP Hatta (2020) pola gerusan yang terjadi di sekitar pintu sorong pada saluran terbuka sangat dipengaruhi oleh variasi debit aliran dan besaran bukaan pintu sorong dan akibat adanya frame pada pintu sorong, maka konsentrasi aliran cenderung mengarah ke tengah dan ke pinggir sebelah kanan sehingga terjadi dominasi gerusan di tengah dan di sebelah kanan saluran

Menurut Ghaderi, et al. (2020) gerusan maksimal yang terjadi pada struktur bangunan pelimpah samping bertangga dipengaruhi oleh debit, tinggi struktur, tinggi tangga, panjang kolam olah, ukuran partikel sedimen,

gravitasi, viskositas, berat jenis air dan berat jenis sedimen. Persamaan fungsi dari beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kedalaman gerusan di bawah struktur pelimpah bertangga dituliskan :

$$\frac{ds_{max}}{h} = -26.34(fd)^{-0.078} - 8.58(\sin(\alpha))^{7.123} - 10.72\left(\frac{b}{h}\right)^{1.07} + 34.42\left(\frac{ht}{h}\right)^{0.017} + 39.31\left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{1.26} \dots\dots\dots (17)$$

Dimana :

Fd : Bilangan froude

α : Kemiringan struktur

d_{50} = Diameter partikel sedimen

h = Tinggi tangga

ht = Kedalaman air di hilir

b = Lebar flume

Menurut Hutagalung, P.S., (2019), yang mengkaji penempatan *Hybrid Engineering* terhadap penanggulangan abrasi dan sedimentasi di Pesisir Tanjung Pontang dengan pemodelan empat alternative penempatan *Hybrid Engineering* yaitu existing, alternatif satu, alternatif dua dan alternatif groin menggunakan software MIKE 21, mendapatkan efektivitas dari struktur *Hybrid Engineering* dalam mengendapkan sedimen dan mereduksi arus sejajar pantai di Pesisir Tanjung Pontang dimana terjadi penurunan rata-rata kecepatan arus dari 0,12 m/s - 0,15 m/s menjadi 0,02 m/s – 0,12 m/s. Pemodelan sedimentasi menunjukkan *Hybrid Engineering* dengan groin tipe L efektif menangkap sedimen dengan perubahan *bed level* rata-

rata sebesar 234 mm – 1413 mm selama satu bulan periode simulasi pada musim barat di lokasi tinjauan potensi abrasi.

Menurut Ginting, J.W.R., (2018), yang menggunakan model struktur *permeable breakwater* dengan rekayasa *hybrid engineering* menghasilkan peredaman energi gelombang untuk berbagai kondisi ketinggian puncak bangunan dari dasar dan lebar struktur, untuk berbagai ketinggian struktur dan lebar struktur dari perbandingan antara ketinggian struktur dengan lebar puncak struktur (h/B) nilai peredaman energi tertinggi adalah pada saat kondisi $h/B = 1$ dimana kondisi tersebut ketinggian struktur sama dengan lebar struktur. Sedangkan untuk kondisi $h/B = 0.5$ dan 2 dimana rasio antara ketinggian struktur lebih besar dari lebar atau sebaliknya lebar struktur lebih besar dari ketinggian struktur maka nilai peredaman energi yang diperoleh sekitar 56-58%. Berdasarkan hasil penelitian ini nilai peredaman energi yang terbesar adalah dengan kondisi struktur ketinggian struktur sama dengan lebar struktur atau kondisi $h/B = 1$ dimana pada model fisik ini diperoleh pada ketinggian struktur 30 cm dan lebar struktur 30 cm dan pada saat kondisi ketinggian struktur 40 cm dan lebar struktur 40 cm. Kondisi peredaman energi gelombang jika dibandingkan dengan kedalaman perairan (d) nilai peredaman energi terbesar adalah pada saat $d = 10$ cm atau pada saat ketinggian muka air paling rendah sedangkan peredaman energi gelombang terbesar pada saat kondisi struktur terendam semua atau pada saat kondisi *submerge*. Sehingga dalam pemanfaatannya sebagai peredam energi gelombang ketinggian struktur harus lebih tinggi

dari ketinggian *Mean sea level* (MSL) di perarian yang akan ditempatkan struktur *permeable breakwater*.

Menurut Ariwanti, D.K., (2018) yang mengkaji efektivitas struktur *Hybrid Engineering* dalam mengatasi Erosi Pantai di Kelurahan Trimulyo Kecamatan Genuk Kota Semarang dengan menggunakan citra satelit resolusi tinggi tahun 2016 dan tahun 2018, mendapatkan hasil efektifitas struktur *hybrid engineering* ditentukan dengan kondisi eksisting melalui serangkaian survey lapangan. 60,51 L/m²/hari. Dengan menggunakan asumsi bahwa laju sedimentasi konstan pada setiap bulan, laju sedimentasi pada struktur hybrid sebesar 0,71 Kg/m²/hari, maka didapatkan volume sedimentasi yang terbentuk dalam kurun waktu 33 bulan adalah sebesar 352.5 m³

