

Nama Rumpun Ilmu: Teknik

**LAPORAN
PENELITIAN UNGGULAN PRODI**



**MODEL NUMERIK BENTUK PILAR JEMBATAN
TAHAN GERUSAN LOKAL**

TIM PENELITI

Ketua: Puji Harsanto, ST., MT., PhD
NIDN: 06067401

Anggota 1: Jazaul Ikhsan, ST., MT., PhD
NIDN: 0524057202

Anggota 2: Edi Hartono, ST., MT
NIDN: 0507077301

Anggota 3: As'at Pujianto, Ir., MT
NIDN: 0514046601

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA**

2017

HALAMAN PENGESAHAN
PENELITIAN UNGGULAN PRODI

Judul Penelitian : Model Numerik Bentuk Pilar Jembatan Tahan Gerusan Lokal

Nama Rumpun Ilmu : Teknik

Ketua Peneliti:

a. Nama Lengkap : Puji Harsanto., ST., MT., PhD
b. NIDN : 0607067401
c. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
d. Program Studi : Teknik Sipil
e. Nomor HP : 08112618825
f. Alamat surel (e-mail) : puji_hr@yahoo.com

Anggota Peneliti (1)

a. Nama Lengkap : Jazaul Ikhsan., ST., MT., PhD
b. NIDN : 0524057202
c. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
d. Program Studi : Teknik Sipil
e. Nomor HP : 08164227363
f. Alamat surel (e-mail) : jzl_ikhsan@yahoo.co.id

Anggota Peneliti (2)

a. Nama Lengkap : Edi Hartono., ST., MT.
b. NIDN : 0507077301
c. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
d. Program Studi : Teknik Sipil
e. Nomor HP : 087734004455
f. Alamat surel (e-mail) : ediharto@yahoo.com

Anggota Peneliti (3)

a. Nama Lengkap : As'at Pujiyanto., Ir., MT.
b. NIDN : 0514046601
c. Jabatan Fungsional : Lektor
d. Program Studi : Teknik Sipil
e. Nomor HP : 0818263683
f. Alamat surel (e-mail) : pujiyantoasat@umy.ac.id

Biaya Penelitian :

- diusulkan ke UMY : Rp. 20.000.000
- dana internal Prodi : Rp. -
- dana institusi lain : Rp. -

Yogyakarta, 16-05-2017

Mengetahui,
Dekan FT UMY

Ketua Peneliti,

Jazaul Ikhsan, ST., MT., PhD
Puji Harsanto, ST., MT., PhD
NIDN: 0524057201
NIDN: 06067401

Menyetujui,
Ketua LP3M UMY

Hilman Latief, M.A., PhD
NIDN: 0512097501

PRAKATA

Syukur alhamdulillah kami ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga Laporan Penelitian Unggulan Prodi kami dengan judul “Model Numerik Bentuk Pilar Jembatan Tahan Gerusan Lokal” dapat selesai. Semoga laporan ini bermanfaat bagi yang membacanya dan saran serta kritik selalu kami harapkan demi kesempurnaan karya ilmiah ini.

Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberi bantuan baik materiil dan spirituil. Ucapan terima kasih kami tujukan kepada :

1. Bapak Hilman Latief, MA., PhD, sebagai Ketua LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
2. Bapak Jazaul Ikhsan, ST., MT., PhD, sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
3. Serta semua pihak yang memberikan bantuan dalam menyelesaikan dan penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak terdapat kekurangan dalam laporan ini baik bahasa maupun isinya. Untuk itu penulis mohon saran dan kritikan dari para pembaca yang sifatnya membangun.

Semoga laporan penelitian ini bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Yogyakarta, 16 Mei 2017

Penulis,

Tim Peneliti

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Prakata	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	viii
Abstrak	xi
BAB I Pendahuluan	1
BAB II Tinjauan Pustaka	5
BAB III Landasan Teori	9
A. Sungai	9
B. Aliran	10
C. Pilar Jembatan	16
D. Gerusan	18
1. Tipe Gerusan	18
2. Mekanisme Gerusan	20
E. iRIC: Nays2DH 1.0	22
1. Karakteristik model aliran	23
2. Karakteristik pemodelan transport sedimen dan perubahan dasar sungai	24
3. Lain-lain	24
4. Persamaan dalam aliran	24
5. Metode perhitungan pada aliran turbulen	30
6. Persamaan tegangan geser pada dasar sungai	31
7. Persamaan gaya geser/penahan dari tanaman vegetasi	31
8. Persamaan transport sedimen	32

9. Permodelan aliran sedimen tidak seragam (Non-uniform sediment)	38
10. Permodelan Erosi Tepi Sungai	39
BAB IV Metodologi Penelitian	29
A. Studi Literatur	29
B. Pengumpulan Data	29
C. Bagan Alir Penelitian	32
D. Langkah-Langkah Simulasi iRIC: Nays2DH 1.0	33
E. Skenario Running	47
BAB V Hasil dan Pembahasan	49
A. Data Penelitian	49
B. Analisa Kecepatan Aliran	50
1. Pilar Kapsul (Aliran Subkritis)	52
2. Pilar tajam (aliran subkritis)	54
3. Pilar persegi (Aliran superkritis)	57
4. Pilar lingkaran (Aliran superkritis)	59
C. Analisa Pola Aliran	60
1. Pilar kapsul	63
2. Pilar Tajam	64
3. Pilar persegi	65
4. Pilar lingkaran	66
D. Analisa Pola Gerusan	67
1. Tinjauan potongan I-I pada hulu pilar	30
2. Tinjauan potongan II-II pada tengah pilar	35
3. Tinjauan potongan III-III pada hilir pilar 1	41
4. Tinjauan potongan IV-IV pada hilir pilar 2	46
BAB VI Kesimpulan dan Saran	29
A. Kesimpulan	29
B. Saran	30

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Koefisien kekasaran Manninh	15
Tabel 3. 2 Koefisien faktor bentuk pilar	17
Tabel 4. 1 Data kondisi aliran	29
Tabel 4. 2 Skenario running untuk aliran subkritis	47
Tabel 4.3 Skenario running untuk aliran superkritis	47
Tabel 5. 1 Nilai kecepatan sekitar pilar kapsul (Aliran subkritis)	53
Tabel 5. 2 Nilai kecepatan sekitar pilar tajam (Aliran subkritis)	55
Tabel 5. 3 Nilai kecepatan sekitar pilar persegi (Aliran superkritis)	57
Tabel 5. 4 Nilai kecepatan sekitar pilar persegi (Aliran superkritis)	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Model pilar jajargenjang (<i>sumber: Ariyanto,2010</i>)	17
Gambar 3.2 Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu. (Sumber: Istiarto,2002 dalam Ariyanto, 2010)	19
Gambar 3.3Mekanisme gerusan akibat pola aliran air disekitar pilar (sumber: Rahmadani, 2014)	21
Gambar 4. 1 Model simulasi <i>software iRIC:Nays2DH 1.0</i> , (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) pilar lingkaran	31
Gambar 4.2 Bagan alir penelitian	32
Gambar 4.3 Tampilan awal iRIC 2.3	33
Gambar 4.4 Tampilan pemilihan solver	33
Gambar 4.5 Tampilan pilihan metode pembuatan grid	34
Gambar 4.6 Menu Channel Shape	34
Gambar 4.7 Menu Cross Sectional Shape	35
Gambar 4.8 Menu Channel Shape Parameters	36
Gambar 4.9 Menu Bed and Channel Shape	36
Gambar 4.10 Menu Upstream and Downstream Condition	37
Gambar 4.11 Menu Width Variation	37
Gambar 4.12 Menu Bed Condition	38
Gambar 4.13 Hasil setelh grid dibuat	38
Gambar 4.14 Tampilan <i>import obstacle</i>	39
Gambar 4. 15 Hasil input (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) pilar lingkaran	41
Gambar 4.16 Tampilan copy obstacle	41
Gambar 4.17 Pilihan polygon value	42
Gambar 4.18 Tampilan setelah ditambahkan polygon	42
Gambar 4.19 Tampilan setelah ditambahkan angka manning	43
Gambar 4.20 Tampilan Solver Type	43
Gambar 4.21 Menu Boundary Condition	44
Gambar 4.22 Tampilan untuk memasukkan debit	44
Gambar 4.23 Tampilan menu Time	45
Gambar 4.24 Tampilan menu Bed Material	45
Gambar 4.25 Tampilan running iRIC: Nays2DH	46
Gambar 4.26 Tampilan akhir setelah running	46
Gambar 5.1 Penampang saluran pada simulasi software iRIC:Nays2DH 1.0	49
Gambar 5.2 Bentuk pilar pada simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0	50
Gambar 5. 3 Kecepatan aliran pada pilar kapsul dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b)	52

Gambar 5. 4 Kecepatan aliran pada pilar tajam dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b)	54
Gambar 5. 5 Kecepatan aliran pada pilar persegi dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b)	57
Gambar 5.6Kecepatan aliran pada pilar lingkaran dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b)	59
Gambar 5. 7 Hasil pola aliran pada masing-masing bentuk pilar menggunakan software iRIC: Nays2DH 1.0	62
Gambar 5. 8 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar kapsul model fisik	63
Gambar 5. 9 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar tajam model fisik	64
Gambar 5.10 Pola aliran dari hulu sampai persegi pilar tajam model fisik	66
Gambar 5.11 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar tajam model fisik	67
Gambar 5. 12 Hasil elevasi gerusan pada simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 aliran subkritik (a) pilar kapsul (b) Pilar tajam	70
Gambar 5.13 Hasil elevasi gerusan pada simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 aliran superkritik	71
Gambar 5.14 Hasil gerusan pada pilar persegi dengan model fisik	71
Gambar 5. 15 Hasil analisa kontur elevasi dasar disekitar pilar kapsul pada model fisik aliran subkritik (a) Pilar tajam (b) Pilar kapsul	72
Gambar 5.16 Perbandingan hasil gerusan menggunakan software iRIC: Nays2DH 1.0 dan model fisik pada pilar persegi (a) dan lingkaran (b)	29
Gambar 5.17 Potongan I-I pada hulu pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran	30
Gambar 5. 18 Elevasi dasar saluran pada potongan I-I pada masing-masing pilar dengan software iRIC: Nays2DH 1.0	32
Gambar 5. 19 Grafik elevasi dasar saluran potongan I-I hulu pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik	34
Gambar 5. 20 Potongan II-II pada hulu pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran	36
Gambar 5. 21 Elevasi dasar saluran pada potongan II-II pada masing-masing pilar dengan <i>software iRIC: Nays2DH 1.0</i>	37
Gambar 5. 22 Grafik elevasi dasar saluran potongan II-II tengah pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik	39
Gambar 5. 23 Potongan III-III pada hilir 1 pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran	41
Gambar 5. 24 Elevasi dasar saluran pada potongan III-III pada masing-masing pilar dengan <i>software iRIC: Nays2DH 1.0</i>	43
Gambar 5. 25 Grafik elevasi dasar saluran potongan III-III hilir 1 pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik	45
Gambar 5. 26 Potongan IV-IV pada hilir 2 pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran	47

Gambar 5. 27 Elevasi dasar saluran pada potongan IV-IV pada masing-masing pilar dengan <i>software iRIC: Nays2DH 1.0</i>	48
Gambar 5. 28 Grafik elevasi dasar saluran potongan IV-IV hilir 2 pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik	50

ABSTRAK

Pilar merupakan struktur bawah jembatan. Pada umumnya pilar jembatan terletak di tengah sungai. Adanya pilar jembatan di tengah sungai dapat mempengaruhi perubahan pola aliran sungai sehingga kecepatan aliran berubah dan menyebabkan gerusan lokal yang akan mengganggu kestabilan pilar. Gerusan lokal terjadi akibat adanya perubahan angkutan sedimen yang disebabkan perubahan pola aliran dan kecepatan aliran. Besarnya kecepatan aliran salah satunya disebabkan oleh bentuk pilar itu sendiri. Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui bentuk pilar yang paling efektif untuk mengurangi efek gerusan lokal yang diharapkan dapat menjadi tolok ukur dalam perencanaan bentuk pilar jembatan.

Pada penelitian ini simulasi dibuat menggunakan *software iRIC : Nays2DH 1.0* di buat oleh Yasuki Shimizu dan Hiroshi Takebayashi di Hokkaido University, Jepang. *Nays2DH 1.0* adalah model komputasi untuk mensimulasikan kedalaman dasar dan erosi di sungai. Bentuk pilar yang disimulasikan adalah pilar berbentuk persegi, lingkaran, kapsul, dan tajam. Selanjutnya dilakukan perbandingan hasil simulasi menggunakan *software iRIC : Nays2DG 1.0* dengan model fisik. Perbandingan dilakukan pada tinjauan kecepatan aliran, pola aliran dan pola gerusan.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Sungai merupakan salah satu sumberdaya air yang penting bagi kehidupan. Sungai mengalir dari daerah hulu menuju hilir atau muara dan memiliki alur aliran yang lurus dan ada juga yang berkelok-kelok. Untuk menghubungkan dua daerah yang dipisahkan oleh sungai maka diperlukan suatu infrastruktur transportasi yaitu jembatan.

Jembatan merupakan suatu konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan jalan yang terputus dikarenakan adanya rintangan seperti lembah, jurang, sungai, dan lain sebagainya. Pada jembatan yang memiliki bentang yang panjang, umumnya memiliki pilar sebagai penopangnya. Bagian jembatan seperti pilar yang terletak pada bagian tengah sungai dan langsung bersentuhan dengan aliran sungai akan menyebabkan perubahan pola aliran pada sungai itu sendiri. Salah satu perubahan pola aliran yang terjadi adalah terjadinya turbulensi yang terjadi disekitar pilar jembatan sehingga dapat menyebabkan gerusan lokal yang akan mengganggu kestabilan pilar jembatan itu sendiri. Pilar jembatan berfungsi untuk menyalurkan beban jembatan dari struktur atas jembatan menuju pondasi. Pilar yang digunakan untuk menopang jembatan memerlukan kriteria desain tertentu sehingga jika terjadi gerusan disekitar pilar dan gerusan tersebut mencapai kedalaman tertentu sehingga menyebabkan keseimbangan pilar terganggu, maka akan membahayakan struktur jembatan yang berada di atasnya.

Gerusan lokal (*local scouring*) di sekitar bangunan, terjadi karena pola aliran lokal di sekitar bangunan sungai. Gerusan lokal ini pada umumnya diakibatkan oleh adanya bangunan air, misalnya tiang, pilar atau abutment jembatan. Gerusan lokal terjadi oleh perubahan angkutan sedimen yang disebabkan dari perubahan kecepatan aliran akibat adanya pilar jembatan. Semakin berbeda bentuk pilar jembatan maka semakin berbeda pula kecepatan yang terjadi di sekitar pilar jembatan. Perbedaan kecepatan yang terjadi akan menyebabkan perbedaan pola gerusan lokal pada sekitar pilar. Jadi, perlu adanya pertimbangan bentuk pilar agar gerusan aliran atau keruntuhan yang terjadi di

sekitar pilar dapat diminimalisir sehingga tidak mengganggu stabilitas keamanan struktur jembatan.

Untuk itu maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui bentuk pilar jembatan yang paling cocok untuk meminimalkan gerusan lokal yang terjadi, sehingga diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan pembangunan jembatan, terutama untuk jembatan yang memiliki pilar pada bagian tengah sungai.

Untuk menganalisa masalah gerusan lokal pada pilar jembatan dapat dilakukan dengan dua metode yaitu dengan melakukan pemodelan secara fisik dan dengan model numerik. Model fisik dilakukan dengan membuat simulasi secara fisik dan dengan skala tertentu sehingga menyerupai kondisi di lapangan. Sedangkan model numerik dilakukan dengan melakukan simulasi dengan bantuan program komputer.

Model yang digunakan pada penelitian ini adalah model numerik. Model numerik adalah dimana penyelesaian permasalahannya diformulasikan dengan persamaan-persamaan matematis. Kelebihan penggunaan model numerik dibandingkan dengan model fisik adalah penyelesaian suatu permasalahan menjadi lebih efektif dan efisien karena dalam penyelesaiannya dapat menggunakan program komputer sehingga dapat menyelesaikan persamaan-persamaan yang rumit.

Pada penelitian ini simulasi dibuat dengan menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* yang di buat oleh Dr. Yasuyuki Shimizu dan Hiroshi Takebayashi di *Hokkaido University*, Jepang. *Nays2DH 1.0* adalah model komputasi untuk mensimulasikan kedalaman dasar dan erosi di sungai. Jenis pilar yang akan disimulasikan pada penelitian ini adalah pilar dengan bentuk kapsul, tajam, persegi dan juga lingkaran yang sering digunakan untuk pembangunan jembatan.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kecepatan aliran, pola aliran, dan elevasi dasar saluran di sekitar pilar jembatan berbentuk persegi dan lingkaran menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0*?
2. Bagaimana perbandingan simulasi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dan dengan model fisik?

C. Tujuan Penelitian

Adapun maksud dan tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kecepatan aliran, pola aliran dan juga elevasi dasar saluran pada gerusan lokal disekitar pilar jembatan menggunakan model matematik.
2. Membandingkan analisis model matematik dengan model fisik tentang kecepatan aliran, pola aliran dan juga elevasi dasar saluran pada gerusan lokal disekitar pilar jembatan bentuk kapsul dan tajam.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai :

1. Memberikan pengetahuan mengenai gerusan lokal yang terjadi pada pilar jembatan dengan bentukkapsul, tajam, persegi dan lingkaran menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0*.
2. Memberikan pengetahuan tentang model matematik menggunakan *software iRIC: Nays2HD 1.0*.

E. Batasan Masalah

Penelitian ini dapat lebih mengarah pada latar belakang dan permasalahan yang telah dirumuskan jika dibuat batasan-batasan masalah guna membatasi ruang lingkup penelitian, antara lain :

1. Penelitian ini menggunakan *software IRIC: Nays2DH 1.0* dengan 2 kondisi, yaitu sub kritis dan superkritis.
 - a. Kondisi subkritis yaitu dengan kondisi aliran berupa debit 0,0044 m³/s, waktu 3 menit, aliran seragam, sedimen uniform dengan maksimal butiran 0,975 mm, slope 0,004, angka manning 0,0115, geometri penampang saluran dengan lebar 0,46 m dan panjang 2,5 m.
 - b. Kondisi superkritis yaitu dengan karakteristik aliran berupa debit 0,0052m³/s, waktu *running* 3 menit, aliran seragam (*uniform*), *slope* 0,0358 diameter material dasar (d₅₀) 0,975 mm, angka manning 0,0115, geometri saluran lebar 0,46 m dan panjang tinjauan 2,5m.
2. Simulasi dilakukan dengan ditambahkan penghalang di tengahnya (pilar jembatan).
3. Bentuk pilar yang akan disimulasikan yaitu bentuk kapsul, tajam, persegi dan lingkaran.
4. Dimensi pilar kapsul adalah tinggi 15 cm, lebar 7,62 cm dan panjang 15,24 cm.
5. Dimensi pilar tajam adalah tinggi 15 cm, panjang diagonal 7,62 cm.
6. Dimensi pilar lingkaran adalah tinggi 15 cm, diameter 7.62 cm.
7. Dimensi pilar persegi adalah tinggi 15 cm, sisi 7.62 cm.
8. Penelitian ini hanya melihat fenomena perubahan aliran yang terjadi pada sekitar pilar jembatan dengan pengamatan visual.
9. Untuk mendapatkan gerusan pada pilar jembatan menggunakan debit yang cukup untuk melihat hasilnya, karena jika semakin besar debit maka gerusan di sekitar pilar yang terjadi akan semakin besar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Ikhsan dan Solichin (2008), aliran yang terjadi pada suatu sungai seringkali disertai dengan angkutan sedimen dan proses gerusan. Proses gerusan akan terbentuk secara alamiah karena adanya pengaruh morfologi sungai atau karena adanya struktur yang menghalangi aliran sungai. Angkutan sedimen terjadi karena aliran air sungai mempunyai energi yang cukup besar untuk membawa sejumlah material.