Menurut Pranata, A.S.P., (2018), yang melakukan pengujian terhadap dua model groin, yaitu model groin permeable dan groin impermeable, dengan variasi panjang groin dan variasi jarak antar groin 50 meter, 100 meter, 150 meter dan 200 meter. Permodelan dilakukan dengan menggunakan data-data penelitian permodelan fisik oleh Chen., dkk 2003, dan digunakan sebagai masukan pada simulasi model matematik menggunakan bantuan perangkat lunak Boussinesq 2D. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh model variasi panjang groin dan jarak antar groin, reduksi kecepatan arus menyusur pantai dengan rata-rata reduksi sebesar 59,21 % untuk groin permeable ganda dengan panjang groin 50 meter, panjang groin 100 meter 76,02 %, panjang groin 150 meter 79,50 %

dan panjang groin 200 meter 80,49 %. Reduksi kecepatan arus menyusur pantai dengan rata-rata reduksi sebesar 57,42 % untuk groin impermeable ganda dengan panjang groin 50 meter, panjang groin 100 meter 84,61 %, panjang groin 150 meter 88,89 % dan panjang groin 200 meter 89,91 %. Variasi jarak antar groin dan variasi panjang groin diperoleh hasil bahwa semakin panjang groin permeable atau groin impermeable berpengaruh terhadap reduksi kecepatan arus menyusur pantai yang terjadi di daerah *surf zone* dengan penambahan reduksi kecepatan arus menyusur pantai yang terjadi sebesar >20 %. Reduksi kecepatan arus menyusur pantai oleh groin permeable maupun groin impermeable tidak terjadi penambahan reduksi yang signifikan pada panjang groin dengan panjang melebihi daerah *Surf zone* dengan rata-rata penambahan reduksi sebesar >5 %. Kecepatan arus menyusur pantai mendekati kecepatan arus menyusur pantai pada kondisi existing pada jarak >2,4 x panjang groin. Dan Jarak antara groin yang terlalu dekat dibandingkan dengan panjang groin, menyebabkan pergerakan arah arus menuju ke arah laut (*rip current*).

Menurut Ismunanto (2016) yang menilai model distribusi sedimen pada penerapan teknologi sebagai struktur hybrid untuk mitigasi dan rehabilitasi wilayah pesisir di Demak dengan menggunakan metode kuantitatif, termasuk survei lapangan dan metode pemodelan matematika. Model menunjukkan bahwa endapan cukup besar dalam kondisi banjir tertinggi dan harus memiliki struktur yang tepat untuk rekayasa hybrid.

Penelitian ini diharapkan dapat menjawab pertanyaan tentang masalah erosi di Kabupaten Sayung, Demak.

Menurut BWA Ratna Sari, dkk (2016), pola gerusan di sekitar abutmen dengan tipe pondasi yang berbeda dipengaruhi debit dan kedalaman aliran, kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan di sekitar abutmen. Semakin besar kecepatan maka semakin besar kedalaman gerusan dan sebaliknya. Kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan di sekitar abutmen. Semakin besar kecepatan maka semakin besar kedalaman gerusan dan sebaliknya. Pola gerusan yang terjadi di sekitar abutmen adalah erosi pada sisi abutmen bagian hulu dan endapan terjadi di bagian hilir abutmen. Pola gerusan yang terjadi pada ketiga abutmen untuk berbagai kedalaman aliran relative sama namun memiliki panjang gerusan yang berbeda

Menurut Hasdinar Umar, dkk (2016), perhitungan angkutan sedimen menyusur pantai pada Pantai Glagah jika tanpa struktur groin permeable diperoleh sebesar $343,32.103 \text{ m}^3/\text{tahun}$, jika pada Pantai Glagah dipasang struktur groin permeable (kerapatan groin 40%) maka diperoleh angkutan sedimen menyusur pantai sebesar $166,36.103 \text{ m}^3/\text{tahun}$ dengan koefisien reduksi sebesar 0,48

Menurut Suripin, et, al., (2017), menjelaskan proses restorasi mangrove dengan mengembangkan struktur perlindungan pantai yang ramah lingkungan di daerah pantai yang berlumpur. Strukturnya adalah pemecah gelombang yang *permeabel*, terbuat dari bambu dan cabang-

cabang pohon. Ini berfungsi untuk memecah energi gelombang dan untuk menjebak sedimen. Air dan material sedimen dapat menembus struktur selama pasang naik, tetapi ombaknya bisa pecah, sehingga air di belakang strukturnya tenang. Sedimen dapat disimpan di belakang struktur untuk mendukung pembibitan bakau. Struktur tersebut diuji di wilayah pesisir desa Timbulsloko, Kabupaten Demak, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. *Permeable breakwater* pertama terbuat dari kayu jati dan kuas, dan dipasang pada tahun 2008 kurang berhasil karena masalah kutu-moluska. Desain kemudian dimodifikasi dengan mengganti kayu jati dengan bambu, dan dipasang pada 2013. Hasil awal menunjukkan bahwa pemecah gelombang yang dimodifikasi mampu bertahan lebih lama. Sedimen terbentuk di belakang struktur, memungkinkan untuk penanaman bibit bakau pada tahun berikutnya. Mangrove yang tumbuh dengan baik diamati. Pemecah gelombang yang dapat ditembus cahaya ini jauh lebih murah dibandingkan dengan jenis pemecah gelombang lainnya, mudah dibangun, dan mudah disesuaikan dengan kondisi lingkungan setempat. Keberhasilan implementasi *breakwater permeabel* pada tahap awal ini mendorong untuk mengembangkan skala yang lebih besar di desa Timbulsloko dan sekitarnya untuk memperdalam pemahaman tentang restorasi mangrove secara alami.

Menurut Pranoto, H. R., (2016), yang meneliti sedimentasi pada bangunan groin di perairan Timbulsloko, Kabupaten Demak, menunjukkan bahwa arah datang gelombang didominasi dari arah gelombang datang

dominan untuk musim barat yaitu dari arah barat laut dengan membentuk sudut gelombang pecah sebesar $41,29^\circ$ dan kecepatan arus sepanjang pantai sebesar 0,771 m/det. Sedangkan untuk musim timur yaitu dari arah timur laut dengan membentuk sudut gelombang pecah sebesar $37,59^\circ$ dan kecepatan arus sepanjang pantai sebesar 0,629 m/det. Untuk potensi transport sedimen pada musim barat yaitu 630,28 m³/hari lebih besar daripada musim timur sebesar 250,708 m³/hari dengan nett sedimen sebesar -73,709 m³/hari dan laju sedimentasi pada groin di perairan Timbulsloko pada sisi timur laut groin lebih tinggi dibandingkan pada sisi barat daya groin yaitu berkisar dari 67,89 gr/m²/hari s/d 476,29 gr/m²/hari dengan jenis sedimen yaitu lanau dan lanau lempungan.