Jika sedimen yang masuk lebih kecil daripada jumlah sedimen yang keluar pada suatu ruas sungai maka akan terjadi penurunan dasar sungai secara memanjang (degradasi), tetapi sebaliknya jika jumlah sedimen yang masuk lebih banyak dari jumlah sedimen yang keluar maka akan menyebabkan terjadinya kenaikan dasar sungai secara memanjang (agradasi).

Degradasi akan berlangsung terus menerus hingga tercapainya keseimbangan antara suplai dengan angkutan sedimen yang saling memperbaiki. Dengan adanya pilar jembatan maka terjadi ketidakseimbangan karena jumlah angkutan sedimen jauh lebih besar dari pada suplai sedimennya.

Gerusan merupakan fenomena alam yang disebabkan oleh aliran air yang biasanya terjadi pada dasar sungai yang terdiri dari material *alluvial* namun terkadang dapat juga terjadi pada dasar sungai yang keras. Gerusan biasanya terjadi sebagai bagian dari perubahan morfologi sungai dan perubahan akibat bangunan buatan manusia (Ariyanto, 2010).

Menurut Hoffmans dan Verheij(1997) dalam Mukti (2016) gerusan adalah perubahan dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal (*local scouring*) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen diangkut lebih besar daripada sedimen disuplai. Angkutan sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser pada dasar saluran. Atau dapat dikatakan juga bahwa gerusan adalah merupakan erosi pada dasar dan tebing saluran alluvial.

Menurut Istiarto (2002) dalam Ariyanto (2010) Peristiwa gerusan lokal selalu akan berkaitan erat dengan fenomena perilaku aliran sungai, yaitu hidraulika aliran sungai dalam interaksinya dengan geometri sungai, geometri dan tata letak pilar jembatan, serta karakteristik tanah dasar di mana pilar tersebut dibangun. Pilar merupakan bagian struktur bawah jembatan yang berfungsi sebagai penumpu dari jembatan tersebut perubahan pola aliran mengakibatkan adanya gerusan yang terjadi di sekitarnya. Bahwa dengan adanya perbedaan pilar akan menghasilkan gerusan yang berbeda pula, penambahan kedalaman gerusan terjadi pada saat menit-menit awal dengan penambahan yang besar, seiring dengan lamanya waktu kedalam gerusan tersebut menjadi kecil. Ini menandakan bahwa dengan debit tertentu, semakin lama kedalaman gerusan akan semakin kecil (Rahmadani, 1995 dalam Prabowo, 2016). Semakin besar bentuk sudut yang terjadi terhadap arah aliran, maka semakin besar kedalaman gerusan yang terjadi di sisi pilar (Ikhsan dan Hidayat, 2006).

Posisi kedalaman gerusan maksimum terjadi pada samping pilar, hal ini terjadi karena dominasi penyempitan aliran, kecepatan semakin besar apabila terjadi penyempitan aliran. Variasi diameter pilar berpengaruh terhadap kedalaman gerusan maksimum, semakin besar diameter pilar maka semakin besar kedalaman gerusan yang terjadi.

IRIC Nays2DH 1.0 dapat menganalisa aliran tidak seragam dan menghasilkan luaran berupa sebaran material dasar sungai secara horizontal. Sebagai tambahan, generasi, proses perkembangan dan migrasi/perpindahan pada ambang sungai dapat ditiru/dimodelkan. *IRIC Nays2DH 1.0* biasanya diaplikasikan/digunakan untuk simulasi sungai-sungai alami. Efek dari vegetasi/tanaman pada perubahan dasar sungai dan proses transportasi sedimen pada dasar sungai yang kasar (contoh: bebatuan) dapat disimulasikan atau dimodelkan (Mukti, 2016).

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Prabowo (2015) mengenai analisis hidraulik pada abutmen jembatan akibat perubahan bentuk pilar menggunakan *software iRIC* dan dengan bentuk pilar persegi, lingkaran, palung, dan belah ketupat menunjukkan bahwa perubahan elevasi dasar saluran yang diakibatkan oleh pilar persegi adalah yang paling besar diantara bentuk pilar yang

lainnya, sedangkan pilar dengan perubahan elevasi dasar saluran yang paling sedikit adalah aliran dengan pilar lingkaran.

Dari penelitian tersebut juga di peroleh hasil bahwa kecepatan aliran yang besar terjadi pada aliran dengan bentuk pilar lingkaran, palung, dan belah ketupat. Pada aliran dengan pilar persegi kecepatan aliran yang terjadi tidak terlalu besar.

Pada penelitian lainnya yang dilakukan oleh Mukti (2016) mengenai pengaruh bentuk pilar jembatan terhadap gerusan lokal menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dengan bentuk pilar berpenampang persegi, belah ketupat, lingkaran, dan palung di dapatkan hasil bahwa pilar yang paling sedikit berpengaruh terhadap kecepatan aliran serta terhadap pola turbulensi (arah aliran) aliran adalah pilar dengan penampang palung.

Dari penelitian tersebut, gerusan yang terjadi di sekitar pilar paling sedikit terjadi pada pilar dengan penampang palung, sedangkan perubahan elevasi yang paling besar terjadi pada pilar dengan penampang persegi.

Dalam analisa gerusan yang terjadi pada sekitar pilar dapat dimodelkan dengan dua cara, yaitu permodelan fisik dan permodelan matematik. Namun, untuk membedakan dengan penelitian sebelumnya penelitian ini dimodelkan dengan model matematik software *IRIC: Nays2DH 1.0*. Software ini serupa dengan Ric - Nays. Ric – Nays yang merupakan salah satu model numerik yang dapat digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan. Input yang dibutuhkan dalam software ini adalah data geometrik saluran, data debit aliran, dan data manning saluran. Data input yang digunakan pada analisa ini merupakan data primer yang diperoleh pada pengujian Laboratorium Hidraulika Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Analisa yang dilakukan adalah menghitung kedalaman gerusan melalui software Ric – Nays, yang kemudian diintegrasikan dengan software GIS (Sistem Informasi Geografis) untuk mendapatkan kedalaman gerusan pada 9 titik pengamatan. Data yang diperoleh dari hasil simulasi, dibandingkan dengan data hasil uji laboratorium, yang kemudian dikalibrasi dengan menggunakan metode RMSE (Root Mean Square Error). Nilai agradasi dan degradasi pada setiap titik pengamatan hasil simulasi hampir sama dengan nilai agradasi dan degradasi pada pengujian laboratorium. Sehingga dapat

disimpulkan bahwa kedua pengujian yang dilakukan memiliki pola gerusan yang sama. (Hastuti, 2011 dalam Mukti, 2016).

Penelitian untuk mengetahui pengaruh bentuk pilar menggunakan software IRIC: Nays2DH 1.0 juga pernah dilakukan oleh Mukti dan Prabowo (2016). Dalam hasil penelitian ini didapatkan hasil bahwa bentuk pilar dapat mempengaruhi kecepatan, arah kecepatan, pola aliran, dan elevasi muka air di sekitar pilar dan abutment.

Dalam penelitian kali ini, peneliti akan membandingkan model matematik software iRIC: Nays2DH 1.0 dan model fisik. Software ini serupa dengan Ric - Nays. Ric – Nays yang merupakan salah satu model numerik yang dapat digunakan untuk menghitung transportasi sedimen, kedalaman gerusan, perubahan dasar dan morfologi sungai . Input yang dibutuhkan dalam software ini adalah data geometrik saluran, angka manning, slope saluran dan data debit aliran. Data input yang digunakan pada analisis ini merupakan data sekunder yang diperoleh pada pengujian model fisik di Laboratorium Keairan dan Lingkungan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Data yang diperoleh dari hasil simulasi, dibandingkan dengan data hasil uji laboratorium (model fisik).

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Sungai

Sungai adalah jaringan alur-alur pada permukaan bumi yang terbentuk secara alamiah, mulai dari bentuk kecil dibagian hulu sampai besar dibagian hilir (Sudira dan Tiny, 2013).

Sifat-sifat sungai sangat dipengaruhi oleh luas daerah aliran sungai (DAS) serta kemiringan saungai. Bentuk tebing, dasar muara dan pesisir di depan muara memberi pengaruh terhadap pembentukan sedimentasi terutama terhadap angkutan sedimen (Sudarman, 2011 dalam Sudira dan Tiny, 2013).

1. Jenis sungai

Menurut Pangestu dan Helmi (2013), Berdasarkan asal airnya sungai dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis yaitu:

a. Sungai mata air

Sungai mata air adalah sungai yang airnya bersumber dari mata air.Sungai ini biasanya terdapat di daerah yang mempunya curah hujan sepanjang tahun dan daerah aliran sungainya masih tertutup vegetasi yang cukup lebat.

b. Sungai hujan

Sungai hujan yaitu sungai yang airnya bersumber hanya dari air hujan. Jika tidak ada hujan, sungai akan kering. Sungai ini umumnya berada di daerah yang bervegetasi jarang atau terletak di daerah lereng sebuah gunung atau perbukitan .

c. Sungai gletser

Sungai gletser adalah sungai yang airnya bersumber dari pencairan es atau salju.Sungai ini hanya ada di daerah lintang tinggi atau di puncak gunung yang tinggi.Contohnya sungai Membramo di Papua.

d. Sungai campuran

Sungai campuran yaitu sungai yang airnya bersumber dari berbagai macam sumber, baik dari hujan, mata air, dan pencairan salju atau es.Artinya, air dari berbagai sumber tersebut bercampur menjadi satu dan mengalir sampai hilir.

2. Alur Sungai

Menurut Daties (2012), suatu alur sungai dapat dibagi menjadi tiga bagian. Tiga bagian tersebut adalah sebagai berikut:

a. Bagian hulu

Hulu sungai merupakan daerah konservasi dan juga daerah sumber erosi karena memiliki kemiringan lereng yang besar ($>15\%$). Alur sungai di bagian hulu ini biasanya mempunyai kecepatan yang lebih besar dari bagian lainnya, sehingga saat banjir material hasil erosi yang diangkut bukan hanya partikel sedimen yang halus tetapi juga mengangkut pasir, kerikil bahkan batu.

b. Bagian tengah

Bagian ini merupakan daerah peralihan dari bagian hulu dan hilir. Kemiringan dasar sungai relatif lebih landai dari bagian hulu. Bagian ini merupakan daerah keseimbangan antara proses erosi dan sedimentasi yang sangat bervariasi dari musim ke musim.

c. Bagian Hilir

Alur sungai di bagian hilir biasanya melalui daerah daratan yang memiliki kemiringan yang landai sehingga kecepatan alirannya lambat. Keadaan ini menyebabkan beberapa tempat menjadi daerah banjir (genangan) dan mudah terbentuk endapan sedimen. Endapan yang terbentuk biasanya berupa endapan pasir halus, lumpur, endapan organik, atau jenis endapan lain yang sangat stabil.

B. Aliran

1. Aliran pada saluran terbuka

Ada berbagai macam tipe aliran pada saluran terbuka, menurut Daties (2012) tipe aliran pada saluran terbuka ada 4 macam yaitu:

a. Aliran tetap (*Steady flow*)

Aliran *steady* memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- 1) Perubahan debit aliran terhadap waktu tetap
- 2) Perubahan kedalaman aliran terhadap waktu tetap
- 3) Perubahan kecepatan aliran terhadap waktu tetap

b. Aliran tidak tetap (*Unsteady flow*)

Aliran *unsteady* memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- 1) Perubahan debit aliran terhadap waktu tidak tetap
- 2) Perubahan kedalaman aliran terhadap waktu tidak tetap
- 3) Perubahan kecepatan aliran terhadap waktu tidak tetap

c. Aliran seragam (*Uniform flow*)

Aliran *uniform* memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- 1) Besar dan arah kecepatan tetap terhadap jarak
- 2) Aliran dengan penampang sama
- 3) Variabel fluida lain juga tetap

d. Aliran tidak seragam (*Non uniform flow*)

Aliran *non-uniform* memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- 1) Aliran *non-uniform* memiliki ciri-ciri sebagai berikut:
- 2) Aliran dengan penampang tidak sama
- 3) Pengaruh pembendungan dan variabel fluida lain juga tetap

Sungai pada umumnya memiliki tipe aliran tetap (*steady flow*) dan aliran tidak seragam (*non uniform flow*).

Kondisi aliran dalam saluran terbuka berdasarkan pada kedudukan permukaan bebas cenderung berubah menurut ruang dan waktu, disamping itu ada hubungan ketergantungan antara lain kedalaman aliran, debit air, kemiringan dasar saluran dan permukaan bebas. Kondisi fisik saluran terbuka jauh lebih bervariasi dibandingkan dengan saluran tertutup. Berikut beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pola aliran :

a. Debit Aliran

Debit aliran merupakan hubungan perkalian antara kecepatan aliran dengan luas tampang basah saluran. Ven Te Chow (1989), dalam Sudiyono dkk (2014).

$$Q = U \cdot A \dots\dots\dots (1)$$

Dimana : Q = Debit aliran, m³/det

U = Kecepatan aliran rata-rata, m/det

$A =$ Luas penampang aliran, m²

b. Kecepatan Aliran Rata-rata

Menurut Ven Te Chow (1989), Sudiyono dkk (2014) kecepatan aliran rata-rata merupakan perbandingan antara debit aliran yang melewati saluran (Q) dengan luas tampang basah saluran (A) seperti persamaan dibawah ini:

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B \cdot Y_0} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana : $U =$ Kecepatan aliran rata-rata, (m/det)

$Y_0 =$ Kedalaman aliran, (m)

$B =$ Lebar saluran, (m)

$Q =$ Debit, (m³/det)

$A =$ Luas penampang aliran, (m²)

Kecepatan rata-rata menurut Chezy dirumuskan sebagai berikut:

$$U = C \sqrt{R S_f} \dots\dots\dots (3)$$

$$C = 18 \log \frac{12 Y_0}{k + 2.7 \delta} \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta = \frac{11,6 \nu}{U_0} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana : $C =$ Koefisien Chezy

$S_f =$ Kemiringan garis energi

$Y_0 =$ Kedalaman aliran

$R =$ Jari –jari hidrolis

$K =$ Diameter kekasaran dasar

$\delta =$ Batas daerah transisi laminar dan turbulen

Y = Viskositas

c. Bilangan Reynolds

Klasifikasi aliran berdasarkan bilangan *Reynolds* dapat dibedakan menjadi tiga kategori seperti berikut:

- 1) $Re < 500$, maka termasuk aliran laminar
- 2) $500 < Re < 12.500$, maka termasuk aliran transisi
- 3) $Re > 12.500$, maka termasuk aliran turbulen

$$Re = U \cdot \frac{R_s}{\nu} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan: U = Kecepatan aliran (m/s)

Re = Panjang karakteristik (m)

ν = Kekentalan kinematik = 10^{-6} (m/s)

Umumnya aliran pada saluran terbuka mempunyai $Re > 12.500$, sehingga alirannya termasuk dalam aliran turbulen (French, 1985 dalam Achmadi, 2001).

d. Bilangan Froude

Tingkat kekritikan aliran dapat dibedakan berdasarkan bilangan Froude. Bilangan Froude untuk saluran terbuka dinyatakan sebagai berikut, yaitu :

- 1) Aliran kritis, jika bilangan Froude sama dengan satu ($Fr = 1$) dan gangguan permukaan misal, akibat riak yang terjadi akibat batu yang dilempar ke dalam sungai tidak akan bergerak menyebar melawan arah arus.
- 2) Aliran subkritis, jika bilangan Froude lebih kecil dari satu ($Fr < 1$). Untuk aliran subkritis, kedalaman biasanya lebih besar dan kecepatan aliran rendah (semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus).
- 3) Aliran superkritis, jika bilangan Froude lebih besar dari satu ($Fr > 1$). Untuk aliran superkritis, kedalaman aliran relatif lebih kecil dan

kecepatan relatif tinggi (segala riak yang ditimbulkan dari suatu anggung adalah mengikuti arah arus).

Persamaan untuk menghitung bilangan *Froude*, yaitu :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \dots \dots \dots (7)$$

Dengan: Fr = Bilangan *Froude*

U = Kecepatan aliran (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

h = Kedalaman aliran (m)

e. Koefisien Kekasaran Manning

Menurut Chow (1989), faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran Manning adalah sebagai berikut :

- 1) Kekasaran permukaan, yang ditandai dengan ukuran dan bentuk butiran bahan yang membentuk luas basah dan menimbulkan efek hambatan terhadap aliran. Secara umum dikatakan bahwa butiran halus menyebabkan nilai n yang relatif rendah dan butiran kasar memiliki nilai n yang tinggi.
- 2) Tetumbuhan yang juga memperkecil kapasitas saluran dan menghambat aliran.
- 3) Ketidakteraturan saluran, yang mencakup pula ketidakteraturan keliling basah dan variasi penampang, ukuran dan bentuk di sepanjang saluran. Secara umum perubahan lambat laun dan teratur dari penampang 62 ukuran dan bentuk tidak terlalu mempengaruhi nilai n, tetapi perubahan tiba-tiba atau peralihan dari penampang kecil ke besar memerlukan penggunaan nilai n yang besar.
- 4) Trase saluran, dimana kelengkungan yang landai dengan garis tengah yang besar akan mengakibatkan nilai n yang relatif rendah, sedangkan kelengkungan yang tajam dengan belokan-belokan yang patah akan memperbesar nilai n.

- 5) Pengendapan dan penggerusan. Secara umum pengendapan dapat mengubah saluran yang sangat tidak beraturan menjadi cukup beraturan dan memperkecil n , sedangkan penggerusan dapat berakibat sebaliknya dan memperbesar n . Namun efek utama dari pengendapan akan tergantung dari sifat alamiah bahan yang diendapkan.
- 6) Hambatan, berupa balok sekat, pilar jembatan dan sejenisnya yang cenderung memperbesar nilai n .

Besarnya koefisien dasar saluran dapat dihitung menurut Chow, (1989) dalam Koyari dkk (2012) dengan rumus :

$$n = \frac{1}{v} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (8)$$

Dimana : n = Koefisien kekasaran Manning

V = Kecepatan aliran (m/dt)

R = Jari-jari hidrolik (m)

I = Kemiringan Saluran

Nilai jari-jari hidraulik (R) diperoleh dengan rumus :

$$R = \frac{A}{P} \dots \dots \dots (9)$$

Dimana : P = Keliling tampang basah (m)

A = Luas saluran (m^2)

Nilai kemiringan saluran (I) diperoleh dengan rumus :

$$I = \frac{\Delta h}{s} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana : Δh = Beda tinggi saluran hulu dan hilir (m)

s = Panjang tinjauan hulu dan hilir (m)

Tabel 3.1 Koefisien kekasaran Manninh

Bahan	n
-------	-----

Besi tulangelapis	0,014
Kaca	0,010
Saluran beton	0,013
Bata dilapis mortar	0,015
Pasangan batu disemen	0,025
Saluran tanah bersih	0,022
Saluran tanah	0,030
Saluran dengan dasar batudan tebing rumput	0,040
Saluran padagangan batupadas	0,040

Sumber : Triatmodjo, 2008

C. Pilar Jembatan

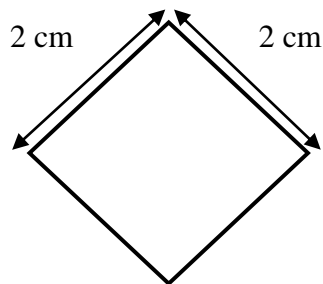
Menurut Mukti (2016) mendefinisikan pilar suatu bangunan bawah yang terletak di tengah – tengah bentang antara dua buah abutment yang berfungsi juga untuk memikul beban – beban bangunan atas dan bangunan lainnya dan meneruskannya ke pondasi serta disebarkan ke tanah dasar yang keras.