Menurut Iskandar M.T, dkk (2014), aliran hidrodinamika pada pilar menyebabkan aliran ke bawah yang ditunjukkan oleh gerusan di bagian hulu pilar. Penggerusan akan mencapai titik keseimbangan pada ke 75, rasio kedalaman gerusan ds/b berkisar antara 0,03 – 0,46. Penggunaan *swivel* dapat mengurangi kedalaman gerusan hingga 44,44%. Analisis transpor sedimen membuktikan bahwa Froude yang digunakan semakin tinggi lebih besar butiran diangkut.

Menurut Mahardi, W., (2014) yang mengkaji mengenai pembentukan sedimen di sekitar struktur APO dan struktur permeable HE sampai dengan layak ditanami mangrove dengan pemodelan. Pengambilan sampel menggunakan purpose sampling method terhadap data hidro-oseanografi (pasang surut, arus, gelombang), sedimen, dan perubahan garis pantai.

Pengamatan pada APO segmen-1 sedimen yang terkumpul selama 7 bulan sebanyak 4.519 m³ atau 21,52 m³/hari dan segmen-2 sebanyak 4.836 m³ atau 26.87 m³/hari. Sedangkan struktur permeabel HE 1-3 segmen selama 6 bulan (Desember 2013 - Mei 2014) sebanyak 3849 m³ atau 21,38 m³/hari. Hasil pemodelan dengan program CEDAS simulasi 6 bulan menunjukkan sedimentasi sebesar 3550 m³. Sedangkan jenis mangrove yang cocok ditanam dengan substrat lumpur berpasir adalah *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora stylosa*.

Menurut Dalrion (2016) gerusan kaki disebabkan oleh dua hal, yaitu proses pecah gelombang itu sendiri dan proses interaksi yang terjadi antara gelombang pecah dan struktur. Pengaruh gelombang pecah menghasilkan gerak partikel aliran yang sangat fluktuatif akibat intensitas turbulensi aliran di daerah kaki struktur. Pengamatan menunjukkan terangkatnya material dasar saat gelombang pecah, serta aliran *down rush* saat massa aliran bergerak menuruni lereng struktur menuju *offshore* dan mengendapkan material pasir hasil gerusan sejarak tertentu di sisi *offshore* kaki struktur. Hasil pengujian mendapatkan terjadinya peningkatan gerusan terhadap peningkatan kemiringan pantai ($\tan \beta$) serta penurunan kedalaman air relatif di kaki struktur (d_s / L). Hasil pengamatan visual saat simulasi memperlihatkan proses pecah gelombang dan transpor sedimen ke arah *offshore* yang lebih kuat terjadi pada kemiringan pantai yang semakin curam. Hal ini dapat dihubungkan dengan nilai surf similarity sebagai representasi karakter pecah gelombang yang semakin meningkat pada

kemiringan pantai yang semakin curam. Hasil pengujian juga memperlihatkan terjadinya peningkatan gerusan kaki relatif terhadap peningkatan sudut kemiringan struktur, dan berlaku untuk semua kemiringan pantai pengujian.

Menurut Ichsanul B dan Didik P (2014) kedalaman gerusan adalah kombinasi dari setiap bagian, misalnya untuk mengetahui kedalaman gerusan maksimal di pilar jembatan yaitu kedalaman *contraction scour* ditambah kedalaman pier scour tiap masing-masing pilar. Demikian pula dengan kedalaman gerusan maksimal pada abutment jembatan. Dari hasil hitungan menunjukkan kedalaman gerusan di semua abutment dan pilar sama. Pada debit aliran $Q = 448,77 \text{ m}^3/\text{s}$ di sekitar pilar terjadi kedalaman gerusan yaitu mencapai 1,60 m. Dan pada daerah sekitar abutment terjadi kedalaman gerusan mencapai 1,85 m.

Menurut A P Putra, dkk (2014), Rasio kedalaman gerusan lokal terhadap lebar pilar (ds/b) paling besar pada pengujian tanpa pengaman ialah sebesar 2,9 yang terjadi pada pengujian Q3P. Kemampuan tirai pengaman mereduksi kedalaman gerusan yang terjadi pada pengujian dengan menggunakan Fr1 sebesar 56,25 %, pada pengujian dengan Fr2 mampu mereduksi sebesar 50,00 % dan pada uji dengan menggunakan Fr3 mereduksi sebesar 62,07 %.

Menurut Rifky, S. P. (2013), Arus menyusur pantai (longshore current) terbentuk karna arah gelombang pecah membentuk sudut terhadap garis pantai. Arus menyusur pantai terbentuk di dalam *surf zone* dan dapat

membangkitkan transpor sedimen menyusur pantai. Transpor sedimen inilah yang dapat menyebabkan erosi di sekitar garis pantai. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan bangunan pelindung pantai jenis groin. Namun demikian, penggunaan groin juga dapat dijumpai pada groin dengan struktur impermeable atau tidak dapat ditembus arus. Permasalahan groin dengan dengan struktur impermeable dapat diatasi dengan membuat struktur permeable atau dapat ditembus arus namun tetap dapat meredam kecepatan arus. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap dua model groin, yaitu model permeable ganda dengan diameter (d_t) 1,25cm dan 1,5cm. Jarak antar tiang (A) 0,7cm, jarak groin (b) 0,5m, 1m dan 1,5m. Peralatan penelitian yang digunakan adalah pembangkit gelombang, alat ukur arus (*acoustic dopler velocimeter*) dan alat ukur tinggi gelombang (*wave probe*), meteran dan kamera. Penelitian dilakukan dengan menggunakan dasar pantai yang tetap atau tanpa sedimen. Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran arus dan tinggi gelombang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus bergerak searah dengan arah kejadian gelombang pecah akibat adanya sudut yang tidak tegak lurus antara gelombang datang dan garis pantai. Mawar arus yang dihasilkan menunjukkan bahwa arah dominan arus menyusur pantai menuju arah kejadian gelombang pecah. Kecepatan arus yang terjadi tereduksi ketika melewati struktur groin permeable. Nilai reduksi kecepatan arus semakin besar apabila nilai perbandingan jarak groin (b) dengan panjang groin (L) semakin kecil dan akan semakin kecil

jika nilai perbandingan jarak dan panjang groin ($\frac{b}{l}$) semakin besar. Sedangkan nilai koefisien reduksi kecepatan arus ($\frac{V_g}{V_0}$) akan semakin besar apabila nilai-nilai perbandingan jarak dan panjang groin (L) semakin besar dan begitu juga sebaliknya. Nilai reduksi kecepatan arus menyusur pantai berbanding terbalik dengan angka permeabilitas groin sedangkan nilai koefisien reduksi kecepatan arus ($\frac{V_g}{V_0}$) berbanding lurus dengan angka permeabilitas groin.

Menurut Istiarto, et. al., (2012) groin merupakan salah satu struktur pelindung tebing sungai terhadap gerusan. Groin mendorong aliran manjauh dari groin dan memperlambat aliran di hilir groin. Serangkaian groin yang dipasang berjajar di tebing sungai akan menciptakan zona aliran berkecepatan rendah sehingga tebing terhindarkan dari ancaman gerusan. Empat groin dipasang berjajar di sebuah kolam saluran flume dengan lebar 30 cm. Jarak antar groin diatur $s/l = 2, 3, \text{ dan } 4$ (s adalah jarak antar groin dan l adalah panjang groin) dengan eksperimen aliran dipertahankan pada debit 5.1 l/s dan kedalamn 22 cm dengan menggunakan alat Micro Acoustic Doppler Velocimeter (Micro ADV) untuk mengukur komponen tiga dimensi kecepatan aliran di sekitar groin. Pola aliran di antara groin dicirikan oleh satu pusaran yang memenuhi hampir seluruh zona dalam groin. Jarak antar groin tidak menunjukkan pola aliran yang berbeda. Peredaman kecepatan aliran di zona dalam groin lebih besar pada jarak antar groin pendek,

semakin lebar jarak antar groin semakin kecil tingkat peredaman kecepatan aliran.

Menurut Sucipto (2011), pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal pada pilar jembatan dengan perlindungan *grounsill* mendapatkan kedalaman gerusan maksimum pada pilar silinder untuk model running (M1) terjadi pada kecepatan 0,267 m/s yaitu sebesar 42 mm sedangkan kedalaman gerusan minimum terjadi pada kecepatan 0,157 m/s yaitu sebesar 3 mm.

Menurut Ariyanto A (2009), Semakin besar debit yang digunakan, maka kedalaman gerusan yang terjadi juga akan semakin besar pula, pada pengujian dengan debit aliran $Q_1 = 361 \text{ cm}^3/\text{dtk}$ gerusan maksimum yang terjadi sebesar $(ds) = 1,5 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk ellips dan $(ds) = 2,23 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk persegi panjang; $Q_2 = 848 \text{ cm}^3/\text{dtk}$, $(ds) = 2,33 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk ellips dan $(ds) = 2,43 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk persegi panjang; $Q_3 = 1087 \text{ cm}^3/\text{dtk}$ material dasar saluran di sekitar pilar terangkut semua maka didapat $(ds) = 3,0 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk ellips dan $(ds) = 3,0 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk persegi panjang.

Untuk lebih lengkap penelitian sebelumnya dapat dilihat pada matriks penelitian yang disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Matriks penelitian sebelumnya terkait struktur *hybrid engineering* terhadap pengendalian erosi di pantai dan pengendalian gerusan di sungai

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
1	Afifah Masruniwati, Farouk Maricar, Mukhsan Putra Hatta, 2020	Pengaruh Bukaan Pintu Terhadap Karakteristik Gerusan Sekitar Pintu Sorong pada Saluran Terbuka	Mempelajari bagaimana karakteristik gerusan yang terjadi di sekitar pintu sorong pada saluran terbuka dengan variasi debit	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola gerusan yang terjadi di sekitar pintu sorong pada saluran terbuka sangat dipengaruhi oleh variasi debit aliran dan besaran bukaan pintu sorong, dan akibat dari adanya frame pada pintu sorong maka konsentrasi aliran cenderung mengarah ke tengah dan ke pinggir sebelah kanan saluran sehingga terjadi dominasi gerusan di tengah dan sebelah kanan saluran	- Meneliti kedalaman gerusan akibat pengaruh debit	- Menggunakan bukaan pintu sorong dengan beberapa variasi debit
2	Amir Ghaderi, Rasoul Daneshfaraz, Mohammadamin Torabi, John Abraham and Hazi Mohammad Azamathulla, 2020	Experimental Investigation on Effective Scouring Parameters Downstream from Stepped Spillways	Untuk mengetahui hubungan beberapa parameter yang terkait kedalaman gerusan akibat struktur pelimpah bertangga	Persamaan fungsi dari beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kedalaman gerusan di bawah struktur pelimpah bertangga	- Menemukan persamaan fungsi dari beberapa parameter terkait kedalaman gerusan	- Model struktur yang digunakan adalah pelimpah samping bertangga