Wibowo (2007) menyebutkan pengaruh bentuk pilar berdasarkan potongan horizontal dari pilar telah diteliti oleh Laursen dan Toch (1956), Neil (1973) dan Dietz (1972). Menurut Wibowo (2007) kedalaman gerusan lokal tergantung pada kedudukan / posisi pilar terhadap arah aliran yang terjadi serta panjang dan lebarnya pilar. Karena kedalaman gerusan merupakan rasio dari panjang dan lebar serta sudut dari tinjauan terhadap arah aliran. Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal, pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran datang yang diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan.

Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal, pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran datang yang diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan. Hal ini juga tergantung pada panjang dan lebar (l/b) masing-masing bentuk mempunyai koefisien faktor bentuk K_s

Pilar jajar genjang memiliki perbandingan ukuran 1:1 dengan ukuran lebar 2 cm dan tebal 2 cm (Ariyanto, 2010). Pilar tersebut menyerupai pilar tajam pada

penelitian ini dengan perbandingan 1 : 1 dengan tebal 5,5 cm dan lebar 5,5 cm, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.





Gambar 3.1 Model pilar jajar genjang (*sumber: Ariyanto,2010*)

Pilar model lenticular memiliki perbandingan ukuran panjang dan lebar 1:2 dengan Kekasaran 0,80 dan 1:3 dengan kekasaran 0,70 (Dietz, 1971 dalam Breuser dan Raudkivi, 1991:73). Model tersebut juga menyerupai bentuk pilar kapsul yang digunakan pada penelitian ini dengan perbandingan ukuran 1:2. Pada Tabel 3.2 menunjukkan koefisien faktor berbagai bentuk pilar.

Tabel 3.2 Koefisien faktor bentuk pilar

Bentuk Pilar	b/l	b'/l'	K_s	Gambar Bentuk Pilar
Silinder			1.0	
Persegi (<i>Rectangular</i>)	1:1 1:5		1.22 0.99	
Persegi dengan ujung setengah lingkaran (<i>rectangular with semi circular nose</i>)	1:3			
Ujung setengah lingkaran dengan bentuk belakang lancip (<i>semi circular nose with wedge shape tail</i>)	1:5		0.86	
Persegi dengan sisi depan miring (<i>rectangular with wedge shape nose</i>)	1:3	1:2 1:4	0.76 0.65	

Elips (<i>Elliptic</i>)	1:2		0.83	
	1:3		0.80	
	1:5		0.61	
<i>Lenticular</i>	1:2		0.80	
	1:3		0.70	
Aerofil	1:3.5		0.80	

(Sumber : Breuser dan Raudkivi, 1991:73)

D. Gerusan

Menurut Laursen (1952) dalam Wibowo (2007), gerusan didefinisikan sebagai pembesaran dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal (*local scouring*) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen ditranspor lebih besar dari sedimen yang disuplai. Transpor sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar.

1. Tipe Gerusan

Menurut Ettema dan Raudkivi (1982) dalam Ariyanto (2010), perbedaan gerusan dapat dibagi menjadi:

a. Gerusan umum (*general scour*)

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

b. Gerusan dilokalisir (*constriction scour*)

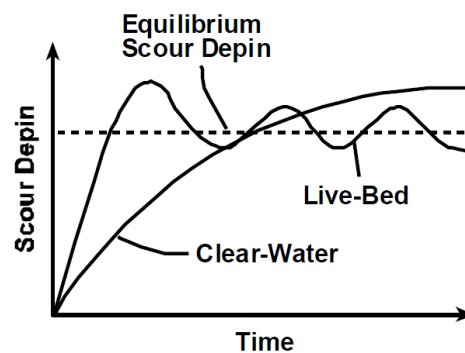
Gerusan dilokalisir adalah gerusan yang diakibatkan oleh adanya penyempitan alur sungai sehingga aliran akan menjadi terpusat.

c. Gerusan lokal (*local scour*)

Gerusan lokal adalah gerusan akibat langsung dari struktur pada alur sungai.

Peristiwa ketiga jenis gerusan tersebut dapat terjadi bersamaan namun pada tempat yang berbeda. Gerusan dilokalisir di alur sungai dan gerusan lokal di sekitar bangunan selanjutnya dapat dibedakan menjadi gerusan dengan air bersih (*clear water scour*) maupun gerusan dengan air bersedimen (*live-bed scour*). Gerusan dengan air bersih berkaitan dengan suatu keadaan dimana

dasar sungai di sebelah hulu bangunan dalam keadaan diam (tidak ada material yang terangkut), atau secara teoritik ($t_0 < t_c$) dimana t_0 adalah tegangan geser yang terjadi, sedangkan t_c adalah tegangan geser kritis dari butiran dasar sungai. Perbedaan mendasar antara gerusan oleh air bersih dibandingkan dengan air bersedimen adalah mengikuti skema seperti disajikan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu. (Sumber: Istiarto, 2002 dalam Ariyanto, 2010)

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa kedalaman gerusan lokal di sekitar pilar pada aliran dengan air bersih akan konstan, sedangkan pada aliran dengan air bersedimen kedalaman gerusannya akan mengalami perubahan dari waktu ke waktu akibat adanya degradasi dan aggradasi sedimen.

Kedalaman dan area gerusan pada jembatan dipengaruhi oleh sebagian maupun keseluruhan faktor-faktor berikut ini:

- Kemiringan saluran/slope (I). Slope adalah perbandingan antara tinggi absolut (h) dan panjang (l).
- Jenis dan jumlah meterial dasar yang diangkut.
- Debit aliran (Q), semakin tinggi debit yang mengalir melewati pilar tersebut, maka kedalaman gerusan yang terjadi disekitar pilar akan semakin besar.
- Keterbatasan atau perubahan aliran yang melalui jembatan dan saluran.
- Geometri dan garis lurus normal pilar.

f. Perubahan alami atau perubahan aliran buatan manusia atau struktur sedimen.

g. Kecelakaan, seperti runtuhnya struktur.

Menurut Larsen (1952) dalam Ikhsan (2007) sifat alami gerusan memiliki fenomena sebagai berikut :

a. Besarnya gerusan akan sama dengan selisih antara jumlah material yang ditranspor keluar daerah gerusan dengan jumlah yang ditranspor ke dalam daerah gerusan.

b. Besarnya gerusan akan berkurang apabila tampang basah di daerah gerusan bertambah (misal karena adanya erosi).

c. Untuk suatu kondisi aliran akan ada suatu keadaan gerusan yang disebut gerusan batas.

2. Mekanisme Gerusan

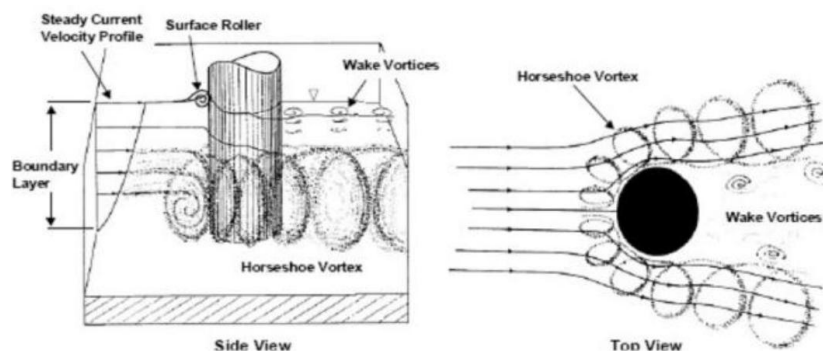
Aliran yang terjadi pada sungai sering kali disertai dengan angkutan sedimen dan proses gerusan. Proses gerusan akan terbentuk secara alamiah karena pengaruh morfologi sungai atau karena adanya struktur yang menghalangi aliran sungai. Angkutan sedimen terjadi karena aliran sungai mempunyai energi yang cukup besar untuk membawa sejumlah material.

Proses gerusan dimulai pada saat partikel yang terbawa aliran bergerak mengikuti pola aliran bagian hulu ke bagian hilir. Pada kecepatan yang lebih tinggi maka partikel yang terbawa akan semakin banyak dan gerusan akan semakin besar, baik ukuran maupun kedalamannya. Kedalaman maksimum gerusan akan dicapai pada saat kecepatan aliran mencapai kecepatan kritik (Chabert dan Engal, 1956 dalam Rahmadani, 2014).

Bila struktur ditempatkan pada suatu arus air, aliran air disekitar struktur akan berubah dan gradien kecepatan vertikal (vertikal velocity gradient) dari aliran akan berubah menjadi gradien tekanan (pressure gradient) pada ujung permukaan struktur tersebut. Gradien tekanan (pressure gradient) merupakan hasil dari aliran bawah yang membentur bed. Pada dasar struktur, aliran bawah ini membentuk pusaran yang pada akhirnya menyapu sekeliling dan bagian

bawah struktur dengan memenuhi seluruh aliran. Hal ini dinamakan pusaran tapal kuda (horse shoes vortex), karena dilihat dari atas bentuk pusaran ini mirip tapal kuda.

Pada permukaan air, interaksi aliran dan struktur membentuk busur ombak (bow wave) yang disebut sebagai gulungan permukaan (surface roller). Pada saat terjadi pemisahan aliran, struktur bagian dalam mengalami wake vortices (Miller, 2003 dalam Rahmadani, 2014).



Gambar 3.3 Mekanisme gerusan akibat pola aliran air disekitar pilar (sumber: Rahmadani, 2014)

Berdasarkan Vanoni (1975) dalam Wibowo (2007) ada tiga jenis sistem gaya pusaran yang bekerja disekitar pilar, yaitu sistem pusaran tapal kuda (horse shoes system), sistem pusaran belakang (*wake vortek system*) dan sistem pusaran seret (*trailing vortex system*).

Melville (1975) dalam Wibowo (2007) menjelaskan tahap-tahap gerusan yang terjadi antara lain sebagai berikut:

- Peningkatan aliran yang terjadi pada saat perubahan garis aliran di sekeliling pilar.
- Pemisahan aliran dan peningkatan pusaran tapal kuda yang lebih intensif sehingga menyebabkan pembesaran lubang gerusan.
- Longsor/turunnya material disekitar lubang gerusan pada saat lubang cukup besar setelah terkena pusaran tapal kuda.

Nakagawa dan Suzuki (1975) dalam Wibowo (2007) membedakan gerusan dalam empat tahap:

- a. Gerusan di sisi (kanan dan kiri) pilar yang disebabkan kekuatan tarikan dari arus utama (*main flow*).
- b. Gerusan di depan pilar yang diakibatkan *horseshoe vortex* (pusaran tapal kuda).
- c. Pembesaran gerusan oleh pusaran stabil yang mengalir melewati pilar.
- d. Periode reduksi gerusan selama penurunan kapasitas transpor di lubang gerusan.

E. iRIC: Nays2DH 1.0

Morpho2D adalah metode analisa permasalahan perubahan dasar sungai/saluran pada aliran *unsteady* (aliran tidak tetap) perhitungan dua dimensi dalam arah horizontal. Program/metode perhitungan ini dikembangkan oleh Hiroshi Takebayashi dari Kyoto University. Persamaan yang digunakan dalam metode tersebut telah ditulis sesuai dengan batas sistem koordinat secara umum. Di tahun 2009, metode perhitungan ini digunakan pada *RIC-Nays* versi 1.0 yang merupakan program *software* yang dikembangkan oleh *RIC*. Beberapa fungsi baru ditambahkan untuk pengembangan dari versi sebelumnya yang kemudian menghasilkan program *iRIC* versi 2.0 pada Maret 2011 dan kemudian berkembang menjadi *iRIC: Nays2DH 1.0*.

Nays2DH adalah simulasi komputasi dua dimensi (2d) untuk menganalisa permasalahan gerusan, transportasi sedimen, perubahan dasar sungai dan morfologi sungai dalam arah horizontal. Program ini merupakan gabungan dari program *nays2d* dan *morpho2d* sebelumnya sudah ada didalam *software iRIC*. Metode perhitungan ini dikembangkan oleh Hiroshi Takebayashi dari Kyoto University dan Yasutuki Shimizu dari Hokkaido University. Persamaan yang mengatur/digunakan dalam metode tersebut telah ditulis sesuai dengan batas sistem koordinat secara umum. *Nays2DH* dipublikasikan tanggal 12 Juni 2014 dan sampai saat ini belum ada lagi pembaharuan *software* ini

iRIC: Nays2DH 1.0 dapat menganalisa aliran tidak seragam dan menghasilkan *output* berupa sebaran material dasar sungai secara horizontal. Sebagai tambahan, proses perkembangan dan perpindahan pada ambang sungai

dapat dimodelkan. *iRIC:Nays2DH 1.0* biasanya digunakan untuk simulasi sungai-sungai alami. Efek dari vegetas/tanaman pada perubahan dasar sungai dan proses transportasi sedimen pada dasar sungai yang kasar (contoh: bebatuan) dapat disimulasikan atau dimodelkan.

1. Karakteristik model aliran

- a. Sistem koordinat yang digunakan adalah sistem koordinat secara umum. Bentuk (batas) sungai yang kompleks dapat dipertimbangkan/dihitung pada pemodelan.
- b. Skema TVD-MacCormack (orde ketelitian tingkat 2) biasa digunakan untuk jangka konfeksi pada persamaan momentum sebagai perbedaan metode yang digunakan.
- c. Model persamaan 0 biasa digunakan untuk perhitungan pada difusi/persebaran aliran turbulen.
- d. Kondisi batas spasial meliputi kedalaman air bagian hilir akhir dan debit air pada bagian hulu akhir.
- e. Kedalaman normal rata-rata secara longitudinal/memanjang digunakan sebagai kedalaman air awal. Kemiringan dasar sungai sungai rata-rata secara longitudinal digunakan untuk menghitung kedalaman normal. Ketika elevasi air mula-mula di dalam grid numerik lebih rendah dari elevasi air mula-mula pada bagian hilir, elevasi mula-mula pada bagian hilir akan digunakan untuk kondisi awal kedalaman air dalam grid numerik.
- f. Hukum Manning digunakan untuk memperkirakan tegangan geser pada dasar sungai. Angka koefisien Manning dapat didistribusikan secara horizontal.
- g. Hambatan dalam suatu domain/daerah perhitungan dapat dipertimbangkan berdasar data ketinggian area yang tidak tererosi. Dengan menggunakan data tersebut, pilar pada jembatan dan bangunan lainnya dapat dipertimbangkan dalam perhitungan.

- h. Tanaman vegetasi dapat diperhitungkan/dianggap sebagai gaya tarik atau gaya penahan yang bekerja pada arus aliran. Tingkat/jumlah lapisan yang tertutupi oleh tanaman dan tinggi tanaman dapat digunakan untuk estimasi besarnya gaya tarik atau gaya penahan yang bekerja.
2. Karakteristik pemodelan transport sedimen dan perubahan dasar sungai
- a. Pengguna dapat memilih untuk simulasi/perhitungan aliran air atau simulasi/perhitungan untuk analisa perubahan dasar sungai.
 - b. Pengguna dapat memilih untuk menggunakan simulasi/perhitungan bed load atau bed load + suspended load.
 - c. Aliran sedimen seragam (uniform sedimen) dan tidak seragam (non-uniform) dapat disimulasikan. Ketika menggunakan simulasi sedimen tidak seragam (non-uniform sedimen), ukuran gradasi butiran/ukuran distribusi sedimen dapat diperhitungkan (dijadikan data input untuk analisa perhitungan simulasi).
 - d. Erosi pada bagian tepi/sisi sungai dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan sudut sedimentasi yang terbentuk. Ketika kemiringan dasar sungai lokal (di suatu bagian tertentu) lebih besar dari sudut sedimentasi yang terbentuk, sedimen pada grid numerik yang lebih tinggi akan berpindah ke grid numerik yang lebih rendah untuk menjaga nilai kemiringan dasar sungai lokal lebih kecil dari pada nilai sudut sedimentasi yang terbentuk.
3. Lain-lain
- Fungsi simulasi berkelanjutan dapat digunakan. Simulasi/perhitungan yang baru dapat dimulai dengan menggunakan kondisi akhir dari simulasi sebenarnya.
4. Persamaan dalam aliran
- a. Persamaan dalam koordinat kartesius (*Cartesian coordinate*)
 Pertama, persamaan dalam koordinat kartesius (x,y) akan ditransformasikan/diubah ke sistem koordinat umum.

 [Persamaan continuum (Rangkaian kesatuan)]

$$\Lambda \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + \frac{\partial}{\partial x}(u_g h_g) + \frac{\partial}{\partial y}(v_g h_g) = 0 \dots \dots \dots (11)$$

[Persamaan momentum]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(huu) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) \\ &= -gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(h\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yx}) - \frac{F_{vx}}{\rho} \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hvv) \\ &= -gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\sigma_{yy}) - \frac{F_{vy}}{\rho} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

Dengan,

$$\tau_x = \tau_b \frac{u_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}}, \tau_y = \tau_b \frac{v_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}}, \frac{\tau_b}{\rho} = u_*^2 \dots \dots \dots (14)$$

$$\sigma_{xx} = 2\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}, \sigma_{yy} = 2\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y}, \tau_{xy} = \tau_{yx} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (15)$$

$$F_{xy} = F_v \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, F_{vy} = F_v \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \frac{F_v}{\rho} = \frac{1}{2} C_{dv} \lambda_v (u^2 + v^2) h_v \dots \dots \dots (16)$$

Dengan t adalah waktu, x adalah koordinat di sepanjang arah memanjang, dan y untuk arah melintang. u^* mewakili/ mempresentasikan kecepatan aliran pada kedalaman rerata di dasar sungai sepanjang aliran arah memanjang dan v untuk arah melintang. Kedalaman rerata di dasar sungai sepanjang aliran arah memanjang dan v untuk arah melintang. Kedalaman rata-rata untuk rembesan air dari kecepatan aliran sepanjang koordinat x dan y pada sistem koordinat kartesius ditunjukkan sebagai u_g dan v_g secara berturut-turut. z adalah elevasi muka air, z_b adalah elevasi dasar sungai. Kedalaman aliran dari permukaan air ditunjukkan sebagai h dan kedalaman rembesan aliran ditunjukkan sebagai h_g . g adalah nilai gravitasi, ρ adalah kerapatan (massa jenis) air. τ_x adalah tegangan geser sepanjang arah memanjang dan τ_y untuk arah melintang. τ_b adalah tegangan geser di dasar sungai. ε adalah nilai

koefisien viskositas eddy. u adalah nilai kecepatan gesekan. u_b dan v_b menunjukkan kecepatan di dekat permukaan dasar sungai pada arah memanjang dan melintang secara berurutan. F_{vx} dan F_{vy} adalah gaya geser akibat dari vegetasi sepanjang arah memanjang dan melintang. C_{dv} ($=1.0$) adalah nilai koefisien dari bentuk gesekan, λ_v adalah kerapatan (massa jenis) vegetasi. h_x adalah kedalaman air pada daerah/bidang yang ditumbuhi vegetasi. Ketika tinggi tanaman vegetasi lebih besar/tinggi daripada kedalaman air, h_v bernilai sama dengan kedalaman air. Ketika tinggi tanaman vegetasi lebih rendah dari kedalaman air, h_v bernilai sama dengan tinggi tanaman vegetasi. Λ adalah parameter yang terkait dengan porositas dalam tanah, dengan $\Lambda = 1$ jika $z \geq z_b$ dan $\Lambda = \lambda$ jika $z < z_b$, dengan z_b adalah level/elevasi dasar sungai dan λ adalah porositas dalam tanah. Rembesan airdiasumsikan sebagai kejenuhan air/aliran dalam dua dimensi arah horizontal.

b. Perubahan ke sistem koordinat umum

Selanjutnya, persamaan yang mengatur dari aliran dua dimensi arah horizontal dalam sistem koordinat kartesius diubah kedalam bentuk sistem koordinat umum (ξ, η) . Dengan menggunakan sistem koordinat umum, maka grid numerik yang kompleks dapat digunakan. Hubungan antara sistem koordinat kartesius dengan sistem koordinat umum adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} \dots\dots\dots(17)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \dots\dots\dots(18)$$

atau,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x & \eta_x \\ \xi_y & \eta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(19)$$

Dengan,

$$\bar{\xi}_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \bar{\xi}_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots \dots \dots (20)$$

sejalan dengan,

$$\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial y} \dots \dots \dots (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial y} \dots \dots \dots (22)$$

atau

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (23)$$

Dengan,

$$x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi}, x_\eta = \frac{\partial x}{\partial \eta}, y_\xi = \frac{\partial y}{\partial \xi} \dots \dots \dots (24)$$

karenanya,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x} \begin{pmatrix} \eta_y & -\eta_x \\ -\xi_y & \xi_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (25)$$

dimana, dengan menggunakan hubungan $J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x$

$$\frac{1}{J} \begin{pmatrix} \eta_y & -\eta_x \\ -\xi_y & \xi_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \dots \dots \dots (26)$$

karenanya,

$$x_\xi = \frac{1}{J} \eta_y, y_\xi = -\frac{1}{J} \eta_x, x_\eta = -\frac{1}{J} \xi_y, y_\eta = \frac{1}{J} \xi_x, \dots \dots \dots (27)$$

atau,

$$\eta_y = J x_\xi, \eta_x = -J y_\xi, \xi_y = -J x_\eta, \xi_x = J y_\eta \dots \dots \dots (28)$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = J^2 (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \dots \dots \dots (29)$$

karena itu,

$$J = \frac{1}{(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)} \dots\dots\dots(30)$$

(ξ, η) komponen dari kecepatan dinyatakan sebagai (u^ξ, u^η) ,

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v \dots\dots\dots(31)$$

$$u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \dots\dots\dots(32)$$

atau,

$$\begin{pmatrix} u^\xi \\ u^\eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \dots\dots\dots(33)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \eta_y & -\xi_y \\ -\eta_x & \xi_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^\xi \\ u^\eta \end{pmatrix} \dots\dots\dots(34)$$

c. Persamaan dalam sistem koordinat umum

Persamaan dalam sistem koordinat umum yang diubah dari sistem koordinat kartesius (x,y) adalah sebagai berikut:

[Persamaan continuum(Rangkaian kesatuan)]

$$\Lambda \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hv}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_g U_g}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_g V_g}{J} \right) = 0 \dots\dots\dots(35)$$

[Persamaan momentum]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hU}{J} \right) \\ & - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right) \\ & - gh \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{h\xi}}{\rho J} - \frac{F_{v\xi}}{\rho J} \\ & + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) \dots\dots\dots (36)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hV}{J} \right) \\ & - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right) \\ & - gh \left(\frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} \right) \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{h\eta}}{\rho J} - \frac{F_{v\eta}}{\rho J} \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{yx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{yx}) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{yy}) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{yy}) \dots\dots\dots (37)$$

Dengan, U dan V menunjukkan kecepatan aliran pada kedalaman rerata *contravariant* di dasar sungai sepanjang koordinat ξ dan η , berurutan. Kecepatan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v, \quad V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \dots\dots\dots (38)$$

U_g dan V_g menunjukkan kecepatan aliran rembesan kedalaman rerata *contravariant* sepanjang koordinat ξ dan η berurutan. Kecepatan ini didefinisikan sebagai berikut:

$$U_g = \frac{\partial \xi}{\partial x} u_g + \frac{\partial \xi}{\partial y} v_g, \quad V_g = \frac{\partial \eta}{\partial x} u_g + \frac{\partial \eta}{\partial y} v_g \dots\dots\dots (39)$$

$\tau_{b\xi}$ dan $\tau_{b\eta}$ menunjukkan *contravariant* tegangan geser sepanjang ξ dan η berurutan. Tegangan geser tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau_{b\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \tau_{by}, \quad \tau_{b\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \tau_{by} \dots\dots\dots(40)$$

Hukum Manning digunakan untuk memperhitungkan kecepatan gesekan (u^*) berdasarkan,

$$u_*^2 = \frac{n_m^2 g}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) \dots\dots\dots(41)$$

Dengan n_m adalah koefisien kekasaran manning, R adalah radius hiraulika, k_s adalah tinggi kekasaran, u_b dan v_b menunjukkan kecepatan didekat permukaan dasar sungai sepanjang sumbu x dan y secara berurutan. $F_{v\xi}$ dan $F_{v\eta}$ menunjukkan *contravariant* gaya geser sebagai akibat dari tanaman vegetasi sepanjang ξ dan η secara berurutan. Gaya geser tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$F_{v\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} F_{vx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} F_{vy}, \quad F_{v\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} F_{vx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} F_{vy} \dots\dots\dots(42)$$

Persamaan momentum dari rembesan aliran air adalah berdasarkan,

$$u_g = -k_{gx} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right), \quad v_g = -k_{gy} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \dots\dots\dots(43)$$

Dengan k_{gx} dan k_{gy} secara berturut-turut adalah koefisien permeabilitas sepanjang arah longitudinal/memanjang dan melintang.

5. Metode perhitungan pada aliran turbulen

Model persamaan 0 digunakan untuk perhitungan tekanan turbulen dalam *Morpho2D*. Secara umum, koefisien viskositas eddy (ε) dapat dianggap sebagai hasil dari representasi kecepatan v_t dan panjang (l) berdasarkan pada persamaan:

$$\varepsilon = v_t l \dots\dots\dots(44)$$

Dalam bidang/daerah aliran yang mana kedalaman air dan kekasaran pada dasar sungai secara bertahap berubah dalam arah melintang, urutan koefisien viskositas eddy dalam arah horizontal dan vertikal diasumsikan

sama dan koefisien viskositas eddy ε yang diasumsikan bergantung pada kecepatan gesekan dan kedalaman air.

$$\varepsilon = au_*h \dots\dots\dots(45)$$

Dengan a adalah nilai konstan.

Percobaan yang telah dilakukan oleh Fisher dan Webel Schatzmann mengindikasikan bahwa nilai a konstan karena terkait dengan perpindahan/transportasi momentum vertikal sebesar 0,07. Karena itu, koefisien viskositas eddy ε dapat ditunjukkan dengan menggunakan nilai konstan dari Karman (K) = 0,4 berdasarkan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{k}{6} u_* h \dots\dots\dots(46)$$

Persamaan pergerakan/perpindahan (transport) aliran turbulen secara nilai statistik tidak digunakan pada pemodelan ini. Karena itu, pemodelan disebut dengan persamaan model 0.

6. Persamaan tegangan geser pada dasar sungai

Tegangan geser pada dasar sungai dirumuskan berdasarkan hukum Manning dalam *Morpho2D*. Koefisien kekasaran Manning dapat didistribusikan secara spasial.

Tegangan geser dasar τ_x , τ_y diperhitungkan berdasarkan kecepatan gesekan u^* . Hubungan antara kecepatan gesekan u^* dan kekasaran Manning n_m adalah berdasarkan persamaan berikut:

$$u_*^2 = \frac{n_m^2 g}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) \dots\dots\dots(47)$$

7. Persamaan gaya geser/penahan dari tanaman vegetasi

Gaya geser (penahan) yang diakibatkan oleh tanaman vegetasi dapat diperhitungkan dengan menggunakan nilai koefisien gaya geser C_{dv} , rapat massa tanaman vegetasi λ_v dan area proyeksi (tinggi) h_v dalam *Morpho2D*. Rapat massa vegetasi λ_v dapat diperhitungkan dengan menggunakan tingkat pelapisan/permukaan yang ditutupi dari tanaman vegetasi pada sel

perhitungan c_{av} dan rapat massa maksimum vegetasi λ_{vb} berdasarkan persamaan sebagai berikut,

$$\lambda_v = c_{uv} \lambda_{vb} \dots\dots\dots(48)$$

Distribusi spasial dari vegetasi dapat dipertimbangkan berdasarkan perubahan secara horizontal tingkat pelapisan/permukaan yang tertutupi tanaman c_{av} . Sebagai tambahan, dengan menggunakan data tinggi tanaman vegetasi h_v , proyeksi area (tinggi) dapat didefinisikan lebih akurat.

8. Persamaan transport sedimen

Sebagai salah satu pemodelan transport sedimen, *Morpho2D* dapat menggunakan simulasi (hanya *bed load*) dan (*bed load + suspended load*). Sebagai tambahan, jenis material dasar dapat dipilih dari sedimen seragam (*uniform sediment*) dan sedimen tidak seragam (*non-uniform sediment*).

a. Tegangan geser non-dimensional (besarannya tanpa batas)

Tegangan geser non-dimensional digunakan untuk memperhitungkan tingkat transport sedimen. Ketika nilai tegangan geser non-dimensional ini besar, maka tingkat transport sedimen juga besar. Begitu pula ketika nilai tegangan non-dimensional bernilai kecil, maka tingkat transport sedimen juga kecil. Tegangan geser non-dimensional menggunakan diameter rata-rata dari material dasar sungai dalam perpindahan/pertukaran lapisan material berdasarkan persamaan:

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{sgd_m} \dots\dots\dots(49)$$

Dengan d_m adalah diameter sedimen rata-rata dari pertukaran lapisan, s adalah nilai berat spesifik dari sedimen dalam air.

b. *Bed load*

Debit aliran dengan *input bed load* dalam arah *bed load* q_{bk} diperhitungkan oleh Ashida Michiue dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_{bk} = 17 \frac{\rho u_{*e}^3}{(\rho_s - \rho)g} (1 - \sqrt{K_c} \frac{u_{*ck}}{u_*}) (1 - K_c \frac{u_{*ck}^2}{u_*^2}) f_{bk} r_b \dots\dots\dots (50)$$

Dengan ρ_s adalah kerapatan/massa sedimen, dan u_{*c} adalah kecepatan gesekan efektif yang besarnya adalah berdasarkan persamaan:

$$u_*^2 = \frac{u^2 + v^2}{(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m}))^2} \dots\dots\dots (51)$$

Kecepatan gesekan kritis dari kelas ukuran sedimen k berdasarkan persamaan:

$$u_{*ck}^2 = u_{*cm}^2 \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_k/d_m)} \right]^2 \frac{d_k}{d_m}, d_k/d_m \geq 0.4 \dots\dots\dots (52)$$

$$u_{*ck}^2 = 0.85 u_{*cm}^2, d_k/d_m \leq 0.4 \dots\dots\dots (53)$$

Kecepatan gesekan kritis dari diameter rata-rata sedimen dihitung dengan menggunakan persamaan dari Iwagaki sebagai berikut:

$$u_{*cm}^2 = 80.9 d_m, d_m \geq 0.303 \dots\dots\dots (54)$$

$$u_{*cm}^2 = 134.6 d_m^{31/22}, 0.118 \leq d_m < 0.303 \dots\dots\dots (55)$$

$$u_{*cm}^2 = 55.0 d_m, 0.0565 \leq d_m < 0.118 \dots\dots\dots (56)$$

$$u_{*cm}^2 = 8.41 d_m^{11/32}, 0.0065 \leq d_m < 0.0565 \dots\dots\dots (57)$$

$$u_{*cm}^2 = 226 d_m, d_m < 0.0065 (\text{Unit: em}) \dots\dots\dots (58)$$

r_b adalah fungsi dari ketebalan pertukaran lapisan berdasarkan

$$r_b = 1, E_{sd} \geq E_{be} \dots\dots\dots (59)$$

$$r_b = \frac{E_b}{E_{be}}, E_{sd} \leq E_{be} \dots\dots\dots (60)$$

K_c adalah fungsi modifikasi dari pengaruh kemiringan dasar sungai lokal pada transport sedimen, ditunjukkan dengan persamaan:

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \cos \alpha \cdot \tan \theta_y + \sin \alpha \cdot \tan \theta_x \right] \dots \dots \dots (61)$$

Dengan α adalah sudut deviasi didekat/sekitar aliran dasar sungai dari arah sumbu x yang ditunjukkan dengan persamaan:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{v_b}{u_b} \right) \dots \dots \dots (62)$$

μ_s adalah koefisien gesek statis, θ_x dan θ_y secara berurutan adalah kecenderungan dasar sungai pada arah x dan y. Kecenderungan ini dievaluasi berdasarkan persamaan:

$$\theta_x = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right), \theta_y = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \dots \dots \dots (63)$$

$q_{b\xi k}$ dan $q_{b\eta k}$ secara berurutan adalah *bed load* dari ukuran kelas k pada arah ξ dan η , yang dihitung dengan persamaan:

$$q_{b\xi k} = \frac{\partial \xi}{\partial x} q_{bxk} + \frac{\partial \xi}{\partial y} q_{byk}, \quad q_{b\eta k} = \frac{\partial \eta}{\partial x} q_{bxk} + \frac{\partial \eta}{\partial y} q_{byk} \dots \dots \dots (64)$$

q_{bxk} dan q_{byk} secara berurutan adalah *bed load* dari ukuran kelas k pada arah x dan y yang dihitung berdasarkan persamaan:

$$q_{bxk} = q_{bk} \cos \beta_k, \quad q_{byk} = q_{bk} \sin \beta_k \dots \dots \dots (65)$$

Kemiringan dasar sungai sungai lokal sepanjang arah *bed load* dengan diameter rerata sedimen (θ) didapatkan berdasarkan persamaan:

$$\sin \theta = \cos \beta_m \sin \theta_x + \sin \beta_m \sin \theta_y \dots \dots \dots (66)$$

Dengan β_m adalah sudut deviasi/penyimpangan dari *bed load* dengan diameter rerata untuk arah sumbu x. Sudut deviasi dari *bed load* dengan ukuran k untuk arah x (β_k), yang bergantung pada aliran di sekitar dasar sungai dan kecenderungan/condong ke dasar, dihitung dengan:

$$\tan\beta_k = \frac{\sin\alpha - \Pi\theta_y\left(\frac{u_*^2}{u_*^2}\right)\tan\theta_y}{\cos\alpha - \Pi\theta_x\left(\frac{u_*^2}{u_*^2}\right)\tan\theta_x} \dots\dots\dots(67)$$

$$\Pi = K_{ld} + 1/u_s \dots\dots\dots(68)$$

$$\Theta_y = \frac{\partial}{1 + \tan^2\theta_x + \tan^2\theta_y}, \quad \Theta_y = \Theta_y + \frac{\rho}{\rho_x - \rho} \cos^2\theta_x \dots\dots\dots(69)$$

Dengan, $K_{ld}(=0,85)$ adalah rasio gaya angkat untuk gaya gesek.

c. Perhitungan kecepatan di sekitar dasar sungai

Kecepatan aliran di sekitar dasar sungai dievaluasi menggunakan radius/jari-jari lengkung dari garis/batas sungai berdasarkan persamaan:

$$u_b = u_{bs}\cos\alpha_s - v_{bs}\sin\alpha_s, \quad v_b = u_{bs}\sin\alpha_s + v_{bs}\cos\alpha \dots\dots\dots(70)$$

$$u_{bs} = 8.5u_*, \quad V_{bs} = \frac{h}{r} u_{bs} \dots\dots\dots(71)$$

Dengan, u_b dan v_b secara berurutan menunjukkan kecepatan di dekat permukaan dasar sungi sepanjang koordinat x dan y. $\alpha_s = \arctan(v/u)$, N_ϕ sebesar 7,0 dan r jari-jari lengkung dari garis/batas sungai yang didapatkan dari kedalaman digabungkan dengan bidang aliran.

d. Jari-jari lengkung dari garis/batas sungai

Jari-jari lengkung dari garis/batas sungai r dihitung dengan menggunakan hubungan persamaan berikut:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots(72)$$

e. *Suspended load* / beban sedimen yang tersuspensi

Pengguna dapat memilih persamaan dari Lane & Kalinske atau persamaan dari Itakura dan Kishi. Konsentrasi keseimbangan dari *suspended load* pada ketinggian referensi (c_{sbek}) dari persamaan Lane & Kalinske menggunakan persamaan:

$$c_{sbek} = 5.55 \left(\frac{1}{2} \frac{u_x}{w_{fk}} \exp \left(-\frac{W_{fk}}{u_x} \right) \right)^{1.61} f_{bk} r_b \quad (\text{Unit: ppm}) \dots \dots \dots (73)$$

Ketika konsentrasi dari distribusi arah vertikal pada sedimen tersuspensi diasumsikan sebagai distribusi eksponen (uraian distribusi), hubungan antara konsentrasi suspensi pada kedalaman rerata (c_{sk}) dan konsentrasi tersuspensi dari sedimen dengan kelas ukuran k pada tingkat referensi (c_{sbk}) dihitung dengan persamaan:

$$c_{sk} = \frac{C_{sbk}}{\beta_{sk}} (1 - e^{(-\beta_{sk})}) \dots \dots \dots (74)$$

$$\beta_{sk} = \frac{w_{fk} h}{D_h} \dots \dots \dots (75)$$

Dengan, D_h adalah koefisien penyebaran/dispersi pada arah vertikal. Untuk penyederhanaan, ε digunakan sebagai D_h . Kecepatan pengendapan dari sedimen yang tersuspensi (w_{fk}) diestimasi dengan menggunakan persamaan:

$$W_{fk} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \frac{36v^2}{(\frac{\rho_s}{\rho}-1)gd_k^3} - \sqrt{\frac{36v^2}{(\frac{\rho_s}{\rho}-1)gd_k^3}} \right) \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho}-1\right)gd_k} \dots \dots \dots (76)$$

Keseimbangan konsentrasi dari *suspended load* pada tinggi referensi (c_{sbck}) dari persamaan Itakura dan Kishi dihitung sebagai berikut:

$$q_{su} = p_k^* K \left[a_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{gd}{\sqrt{\tau_*}} \Omega - w \right] \dots \dots \dots (77)$$

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \cdot \frac{\int_{\alpha}^{\infty} \varepsilon \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp[-\varepsilon^2] d\varepsilon}{\int_{\alpha}^{\infty} \varepsilon \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp[-\varepsilon^2] d\varepsilon} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_o} - 1 \dots \dots \dots (78)$$

$$\alpha' = \frac{B_*}{\tau_*} - \frac{1}{\eta_o}, \eta_o = 0.5, \alpha_* = 0.14, K=0.008 \dots \dots \dots (79)$$

Dengan, q_{su} adalah beban sedimen tersuspensi dari dasar sungai per unit area, w_f adalah kecepatan pengendapan dari *suspended load* yang menggunakan persamaan dari Rubey. B^* adalah koefisien konversi dengan nilai yang bisa digunakan sebesar $B^*=0,143$.

f. Persamaan transport sedimen tersuspensi

Kedalaman rerata konsentrasi tersuspensi pada ukuran kelas k dievaluasi dengan rangkaian persamaan dari sedimen tersuspensi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h C_{s k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(U \frac{h C_{s k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{h C_{s k}}{J} \right) = \frac{1}{J} [W_{f k} (C_{s b e k} - C_{s b k})] \\ & + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{J} \left(D_x \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial C_{s k}}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(D_x \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + D_y \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial C_{s k}}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (80)$$

Dengan D_x dan D_y secara berurutan adalah koefisien dispersi/penyebaran dalam arah x dan y (untuk penyederhanaan disini maka $D_x = D_y = \varepsilon$).

g. Persamaan continuum (rangkaiannya) sedimen

Persamaan continuum (kesatuan rangkaian) sedimen untuk bidang dua dimensi arah horizontal dalam sistem koordinat kartesius adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (C_b E_b) + (1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \\ & \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{k=1}^n q_{b y k} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{k=1}^n q_{b x k} \right) \sum_{k=1}^n w_k (C_{s b e k} - C_{s b k}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (81)$$

Sedangkan persamaan continuum (kesatuan rangkaian) sedimen untuk bidang dua dimensi arah horizontal dalam sistem koordinat umum menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\left(\frac{C_b E_b}{J} \right) \right) + (1 - \lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sum_{k=1}^n \frac{q_{b \xi k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sum_{k=1}^n \frac{q_{b \eta k}}{J} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^n \frac{1}{J} w_k (C_{s b e k} - C_{s b k}) \right) = 0 \end{aligned}$$

$$E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \dots\dots\dots(82)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) = 0, E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \dots\dots\dots(83)$$