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
3	Priesta Stepan Hutagalung, 2019	Kajian Penempatan <i>Hybrid Engineering</i> terhadap Penanggulangan Abrasi dan Sedimentasi di Pesisir Tanjung Pontang	Mengkaji penempatan <i>Hybrid Engineering</i> terhadap penanggulangan abrasi dan sedimentasi di Pesisir Tanjung Pontang	Analisis hidrodinamika sebelum dan sesudah ada <i>Hybrid Engineering</i> menunjukkan terjadi penurunan rata-rata kecepatan arus dari 0,12 m/s - 0,15 m/s menjadi 0,02 m/s – 0,12 m/s. Pemodelan sedimentasi menunjukkan <i>Hybrid Engineering</i> dengan groin tipe L efektif menangkap sedimen dengan perubahan bed level rata-rata sebesar 234 mm – 1413 mm selama satu bulan periode simulasi pada musim barat di lokasi tinjauan potensi abrasi	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan <i>Hybrid Engineering</i> - Meneliti penurunan kecepatan arus 	<ul style="list-style-type: none"> - Menganalisa sedimentasi dengan perubahan <i>bed level</i>
4	Juventus W.R. Ginting, 2018	Efisiensi Model Fisik Peredaman Energi Gelombang dengan <i>Permeable Breakwater</i>	Melakukan analisis terhadap efisiensi peredaman energi gelombang akibat adanya struktur <i>permeable breakwater</i> dengan beberapa bentuk geometrik	Kondisi peredaman energi gelombang jika dibandingkan dengan kedalaman perairan (d) nilai peredaman energi terbesar adalah pada saat $d = 10$ cm atau pada saat ketinggian muka air paling	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan struktur <i>hybrid engineering</i> - Pemodelan fisik pada kolam saluran (<i>flume</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Penelitian terhadap kondisi peredaman energi gelombang

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
			struktur <i>permeable breakwater</i> untuk mengetahui karakteristik energi gelombang di sekitar <i>permeable breakwater</i> terhadap bentuk struktur	rendah sedangkan peredaman energi gelombang terbesar pada saat kondisi struktur terendam semua atau pada saat kondisi sumbu merge. Sehingga dalam pemanfaatannya sebagai peredam energi gelombang ketinggian struktur harus lebih tinggi dari ketinggian Mean sea level (MSL) di perairan yang akan ditempatkan struktur <i>permeable breakwater</i> .		
5	D.K Ariwanti, 2018	Efektivitas Struktur Hybrid Engineering dalam mengatasi Erosi Pantai di Kelurahan Trimulyo Kecamatan Geunk Kota Semarang	Mengkaji efektifitas struktur HE dalam penanganan abrasi pantai di Kelurahan Trimulyo Kecamatan Genuk Kota Semarang	Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur hybrid yang dibangun di pesisir Kelurahan Trimulyo Kecamatan Genuk Kota Semarang efektif dalam mengatasi erosi pantai, hal ini dibuktikan dengan banyaknya sedimen yang terbentuk dibangunnya struktur	- Menggunakan struktur <i>hybrid engineering</i>	- Pengaruh struktur HE dalam penanganan abrasi dan pembentukan sedimentasi

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
				hybrid. Volume sedimentasi yang terbentuk dalam kurun waktu 33 bulan adalah sebesar 352.5 m ³		
6	Adi Surya Pria Pranata, et all, 2018	Analisa Model Matematik Arus Sejajar Pantai pada Groin Seri <i>Permeable</i>	Untuk mengetahui kecepatan arus menyusur pantai yang tereduksi oleh struktur groin <i>permeable</i> dan pola arus menyusur pantai di sepanjang pantai	Adanya pengaruh model variasi panjang groin dan jarak antar groin, reduksi kecepatan arus menyusur pantai dengan rata-rata reduksi sebesar 59,21 % untuk groin <i>permeable</i> ganda dengan panjang groin 50 meter, panjang groin 100 meter 76,02 %, panjang groin 150 meter 79,50 % dan panjang groin 200 meter 80,49 %. Reduksi kecepatan arus menyusur pantai dengan rata-rata reduksi sebesar 57,42 % untuk groin <i>impermeable</i> ganda dengan panjang groin 50 meter, panjang groin 100 meter 84,61 %, panjang groin 150 meter 88,89 %	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan struktur groin <i>permeable</i> untuk pengamatan arus sejajar pantai pada groin seri <i>permeable</i> - Untuk mengetahui kecepatan arus yang tereduksi oleh struktur groin - Salah satu variabel yang diamati adalah jarak antar groin 	<ul style="list-style-type: none"> - Pemodelan dengan matematis - Variabel yang diteliti variasi panjang groin dan jarak antar groin

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
				dan panjang groin 200 meter 89,91 %.		
7	Aris Ismanto, Muhammad Zainuri, Sahala Hutabarat, Denny Nugroho Sugianto, Sugeng Widada, Anindya Wirasatriya, 2017	Sediment Transport Model In Sayung District, Demak	Memodelkan laju sedimentasi setelah diaplikasikannya struktur hybrid untuk mitigasi dan rehabilitasi di pesisir Demak	Permodelan menunjukkan bahwa <i>hybrid engineering</i> mampu menampung banyak sedimen sehingga dapat menjawab persoalan abrasi pantai di Demak.	Menggunakan struktur <i>hybrid engineering</i>	Memodelkan laju sedimentasi untuk mitigasi dan rehabilitasi pantai
8	Baiq Weny Anggun Ratna Sari, Anid Supriyadi, Yusron Saadi, 2016	Analisis Pengaruh Debit dan Kedalaman Aliran Terhadap Pola Gerusan di Sekitar Abutmen dengan Tipe Pondasi yang Berbeda.	<ul style="list-style-type: none"> - Mengetahui pengaruh debit dan kedalaman aliran terhadap kedalaman gerusan lokal. - Mengetahui pengaruh kecepatan terhadap kedalaman gerusan. - Mengetahui tipe abutmen yang memiliki kedalaman gerusan yang terbesar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan di sekitar abutmen. Semakin besar kecepatan maka semakin besar kedalaman gerusan dan sebaliknya. - Pola gerusan yang terjadi di sekitar abutmen adalah erosi pada sisi abutmen bagian hulu dan 	- Menganalisis pengaruh kecepatan aliran terhadap kedalaman gerusan	- Kedalaman gerusan yang diteliti pada pilar jembatan