9. Pemodelan aliran sedimen tidak seragam (Non-uniform sediment)

Untuk menghasilkan perhitungan analisa numerik yang melibatkan ukuran distribusi sedimen, maka ukuran distribusi sedimen dibagi kedalam n ukuran kelas sedimen. Ukuran kelas sedimen menunjukkan ukuran sedimen yang dipresentasikan/digunakan d_k dan konsentrasi dari k sebagai ukuran kelas sedimen f_{bk} . Ukuran diameter rata-rata d_m ditunjukkan berdasarkan persamaan berikut:

$$D_m = \sum_{k=1}^n f_{mk} D_k \dots\dots\dots(84)$$

Dengan d_k menunjukkan ukuran sedimen dari kelas ukuran sedimen k. Persamaan kekekalan/konservasi massa (*mass conservation equation*) dari setiap ukuran kelas sedimen dalam lapisan pertukaran dan lapisan deposisi/pengendapan adalah berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{C_b E_b f_{bk}}{J} \right) + (1 - \lambda) F_{bk} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Z_b}{J} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{b\xi k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{b\eta k}}{J} \right) + \frac{1}{J} w_k (C_{sbek} - C_{sbk}) \right) = 0$$

$$F_{bk} = F_{d1k}, \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0, E_{sd} \geq E_{be} \frac{C_b}{1 - \lambda}$$

$$F_{bk} = f_c, \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0, E_{sd} \leq E_{be} \frac{C_b}{1 - \lambda}$$

$$F_{bk} = f_{bk}, \frac{\partial z_b}{\partial t} \geq 0 \dots\dots\dots(85)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E_{d1} f_{d1k}}{J} \right) - F_{dk} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E_{d1}}{J} \right) = 0$$

$$F_{dk} = F_{d1k}, \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0$$

$$F_{dk} = F_{bk}, \frac{\partial z_b}{\partial t} \geq 0 \dots\dots\dots(86)$$

Dengan f_{bk} adalah konsentrasi dari *bed load* pada kelas ukuran k dalam lapisan *bed load*, f_c adalah konsentrasi sedimen pada kelas ukuran k dalam lapisan sedimen kohesif, f_{mk} adalah konsentrasi sedimen pada kelas ukuran k dalam lapisan dasar (m th), c_b adalah konsentrasi kedalaman rerata dari *bed load*. E_{bc} adalah keseimbangan/kesetimbangan (*equilibrium*) dari ketebalan lapisan *bed load* yang dihitung berdasarkan persamaan:

$$\frac{E_b}{D_m} = \frac{1}{C_b \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_{*m} \dots\dots\dots(87)$$

Dengan d_m adalah diameter rerata dari *bed load*, Φ adalah sudut peletakan (pengendapan) dan $\tau_{\Phi m}$ adalah tegangan geser *non-dimensional* (besarnya tanpa batas) dari diameter rerata. E_{sd} adalah ketebalan lapisan sedimen pada dasar sedimen kohesif. E_b adalah ketebalan piasan *bed load* yang dihitung dengan persamaan:

$$E_b = E_{be}, E_{sd} \geq E_{be} \frac{C_b}{1-\lambda} \dots\dots\dots(88)$$

$$E_b = E_{sd} \frac{C_b}{1-\lambda}, E_{sd} \leq E_{be} \frac{C_b}{1-\lambda} \dots\dots\dots(89)$$

10. Permodelan Erosi Tepi Sungai

Erosi pada tepi sungai dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan sudut peletakan/pengendapan dari sedimen yang terjadi. Ketikan kemiringan dasar sungai lokal (pada daerah tertentu) nilainya lebih besar dari pada sudut pembentukkan (peletakan/pengendapan), sedimen pada grid numerik yang bernilai besar akan bergerak/berpindah ke grid numerik yang lebih kecil untuk menjaga kemiringan dasar sungai lokal tetap lebih kecil dari sudut pengendapan.

BAB IV METODE PENELITIAN

A. Studi Literatur

Sumber referensi yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini berasal dari jurnal-jurnal yang berkaitan dengan topik penelitian. Jurnal-jurnal yang berkaitan dengan topik penelitian ini yaitu pengaruh gerusan lokal terhadap perbedaan bentuk pilar, diambil dari penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan model fisik maupun model numerik. Selain jurnal, sumber referensi yang digunakan juga diambil dari beberapa tugas akhir mengenai gerusan lokal. Untuk studi literatur aplikasi yang digunakan berasal dari modul tata cara penggunaan *iRIC: Nays2DH 1.0*.

B. Pengumpulan Data

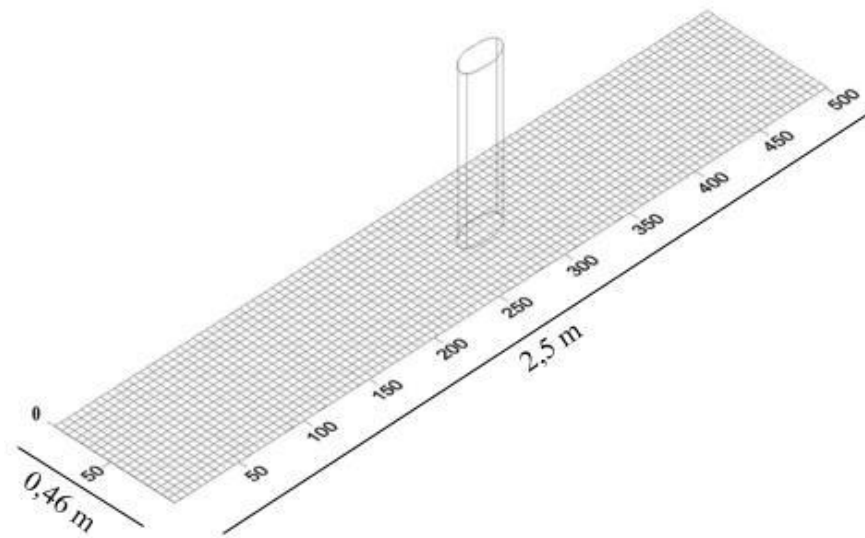
Untuk melakukan simulasi menggunakan *software iRIC* yang akan digunakan pada penelitian ini dibutuhkan beberapa data. Data yang akan digunakan pada *software iRIC* adalah data geometri saluran, debit, *slope*, penampang pilar, dan angka manning. Data-data yang akan digunakan tersebut didapatkan dari pemodelan fisik menggunakan *flume* yang dilakukan di Laboratorium Keairan dan Lingkungan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Data yang digunakan dalam model matematik berdasarkan 2 kondisi aliran pada pemodelan fisik, yaitu aliran subkritik dan aliran super kritik seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.1.

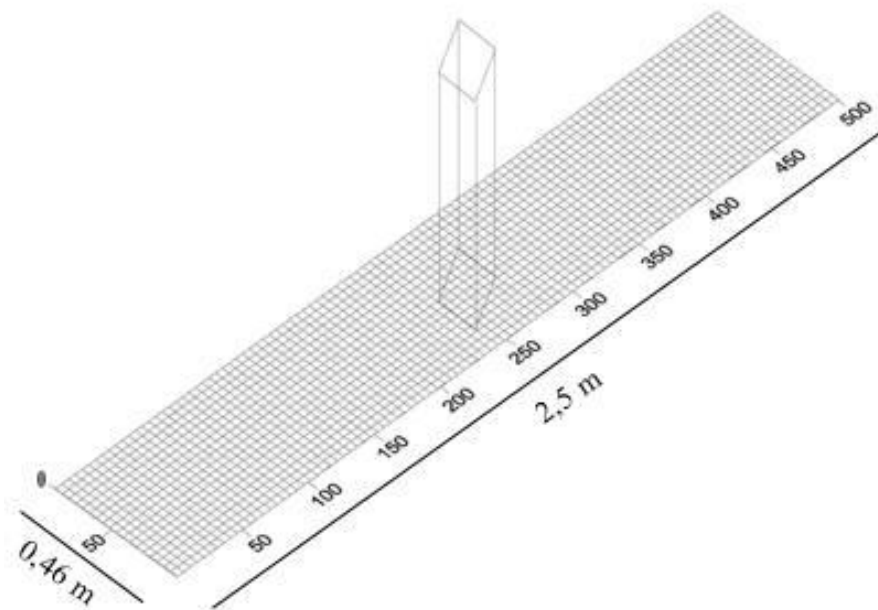
Tabel 4.1 Data kondisi aliran

Data	Subkritik	Superkritik
Debit (m^3/s)	0,0044	0,0052
Durasi waktu <i>runnig</i> (menit)	3	3
Panjang saluran	2,5	2,5
Lebar saluran	0,46	0,46
Kemiringan saluran (<i>slope</i>)	0,004	0,0358
Angka <i>manning</i>	0,0115	0,011514

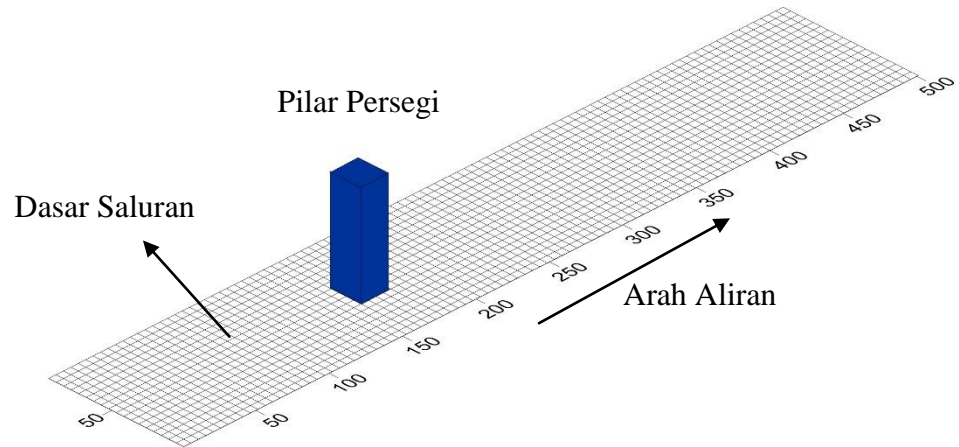
Pada *software iRIC* geometri saluran akan diubah kedalam bentuk *grid*. Pada penelitian kali ini *grid* yang akan digunakan ditentukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). *Grid* yang digunakan untuk lebar sebanyak 92 kotak sedangkan untuk panjang sebanyak 500 kotak, sehingga satu kotak *grid* mewakili 0,5 cm. Hal ini dilakukan untuk meminimalkan waktu pada saat melakukan *running*. Model simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



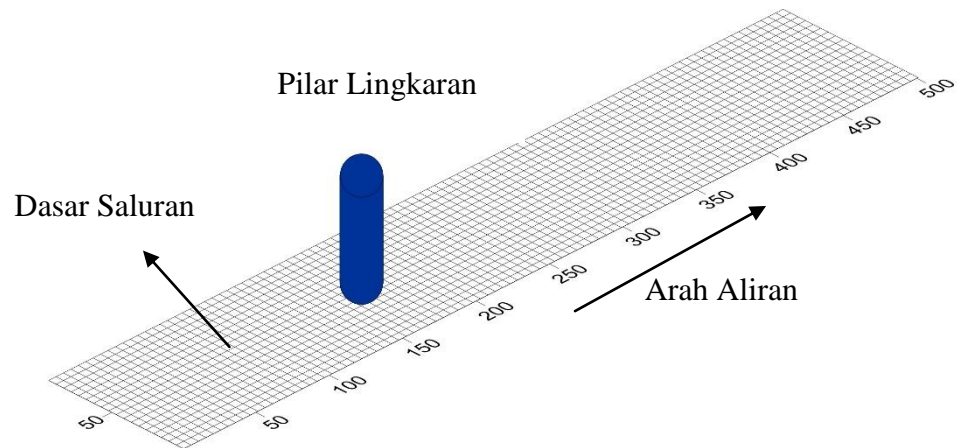
(a)



(b)



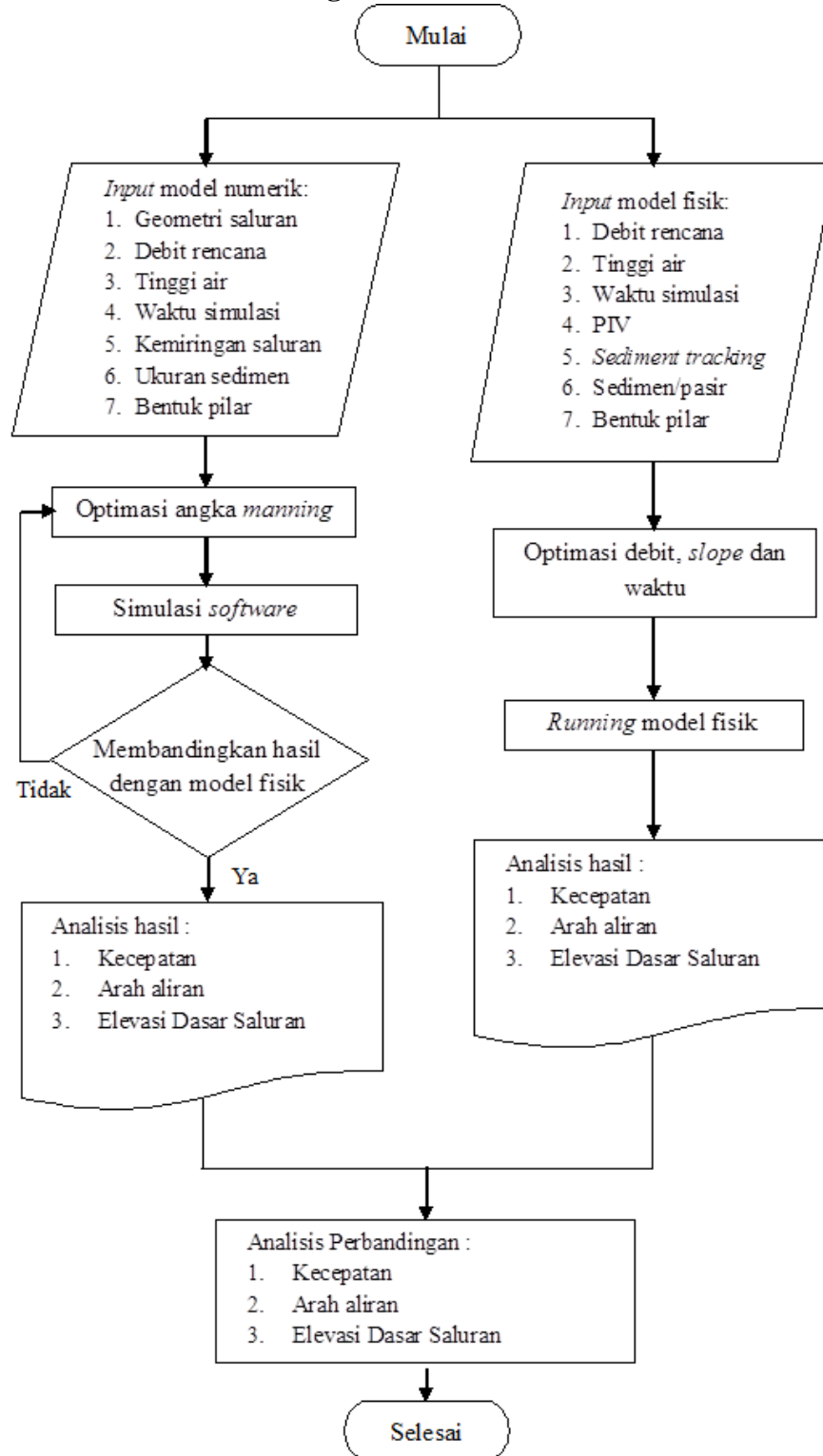
(c)



(d)

Gambar 4.1 Model simulasi *software iRIC:Nays2DH 1.0*, (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) pilar lingkaran

C. Bagan Alir Penelitian

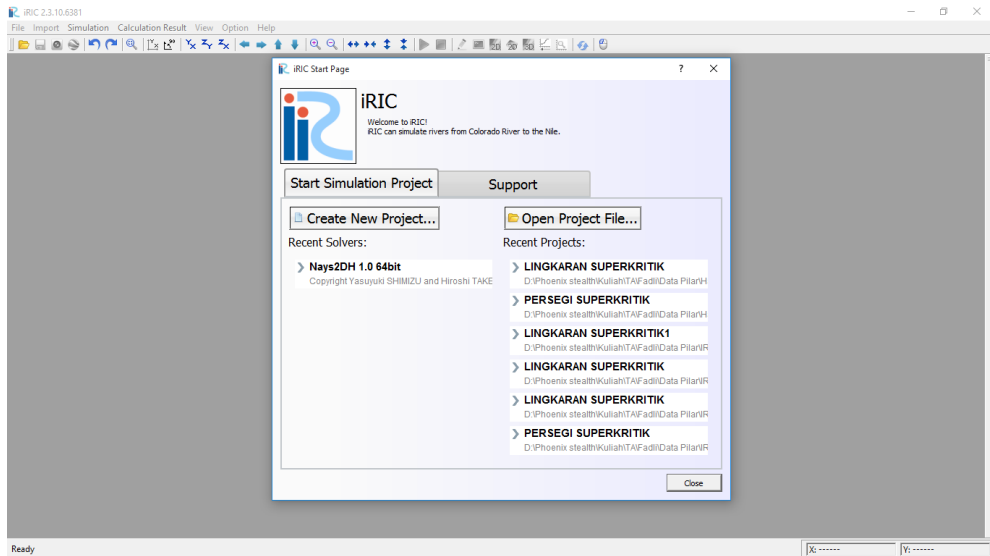


Gambar 4.2 Bagan alir penelitian

D. Langkah-Langkah Simulasi iRIC: Nays2DH 1.0

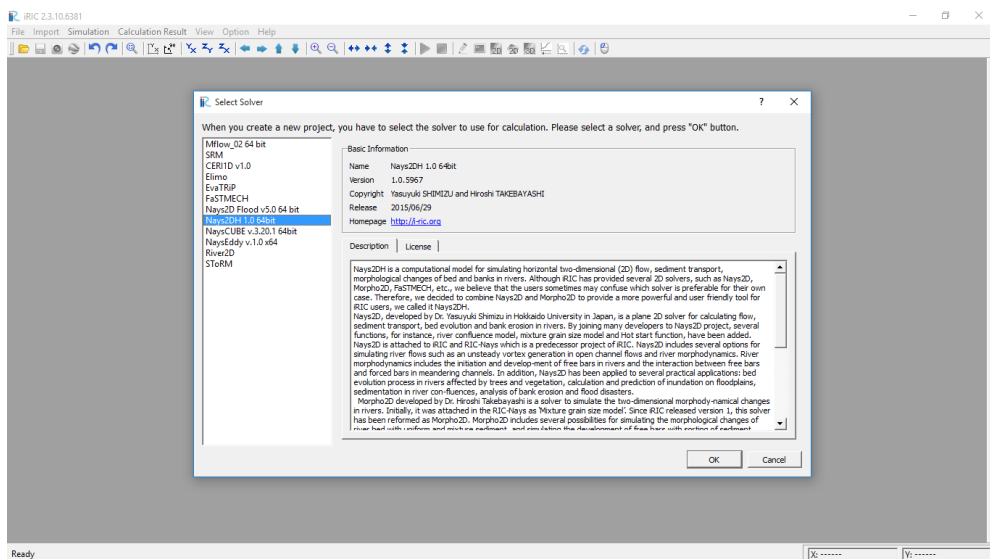
Langkah-langkah yang dilakukan untuk simulasi gerusan lokal yang terjadi pada pilar dengan bentuk lingkaran dan persegi dengan program *iRIC: Nays2D 1.0* adalah sebagai berikut:

1. Buka *software iRIC 2.3*, klik *Create New Project*.



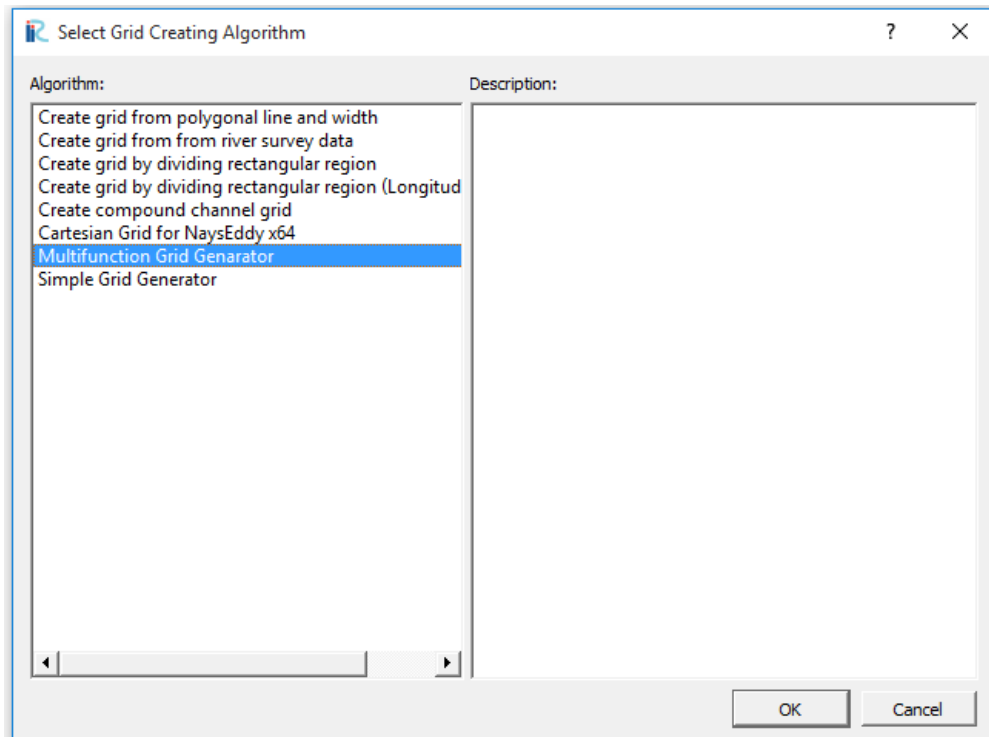
Gambar 4.3 Tampilan awal iRIC 2.3

2. Pilih *Nays2DH 1.0* untuk memodelkan gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar, lalu klik *OK*.



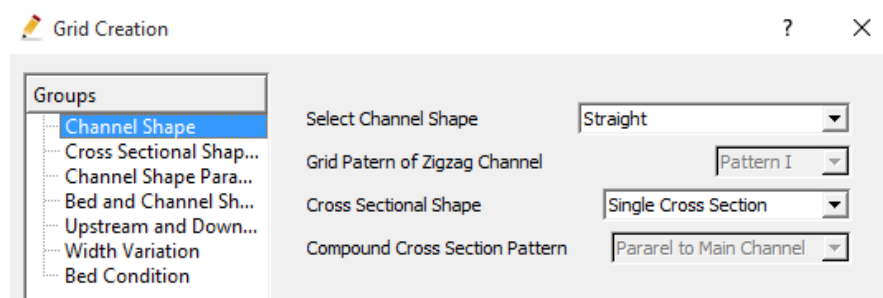
Gambar 4.4 Tampilan pemilihan solver

3. Untuk membuat geometri saluran pada *software iRIC:Nays2DH 1.0* pilih *toolbar Grid >>Select Algorithm to Create Grid*, setelah itu pilih *Multifunction Grid Generator*, lalu klik *OK*.



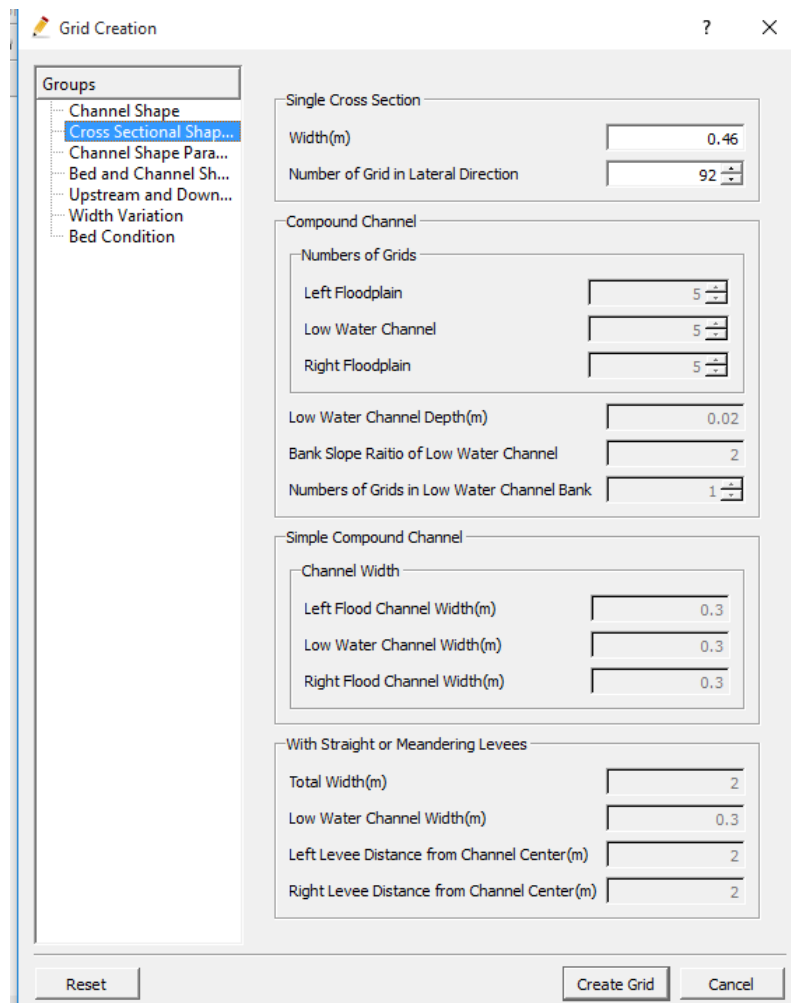
Gambar 4.5 Tampilan pilihan metode pembuatan grid

4. Pada Jendela *Grid Creation* ada beberapa menu pada kolom *Groups*. Pertama pilih menu *Channel Shape*. *Select Channel Shape* adalah pilihan bentuk saluran, karena saluran yang digunakan berbentuk lurus, maka pilih *Straight*, sedangkan *Cross Sectional Shape* adalah bentuk dari potongan melintang saluran, karena potongan melintang salurannya seragam maka pilih *Single Cross Section*.



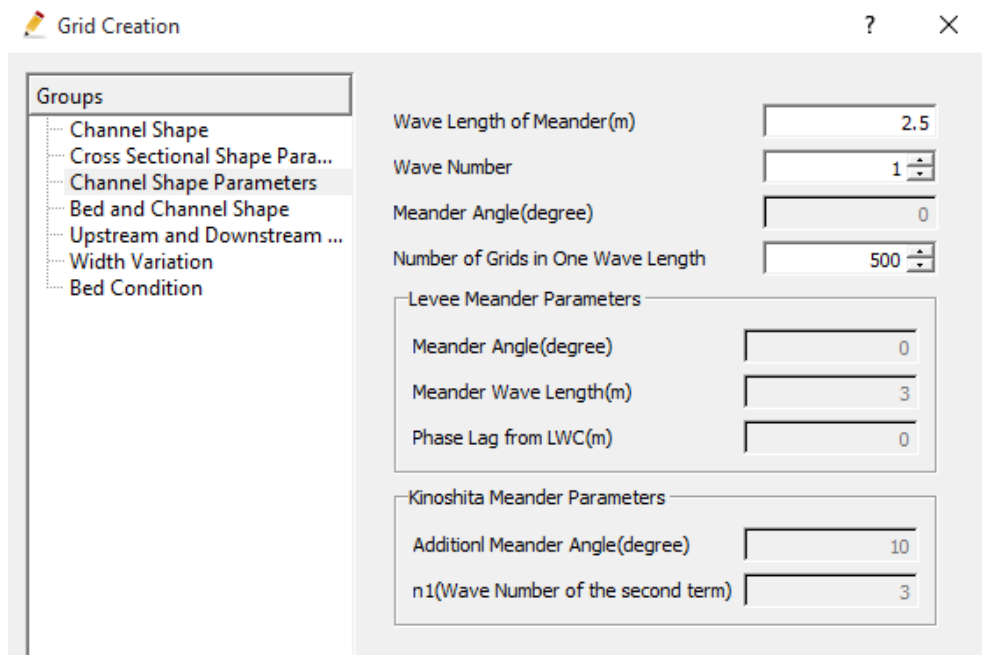
Gambar 4.6 Menu Channel Shape

5. Pada *Groups Cross Sectional Shape Parameters* terdapat pilihan *Width* yaitu lebar saluran dalam satuan meter, untuk lebar saluran masukkan angka 0.46, Selain itu ada pilihan *Number of Grid in Lateral Direction* yaitu jumlah grid pada arah lateral, pada pilihan ini masukkan angka 92.



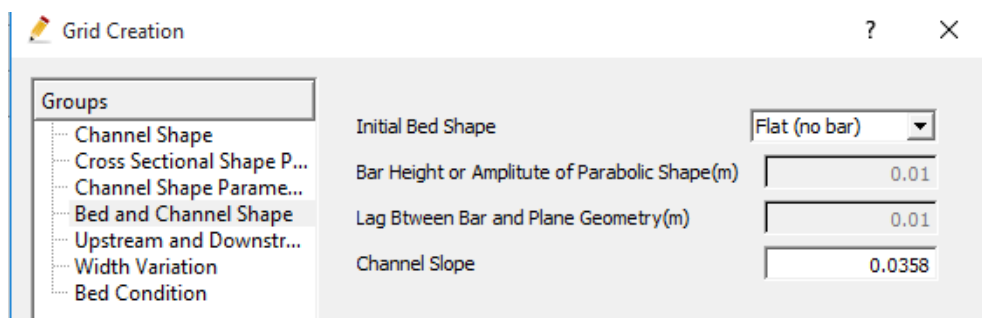
Gambar 4.7 Menu Cross Sectional Shape

6. Selanjutnya pada kolom *Groups* pilih *Channel Shape Parameters*. Pada *Channel Shape Parameters* terdapat pilihan *Wave Lenght of Meander* yaitu panjang saluran dalam satuan meter. Untuk panjang saluran masukkan angka 2.5, sedangkan pada *Wave Number* dan *Number of Grids in One Wave Lenght* berturut-turut masukkan angka 1 dan 500.



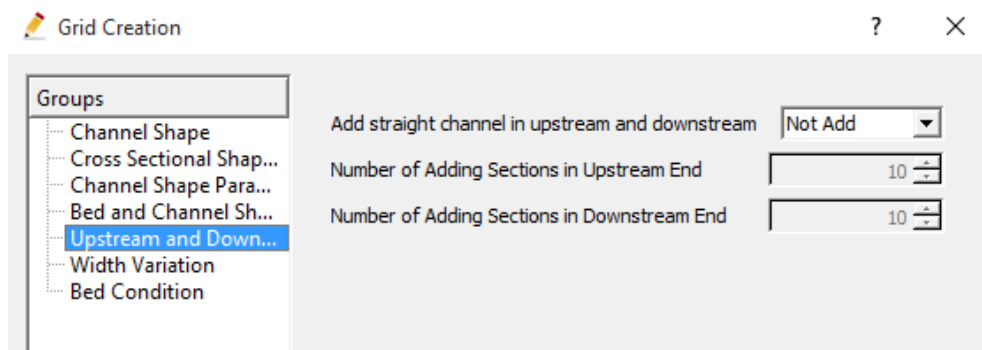
Gambar 4.8 Menu Channel Shape Parameters

7. Pada *Groups Bed and Channel Shape* terdapat pilihan *Initial Bed Shape* dan *Channel Slope* yaitu bentuk dasar saluran dan slope saluran. Pada *Initial Bed Shape* pilih *Flat (no bar)*, sedangkan pada *Channel slope* masukkan angka 0.0358.



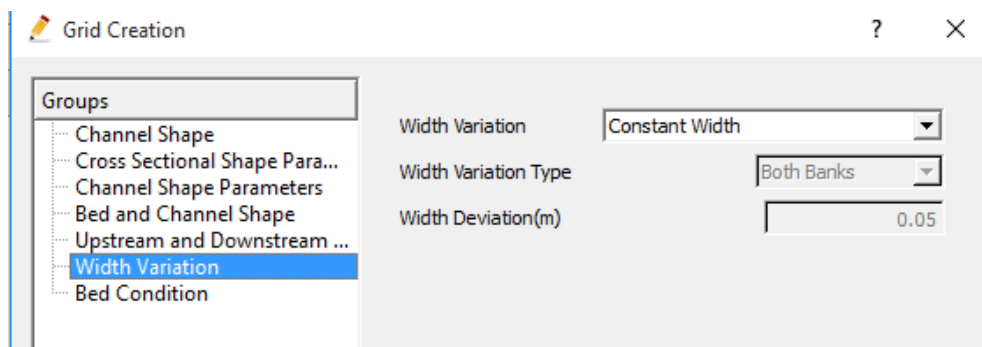
Gambar 4.9 Menu Bed and Channel Shape

8. Pada *Upstream and Downstream Condition*, pilih *Not Add* pada pilihan *Add straight channel in upstream dan downstream*.



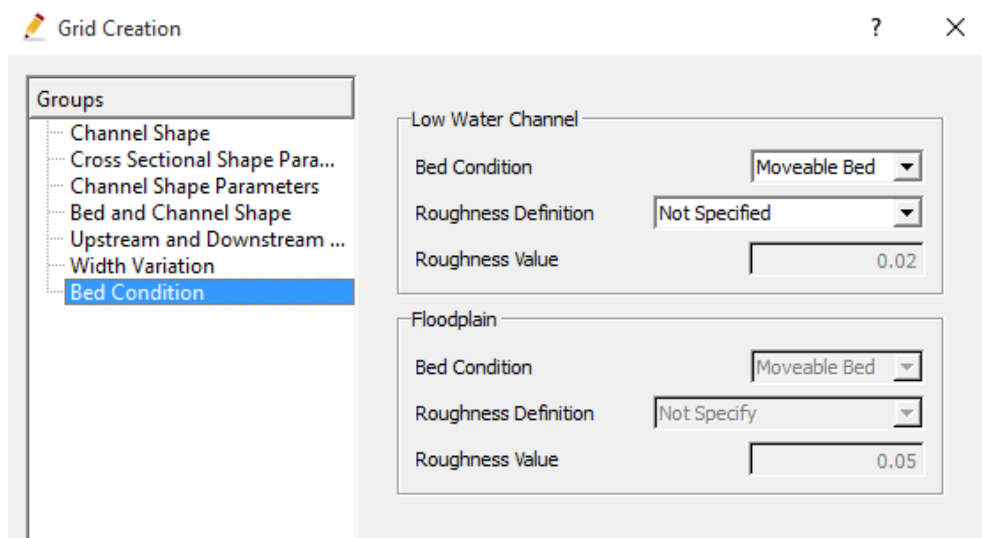
Gambar 4.10 Menu Upstream and Downstream Condition

9. Pada *Width Variation* pilih *Constant Width*.

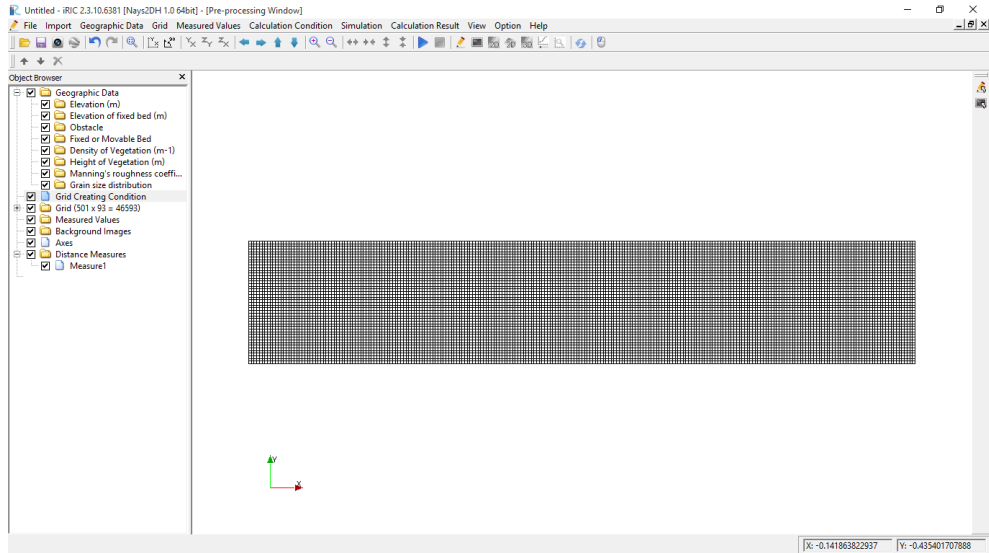


Gambar 4.11 Menu Width Variation

10. Selanjutnya, pada kolom *Groups* pilih *Bed Condition*. Pada pilihan *Bed Condition* pilih *Movable Bed*, sedangkan pada *Roughness Definition* pilih *Not Specified*. Lalu klik *Create Grid*.

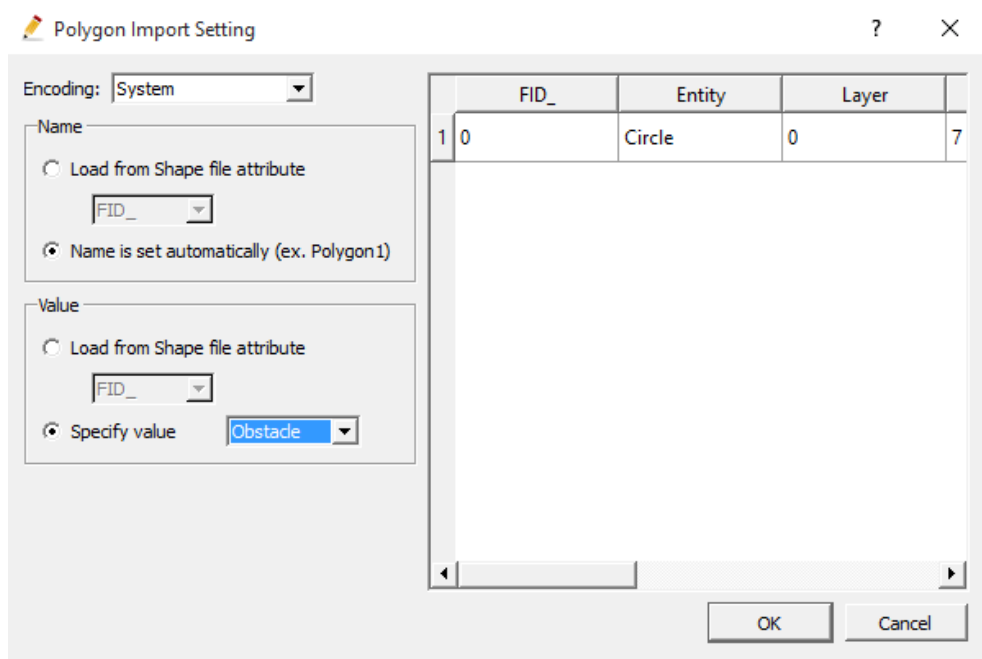


Gambar 4.12 Menu Bed Condition

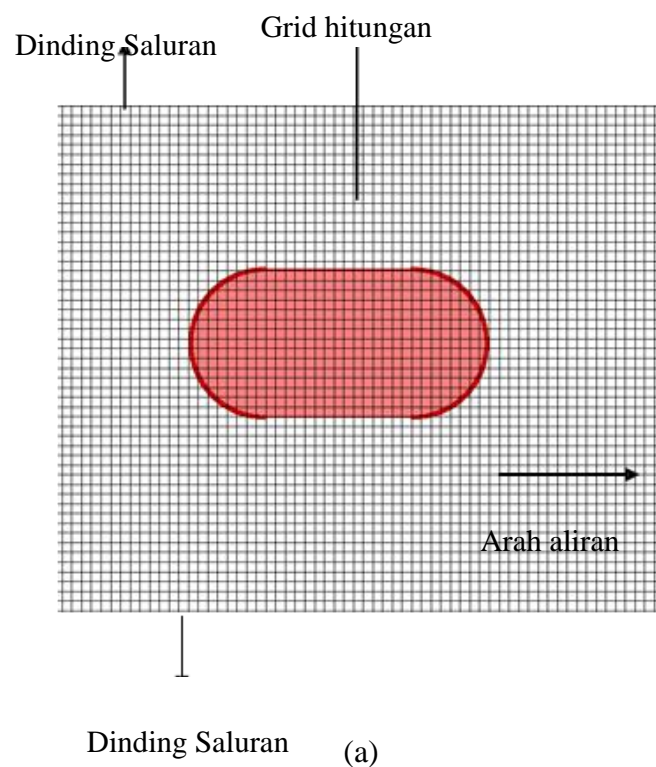


Gambar 4.13 Hasil setelah grid dibuat

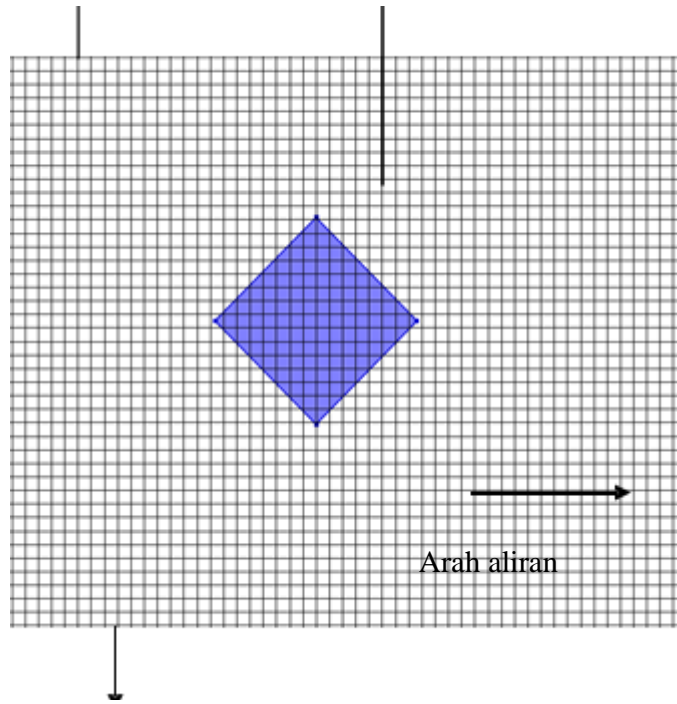
11. Untuk memasukkan pilar, pada kolom *Object Browser* klik kanan pada *obstacle* pilih *import*. Kemudian pilih folder dimana *file* pilar disimpan, lalu klik *open*. Pada *Polygon Import Setting* pada kolom *Name* pilih *Name is set automatically* (ex. *Polygon1*) dan pada kolom *Value* klik *specify value* pilih *Obstacle*. Kemudian klik *OK*.