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
			- Mengetahui pengaruh tipe abutmen terhadap pola gerusan di sekitar abutmen.	endapan terjadi di bagian hilir abutmen. - Pola gerusan yang terjadi pada ketiga abutmen untuk berbagai kedalaman aliran relative sama namun memiliki panjang gerusan		
9	Hasdinar Umar, Nur Yuwono, Nizam, 2016	Reduksi Angkutan Sedimen Menyusur Pantai Studi Kasus Pantai Glagah, Kulon Progo, Jawa Tengah	Untuk menghitung besarnya laju angkutan sedimen menyusur pantai dengan menggunakan groin permeable dan membandingkan tanpa menggunakan groin permeable	Perhitungan angkutan sedimen menyusur pantai pada Pantai Glagah jika tanpa struktur groin permeable diperoleh sebesar 343,32.103 m ³ /tahun, jika pada Pantai Glagah dipasang struktur groin permeable (kerapatan groin 40%) maka diperoleh angkutan sedimen menyusur pantai sebesar 166,36.103 m ³ /tahun dengan koefisien reduksi sebesar 0,48	Menggunakan <i>groin permeable</i>	Besarnya reduksi angkutan sedimentasi dengan menggunakan groin permeable dan tanpa menggunakan groin permeable

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
10	Suripin, Denny Sugianto, Muhammad Helmi, 2016	Mangrove Restoretion with Environment Friendly Permeable Breakwater	Mendekripsikan proses restorasi mangrove dengan bangunan pelindung pantai yang ramah lingkungan di daerah pantai berlumpur.	Bangunan pemecah pantai tersebut sukses diimplementasikan karena terbukti dengan bertambahannya daratan di desa Timbulsloko yang bisa dimanfaatkan sebagai lahan restorasi mangrove.	Menggunakan struktur <i>hybrid engineering</i> untuk merestorasi mangrove sebagai pelindung pantai	Pengamatan lapangan di lokasi pantai desa Timbulsloko
11	Hadi R. Pranoto, Warsito Atmodjo, Denny Nugroho, 2016	Studi Sedimentasi pada Bangunan Groin di Perairan Timbulsloko Kabupaten Demak	Untuk mengetahui adanya hubungan gelombang laut dan arus sepanjang pantai yang mempengaruhi adanya transpor sedimen di suatu perairan	Arah gelombang datang dominan untuk musim barat yaitu dari arah barat laut dengan membentuk sudut gelombang pecah sebesar $41,29^\circ$ dan kecepatan arus sepanjang pantai sebesar $0,771$ m/det. Sedangkan untuk musim timur yaitu dari arah timur laut dengan membentuk sudut gelombang pecah sebesar $37,59^\circ$ dan kecepatan arus sepanjang pantai sebesar $0,629$ m/det.	Menggunakan groin sebagai struktur untuk mengatasi abrasi akibat arus sejajar pantai	Menganalisa arah gelombang datang dan kecepatan arus sepanjang pantai

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
12	Dalrion, 2016	Gerusan kaki pada struktur <i>Impermeable Sloping Wall</i> Akibat Gelombang Pecah	Untuk melihat kondisi gerusan kaki yang terjadi akibat gelombang pecah di sekitar kaki struktur <i>Impermeable Sloping Wall</i>	Persamaan gerusan kaki yang merupakan fungsi dari tinggi gelombang, kemiringan pantai, sudut kemiringan struktur dan kedalaman air distruktur	Menemukan persamaan fungsi dari beberapa parameter terkait kedalaman gerusan	Model yang digunakan struktur <i>Impermeable Sloping Wall</i> dan menggunakan gelombang pecah
13	M.Tony Iskandar, Mudjiatko, Trimaijon, 2014	Pola Gerusan pada Model Pilar Jembatan Lingkaran Ganda (<i>double circular</i>)	Menentukan model gerusan lokal fenomena pilar bundar ganda dengan atau tanpa jenis tirai pelindung.	Aliran hidrodinamika di pilar menyebabkan aliran ke bawah yang ditunjukkan oleh gerusan di bagian hulu pilar. Penggerusan mencapai titik kesetimbangan pada menit ke 75. Rasio kedalaman gerusan ds/b berkisar antara 0,03 – 0,46. Penggunaan swivel dapat mengurangi kedalaman gerusan hingga 44,44%. Analisis transpor sedimen membuktikan bahwa Froude yang digunakan semakin tinggi lebih besar butiran diangkut.	Meneliti rasio kedalaman gerusan ds/b	Menggunakan model pilar jembatan
14	Weka Mahardi, 2014	Kajian Efektifitas Metode Struktur Alat	Mengetahui lebih efektif APO ataukah	Sedimentasi yang terbentuk menunjukkan	Menggunakan struktur <i>hybrid</i>	Membandingkan antara struktur