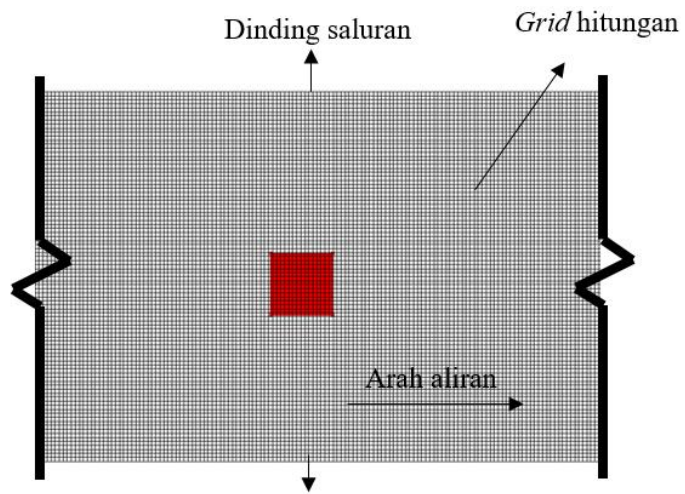
Gambar 4.14 Tampilan *import obstacle*



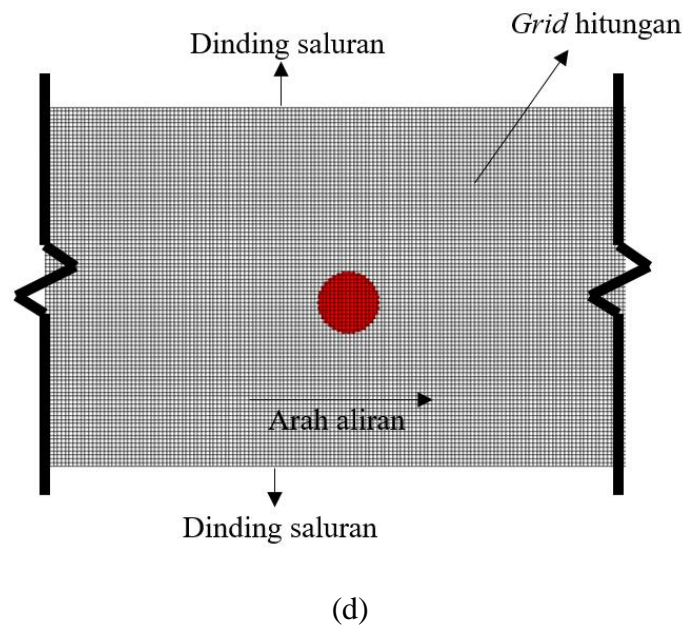
Dinding Saluran Grid hitungan



Dinding Saluran (b)

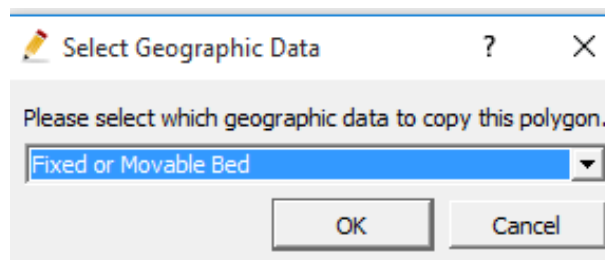


(c)

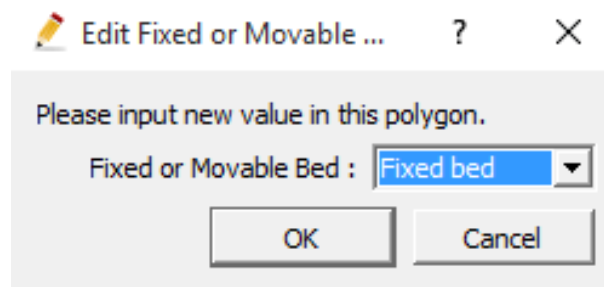


Gambar 4.15 Hasil input (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) pilar lingkaran

12. Untuk membuat dasar pilar tersebut tidak berubah selama proses *running*. Klik kanan pada pilar yang sudah dibuat, kemudian pilih *Copy*, lalu pilih *Fixed or Movable Bed*, klik *OK*. Selanjutnya pilih *Fixed bed* dan klik *OK*.

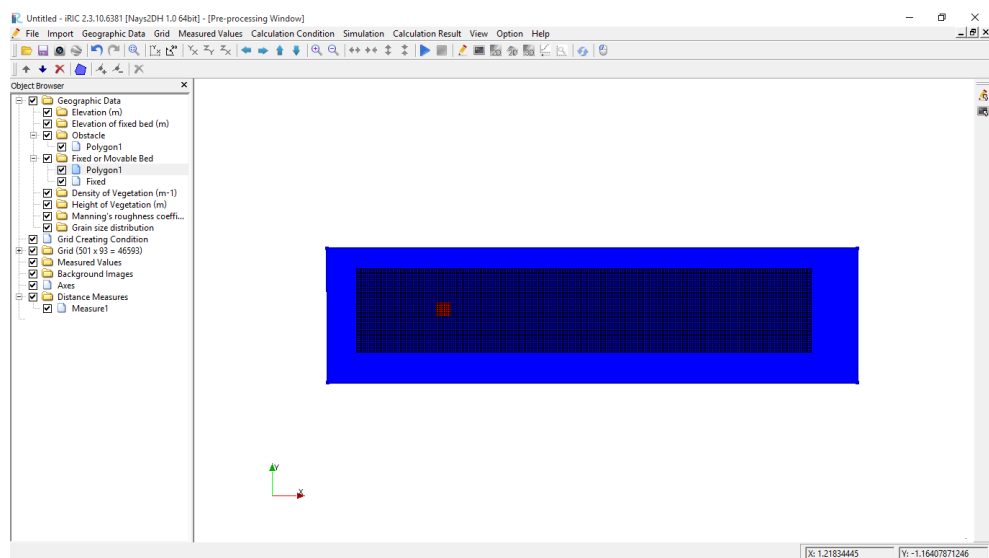


Gambar 4.16 Tampilan copy obstacle



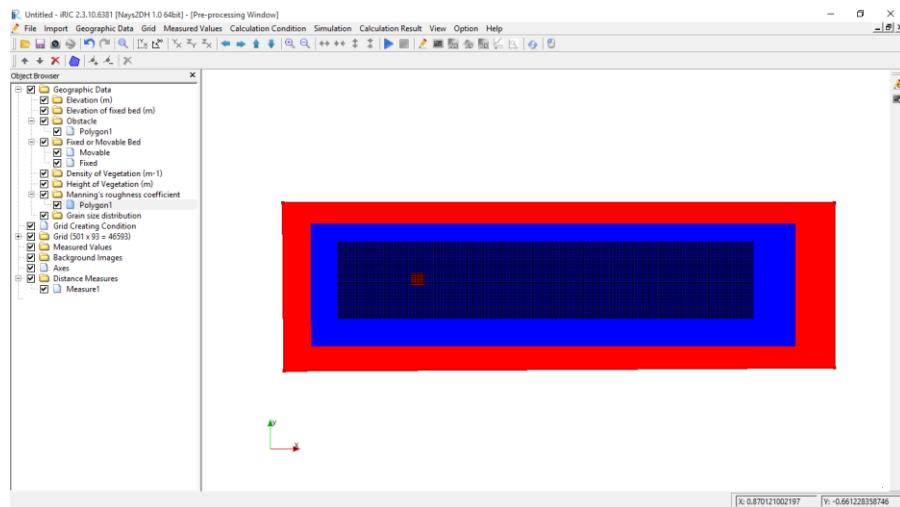
Gambar 4.17 Pilihan polygon value

13. Untuk membuat dasar saluran berdeformasi selama proses *running* klik kanan pada *Fixed or Movable Bed*, kemudian pilih *Add >>Polygon*. Selanjutnya gambar *Polygon* mengelilingi saluran. Setelah selesai pilih *Movable Bed*.



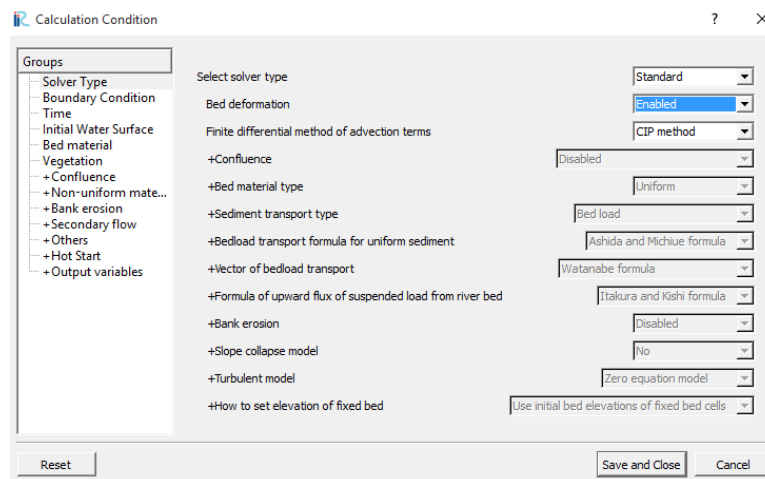
Gambar 4.18 Tampilan setelah ditambahkan polygon

14. Untuk menentukan koefisien *Manning* pada dasar saluran. Klik kanan pada *Manning's roughness coefficient*, kemudian pilih *Add >>Polygon*. Kemudian buat *Polygon* yang mencakup seluruh saluran, lalu masukkan angka koefisien *Manning* sebesar 0.0115.



Gambar 4.19 Tampilan setelah ditambahkan angka manning

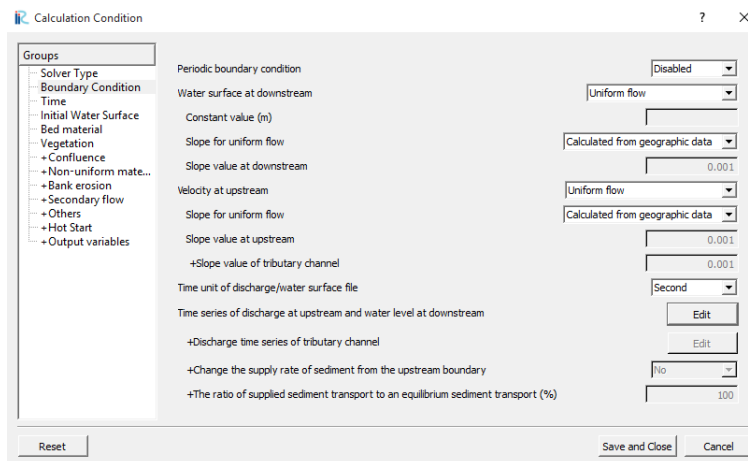
15. Setelah itu pilih menu *Calculation Condition* >>*Setting*, untuk mengatur kondisi saluran saat dilakukan *running*.
16. Pada kolom *Groups* terdapat beberapa pilihan, pertama pilih *Solver Type*, yaitu tipe pemecahan masalah yang akan dipilih. Pada *Bed deformation* ganti dengan *Enable*.



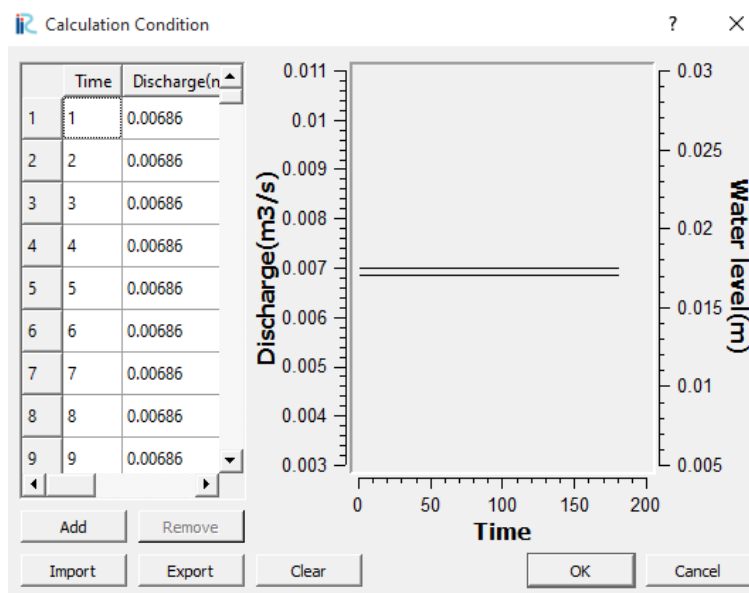
Gambar 4.20 Tampilan Solver Type

17. *Boundary Condition* merupakan pengaturan kondisi pada saluran, untuk memasukkan debit klik *Edit* pada *Time series of discharge at upstream and*

water level at downstream. Selanjutnya klik *import* dan pilih tempat penyimpanan debit yang sudah dibuat sebelumnya.

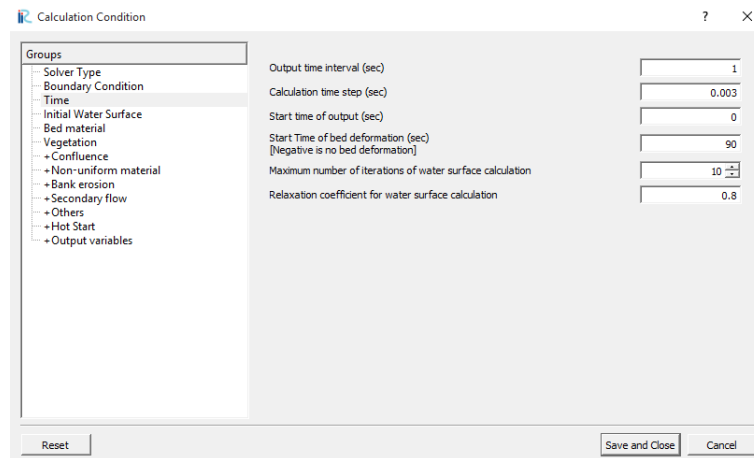


Gambar 4.21 Menu Boundary Condition



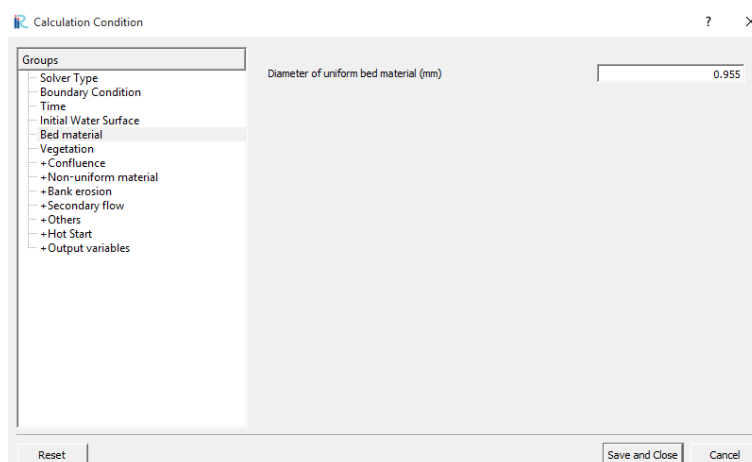
Gambar 4.22 Tampilan untuk memasukkan debit

18. Menu *Time* adalah menu untuk mengatur waktu *running*. *Output time interval* adalah interval waktu yang akan dimunculkan saat *running*, *Calculate time step* adalah langkah waktu kalkulasi yang akan digunakan, *Start time of output* adalah waktu awal *running*. Sedangkan *Start time of bed deformation* adalah waktu mulai terjadinya deformasi.



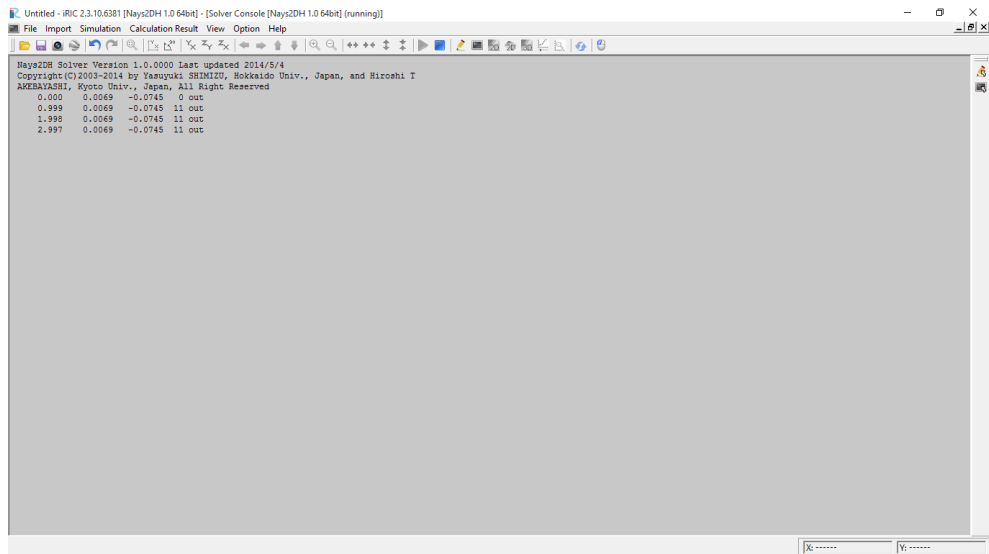
Gambar 4.23 Tampilan menu Time

19. Menu *Bed Material* adalah menu untuk memasukkan diameter butiran dasar saluran, pada penelitian ini menggunakan d50 dari gradasi butiran dasar saluran yaitu 0,955 mm.