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
		Pemecah Ombak dan Struktur Permeabel Hybrid-Engineering sebagai Studi Pengembangan Konsep Rehabilitasi Pantai di Kabupaten Demak.	Hybrid Engineering Pengembangan Konsep Studi Rahabilitasi Pantai di Kabupaten Demak.	bahwa struktur APO berfungsi dengan baik untuk mempersiapkan kondisi lingkungan yang memungkinkan dilakukan rehabilitasi mangrove. Metoda ini merupakan perpaduan antara hard structure dengan soft structure sebagai upaya pemulihan daerah erosi pantai di Desa Timbulsloko, Demak. Metoda ini perlu dilanjutkan dan diterapkan di daerah lain dengan karakteristik pantai yang serupa.	<i>engineering</i> sebagai pembanding dengan struktur APO	APO atau <i>Hybrid Engineering</i> dalam studi rehabilitasi pantai
15	Ichsanul Barokah, Didik Purwantoro, 2014	Pengaruh Variasi Debit Aliran Terhadap Gerusan Maksimal di Bangunan Jembatan dengan Menggunakan Program HEC-RAS	Untuk mengetahui kedalaman gerusan maksimum yang terjadi pada bangunan jembatan dengan menggunakan software HEC-RAS	Pemodelan dengan valiasi aliran, terlihat bahwa debit 5,87 m ³ /s menjadi 905,23 m ³ /s mulai meningkat kedalaman gerusan pada pilar. Kemudian pada debit 905,23 m ³ /s menjadi 1080,15 m ³ /s kedalaman gerusan	Mengkaji kedalaman gerusan	Menggunakan pemodelan aliran dengan software

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
				pilar mengalami stabilitas, pada kedalaman 1,76 m.		
16	Arie Perdana Putra, Mudjiatko, Siswanto, 2014	Model Laboratorium Gerusan Lokas pada Pilar Jembatan Type Grouped Cylinder.	Untuk mengetahui fenomena gerusan yang terjadi pada pilar jembatan tipe <i>cylinder grouped</i> dan pengaruh penambahan bangunan pengaman pilar terhadap kedalaman gerusan lokal.	Rasio kedalaman gerusan lokal terhadap lebar pilar (d_s/b) paling besar pada pengujian tanpa pengaman ialah sebesar 2,9 yang terjadi pada pengujian Q3P. Kemampuan tirai pengaman mereduksi kedalaman gerusan yang terjadi pada pengujian dengan menggunakan Fr1 sebesar 56,25 %, pada pengujian dengan Fr2 mampu mereduksi sebesar 50,00 % dan pada uji dengan menggunakan Fr3 mereduksi sebesar 62,07 %.	Meneliti rasio kedalaman gerusan d_s/b terhadap froude number	Struktur yang diteliti adalah pilar jembatan
17	Rifky Surya Pratama, 2013	Kajian Arus Menyusur Pantai di Sekitar Groin Permeable	Untuk mengetahui nilai koefisien reduksi kecepatan arus pada groin permeable	Nilai reduksi kecepatan arus menyusur pantai berbanding terbalik dengan angka permeabilitas groin	- Menggunakan groin permeable - Meneliti reduksi kecepatan arus	- Variabel yang diteliti hanya 2 yaitu jarak antar groin dan panjang groin

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
				sedangkan nilai koefisien reduksi kecepatan arus $\left(\frac{v_g}{v_0}\right)$ berbanding lurus dengan angka permeabilitas groin.	- Mengamati variabel jarak antar groin	
18	Istiarto, Bambang Agus Kironoto, Pradipta Nandi Wardhana, 2012	Pola Aliran di Sekitar Groin	Untuk mengetahui variabel yang berpengaruh terhadap pola aliran di sekitan groin	Pola aliran di antara groin dicirikan oleh satu pusaran yang memenuhi hampir seluruh zona dalam groin. Jarak antar groin tidak menunjukkan pola aliran yang berbeda. Peredaman kecepatan aliran di zona dalam groin lebih besar pada jarak antar groin pendek, semakin lebar jarak antar groin semakin kecil tingkat peredaman kecepatan aliran.	- Meneliti pola kecepatan aliran	- Meneliti pola kecepatan aliran dan sifat-sifat turbulensinya - Menggunakan groin impermeable
19	Sucipto, 2011	Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal pada Pilar Jembatan dengan Perlindungan Groundsill	Untuk mengetahui parameter yang berpengaruh terhadap pola gerusan dan kedalaman gerusan lokasi disekitar pilar jembatan dengan menempatkan	Dari hasil penelitian diperoleh bahwa kedalaman gerusan maksimum pada pilar silinder untuk model running (M1) terjadi pada kecepatan 0,267 m/s yaitu sebesar 42	- Menganalisis pengaruh kecepatan aliran terhadap kedalaman gerusan	Kedalaman gerusan yang diteliti pada pilar jembatan

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
			<i>ground sill</i> pada bagian hilirnya	mm sedangkan kedalaman gerusan minimum terjadi pada kecepatan 0,157 m/s yaitu sebesar 3 mm.		
20	Anton Ariyanto, 2009	Analisis Bentuk Pilar Jembatan Terhadap Potensi Gerusan Lokal	Menganalisis pengaruh bentuk pilar dan debit terhadap kedalaman gerusan	Semakin besar debit yang digunakan, maka kedalaman gerusan yang terjadi juga akan semakin besar pula, pada pengujian dengan debit aliran $Q_1 = 361 \text{ cm}^3/\text{dtk}$ gerusan maksimum yang terjadi sebesar $(ds) = 1,5 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk ellips dan $(ds) = 2,23 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk persegi panjang; $Q_2 = 848 \text{ cm}^3/\text{dtk}$, $(ds) = 2,33 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk ellips dan $(ds) = 2,43 \text{ cm}$ untuk pilar dengan bentuk persegi panjang; $Q_3 = 1087 \text{ cm}^3/\text{dtk}$ material dasar saluran di sekitar pilar terangkut semua maka didapat	- Meneliti kedalaman gerusan lokal	- Menggunakan pilar jembatan - Menggunakan debit sebagai parameter utama pengaruh kedalaman gerusan

No	Nama Peneliti, Tahun	Judul	Tujuan	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
				(ds)= 3,0 cm untuk pilar dengan bentuk ellips dan (ds)= 3,0 cm untuk pilar dengan bentuk persegi panjang.		
21	Hendra Hafid, 2022	Kinematika aliran dan gerusan dasar pada struktur HE secara eksperimental	Untuk mengetahui pengaruh struktur <i>hybrid engineering</i> dengan perubahan kinematika aliran searah dan kedalaman gerusan dibawah struktur	Persamaan fungsi dari beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kedalam gerusan dibawah Struktur <i>Hybrid Engineering</i>		

H. Hipotesis

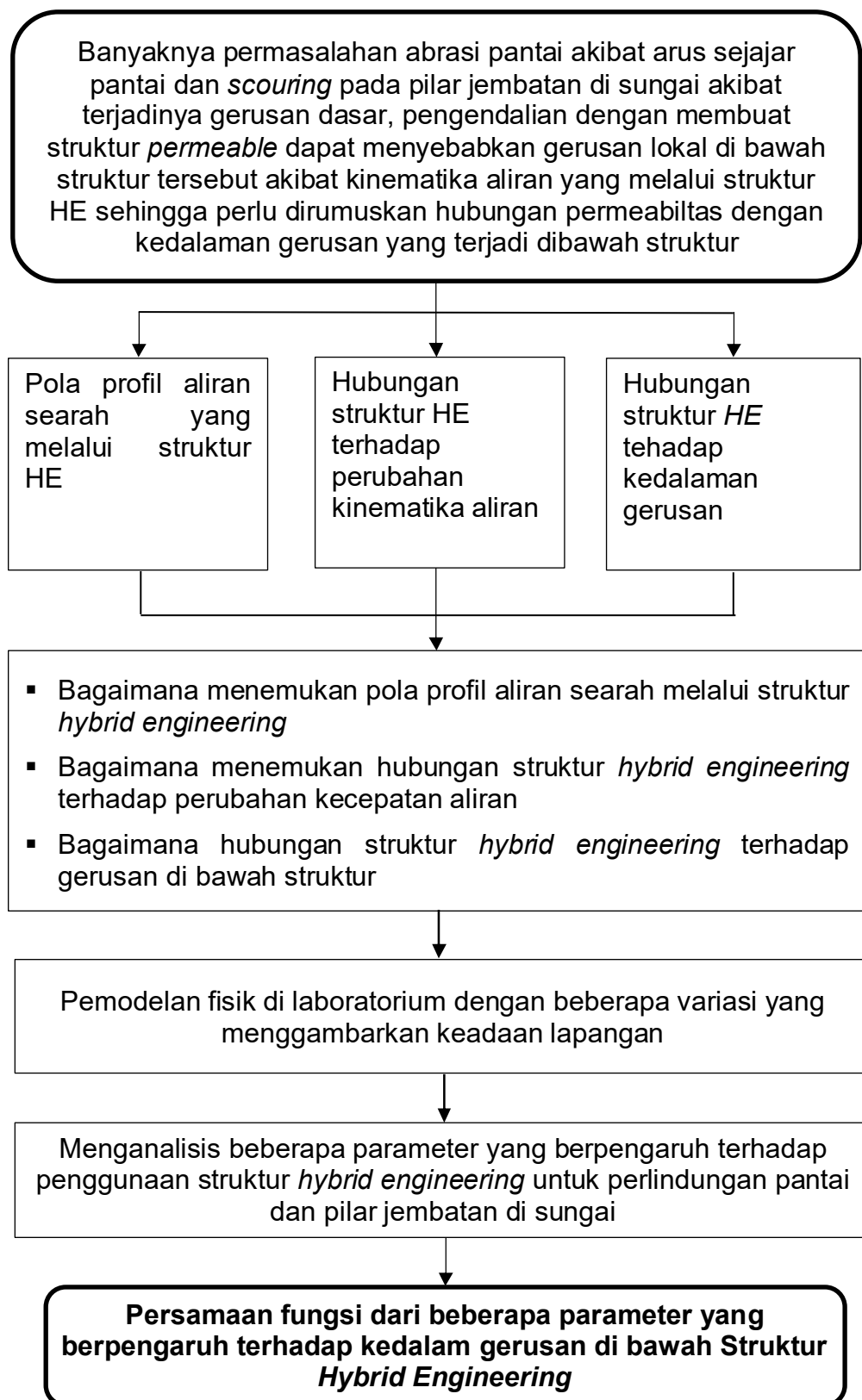
Hipotesis merupakan jawaban sementara terhadap rumusan masalah penelitian, dimana rumusan masalah penelitian telah dinyatakan dalam bentuk kalimat pertanyaan. Dikatakan sementara, karena jawaban yang diberikan baru didasarkan pada teori yang relevan, belum didasarkan pada fakta-fakta empiris yang diperoleh melalui pengumpulan data. Jadi hipotesis juga dapat dinyatakan sebagai jawaban teoritis terhadap rumusan masalah penelitian, belum jawaban yang empirik (Sugiyono, 2017).

Jika dilihat dari rumusan masalah, maka diprediksi koefisien kedalaman gerusan (d_s) diprediksi dipengaruhi oleh panjang struktur (B), kedalaman aliran (h), permeabilitas (ξ), butiran sedimen (d_{50}) dan kecepatan aliran (V).

I. Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir penelitian yang merupakan acuan dalam melaksanakan penelitian ini yang dimulai dari mengadakan studi literatur, mempelajari studi-studi terdahulu atau penelitian-penelitian sebelumnya tentang teknologi *hybrid engineering* pada struktur bangunan pantai tentang tingkat keberhasilan, efisien dan efektifitas dari teknologi ini.

Pemodelan diperlukan untuk mengetahui fenomena yang akan terjadi berkaitan dengan gerusan yang terjadi di sekitar model struktur *hybrid engineering* bila digunakan sebagai bangunan untuk mereduksi arus sejajar pantai.



Gambar 24. Kerangka Pikir Penelitian