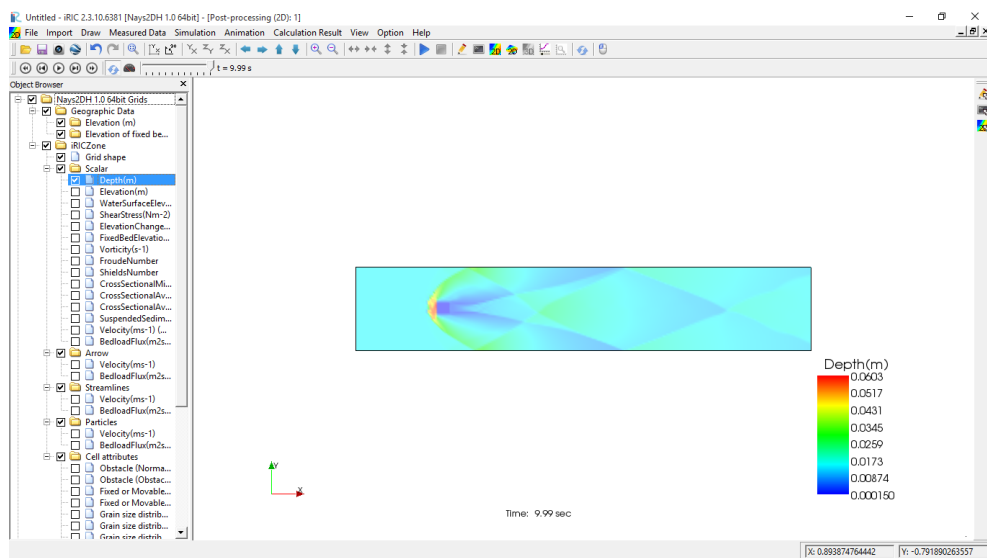


Gambar 4.24 Tampilan menu Bed Material

20. Setelah data dimasukkan, langkah selanjutnya adalah melakukan *running* dengan cara klik menu *Simulation >>Run* atau dengan menggunakan *Ctrl+R*.



Gambar 4.25 Tampilan running iRIC: Nays2DH



Gambar 4.26 Tampilan akhir setelah running

Setelah di-*running* banyak hasil yang bisa dilihat, seperti kecepatan (*velocity*), elevasi, tinggi muka air, *froude number*, dan arah aliran (*arrow velocity*). Untuk pembahasan lebih lanjut dapat dilihat pada bab hasil dan pembahasan.

E. Skenario Running

Skenario *running* adalah alur dari sebuah kasus yang ada pada simulasi yang dijalankan. Adapun skenario *running* dari penelitian tertampil pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Skenario running untuk aliran subkritis

Skenario	Jenis aliran	Debit (m ³ /s)	Koef. Manning	Slope	Diameter Material dasar (mm)	Bentuk pilar
A	Aliran seragam (<i>Uniform flow</i>)	0,0044	0,011514	0,004	0,975	Kapsul (Gambar 4.15 (a))
B	Aliran seragam (<i>Uniform flow</i>)	0,0044	0,011514	0,004	0,975	Tajam (Gambar 4.15 (b))

Tabel 4.3 Skenario running untuk aliran superkritis

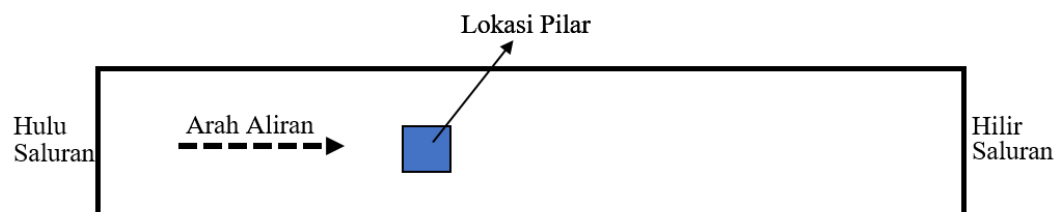
Skenario	Jenis aliran	Debit (m ³ /s)	Koef. Manning	Slope	Diameter Material dasar (mm)	Bentuk pilar
A	Aliran seragam (<i>Uniform flow</i>)	0,0052	0,011514	0,0358	0,955	Persegi (Gambar 4.15 (c))
B	Aliran seragam (<i>Uniform flow</i>)	0,0052	0,011514	0,0358	0,955	Lingkaran (Gambar 4.15 (d))

Simulasi ini menggunakan jenis aliran seragam (*uniform flow*) dan *slope* 0,0358. Sedangkan untuk angka *manning* dan diameter dasar saluran berturut-turut sebesar 0,011514 dan 0,955 mm.

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Penelitian

Penelitian ini dimodelkan dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* yang dibuat oleh Dr. Yasuyuki Shimizu dan Hiroshi Takebayashi di Hokkaido University, Jepang. *Iric: Nays2DH 1.0* adalah model komputasi untuk mensimulasikan aliran, transport sedimen, dan perubahan morfologi dari kedalaman dasar dan erosi di sungai secara horizontal 2 dimensi (2D). Selain itu, *iRIC: Nays2DH 1.0* merupakan perangkat yang bisa mensimulasikan gerusan yang terjadi pada sekitar pilar jembatan. Pada penelitian ini pemodelan dilakukan dengan aliran seragam (*uniform flow*), dimana berbagai variabel aliran seperti kedalaman tampang basah (h), kecepatan (v), dan debit (Q) di sepanjang aliran tidak berubah terhadap waktu. Debit yang digunakan sebesar $0,0052 \text{ m}^3/\text{s}$ untuk aliran superkritik dan $0,0044$ untuk aliran subkritik dengan waktu *running* selama 3 menit. Penampang saluran yang ditinjau memiliki lebar saluran $0,46 \text{ m}$ dan panjang saluran $2,5 \text{ m}$ seperti pada Gambar 5.1.



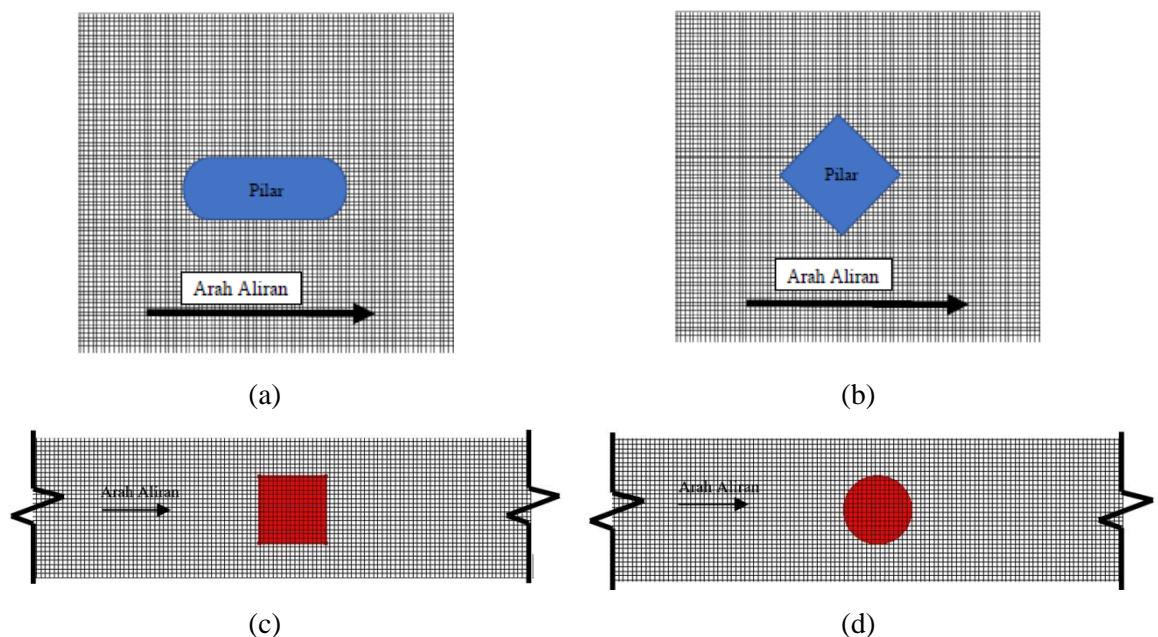
Gambar 5.1 Penampang saluran pada simulasi *software iRIC:Nays2DH 1.0*

Penampang memiliki 2 kondisi, yaitu yang pertama dengan *slope* sebesar $0,0358$, serta angka *Manning* sebesar $0,011514$. Setelah dilakukan *running* simulasi pada saluran tersebut, saluran tersebut termasuk kedalam aliran superkritik karena memiliki bilangan *froude* (Fr) > 1 . Aliran superkritik adalah aliran yang memiliki kecepatan aliran relatif cepat dan kedalaman alirannya relatif lebih dangkal.

Kondisi yang kedua yaitu digunakan kemiringan saluran sebesar 0.004 dan memiliki angka Manning sebesar 0.0115 . setelah dilakukan simulasi pada saluran

tersebut, maka saluran tersebut memiliki karakteristik saluran dengan aliran subkritik yang mempunyai bilangan Froude < 1 . Aliran subkritik adalah aliran yang memiliki kecepatan yang rendah, memiliki permukaan air stabil dan biasanya mempunyai kedalaman yang lebih besar, yang merupakan gejala alami suatu aliran.

Pada simulasi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* saluran akan dibagi menjadi beberapa *grid*, semakin kecil *grid* yang digunakan pada saat simulasi maka data yang didapatkan akan semakin akurat. Pada penelitian ini setiap 0,5 cm akan diwakili oleh 1 *grid*, maka *grid* yang digunakan pada arah melintang sebanyak 92 *grid*, sedangkan pada arah memanjang sebanyak 500 *grid*. Pada tengah-tengah saluran terdapat halangan berupa pilar jembatan berbentuk persegi dan lingkaran dengan panjang sisi pilar persegi adalah 0,0762 m, sedangkan diameter pilar lingkaran adalah 0,0762 m seperti pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Bentuk pilar pada simulasi software *iRIC: Nays2DH 1.0*
bentuk (a) kapsul (b) tajam (c) persegi dan (d) lingkaran

B. Analisa Kecepatan Aliran

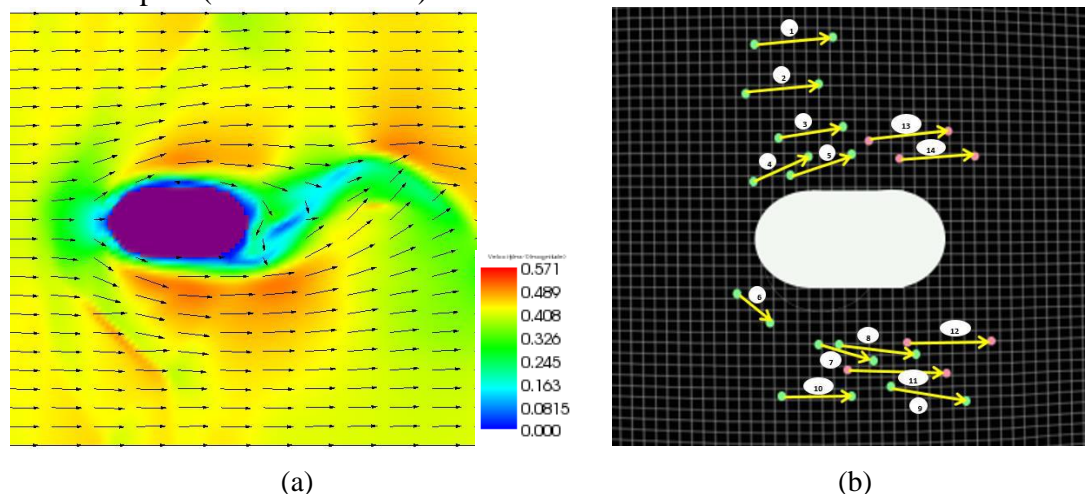
Kecepatan aliran setelah dilakukan simulasi mempunyai karakteristik yang berbeda pada setiap bentuk pilar. Kecepatan aliran akan berubah jika terdapat perubahan morfologi pada penampang saluran seperti adanya pilar jembatan yang

terdapat di tengah saluran. Selain adanya perubahan morfologi saluran, kecepatan aliran juga dipengaruhi oleh bentuk penampang dari pilar jembatan itu sendiri. Pada simulasi ini menggunakan dimensi saluran yang sama. Saluran tersebut memiliki panjang 2,5 m dan lebar 0,46 m, maka perubahan kecepatan yang terjadi diakibatkan oleh perbedaan bentuk penampang pilar yang berbeda.

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dengan bentuk penampang kapsul, tajam, persegi dan lingkaran didapatkan hasil kecepatan aliran seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3 (a) sampai dengan Gambar 5.6. (a). Kecepatan aliran pada saluran dari hasil simulasi *software iRIC: Nays2DH 1.0* digambarkan dengan skala warna dari yang terendah 0.00 ms⁻¹ yang digambarkan dengan warna biru sampai dengan kecepatan yang tertinggi yaitu 1.10 ms⁻¹ yang digambarkan oleh warna merah.

Pada pemodelan fisik kecepatan aliran diukur dengan bantuan *sediment tracking*. Dengan adanya *sediment tracking* maka dapat diketahui vektor kecepatan aliran dengan cara menghitung perpindahan partikel *sediment tracking*. Hasil simulasi model fisik dapat dilihat pada Gambar 5.3 (b) sampai dengan Gambar 5.6 (b). Besarnya kecepatan aliran dengan model fisik ditentukan melalui panjangnya vektor kecepatan, semakin panjang vektor kecepatannya maka kecepatan alirannya akan semakin besar. Vektor kecepatan aliran menunjukkan besarnya arah dan kecepatan yang terjadi sekitar pilar. Dengan adanya penghalang di tengah saluran berupa pilar jembatan maka saluran mengalami penyempitan dan membuat arah aliran menjadi berbelok dan terjadi perubahan kecepatan di sekitar pilar.

1. Pilar Kapsul (Aliran Subkritis)



Gambar 5. 3Kecepatan aliran pada pilar kapsul dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a)dan model fisik (b)

Pada pemodelan matematis (Gambar 5.3 (a)) perbedaan kecepatan dideskripsikan dengan warna, mulai dari kecepatan yang paling rendah yaitu 0.000 ms⁻¹ dideskripsikan dengan warna biru tua sampai kecepatan yang paling tinggi yaitu 0.570 ms⁻¹ dideskripsikan dengan warna merah tua. Kecepatan awal saluran berwarna hijau kekuningan terlihat di hulu saluran.

Nilai kecepatan pada pilar jembatan yang berbentuk kapsul untuk model matematis (Gambar 5.3 (a)), terjadi perlambatan kecepatan aliran diujung pilar yang hampir sama dengan bentuk pilar tajam pada arah hulu saluran. Perlambatan juga terjadi pada bagian ujung pilar kapsul pada arah hilir, tetapi perlambatan yang terjadi tidak sebesar dan sejauh yang terjadi pada pilar tajam. Hal ini terjadi karena pilar kapsul tidak mempunyai sudut yang tajam sehingga aliran yang menabrak pilar tidak mengalami perlambatan yang tinggi seperti yang terjadi pada pilar tajam. Selain itu, percepatan juga terjadi di sisi kanan dan kiri pilar jembatan sampai ke arah tebing saluran. Perubahan percepatan tetap didominasi oleh warna kuning, sedangkan percepatan tertinggi ditandai dengan warna kemerahan namun tidak sebesar yang terjadi pada pilar tajam.

Nilai kecepatan pada sekitar pilar kapsul untuk model fisik (Gambar 5.3 (b)) tertampil dalam Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Nilai kecepatan sekitar pilar kapsul (Aliran subkritik)

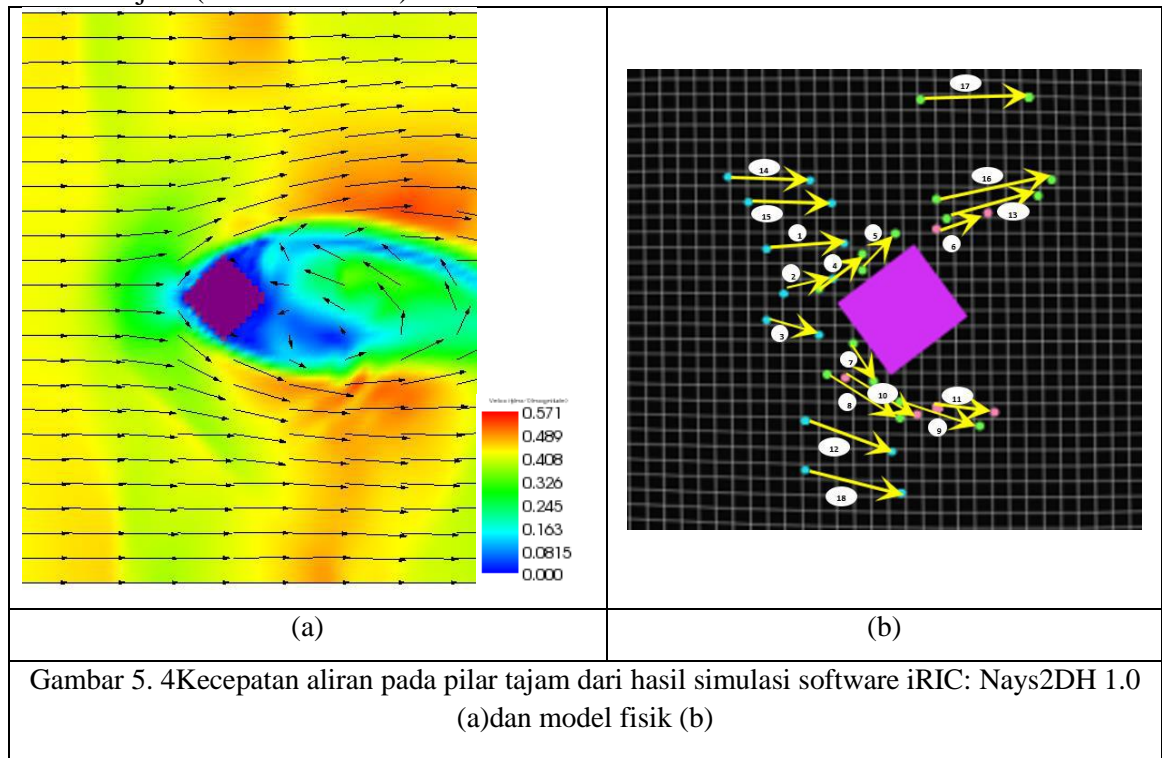
Titik	X	y	jarak x (cm)	jarak y(cm)	Perpindahan (cm)	Kecepatan (cm/s)	Kecepatan (m/s)																																																																																																																												
1	2	0	7	0,5	7,0178	49,4214	0,494																																																																																																																												
	9	0,5						2	1	0	7,5	0,5	7,5166	52,9341	0,529	8,5	0,5	3	4	0	5,5	1	5,5902	39,3674	0,394	9,5	1	4	2	0	5,5	2	5,8523	41,2137	0,412	7,5	2	5	5	0,5	5	2	5,3852	37,9237	0,379	10	2,5	6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249	3	2,5	7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6
2	1	0	7,5	0,5	7,5166	52,9341	0,529																																																																																																																												
	8,5	0,5						3	4	0	5,5	1	5,5902	39,3674	0,394	9,5	1	4	2	0	5,5	2	5,8523	41,2137	0,412	7,5	2	5	5	0,5	5	2	5,3852	37,9237	0,379	10	2,5	6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249	3	2,5	7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0				
3	4	0	5,5	1	5,5902	39,3674	0,394																																																																																																																												
	9,5	1						4	2	0	5,5	2	5,8523	41,2137	0,412	7,5	2	5	5	0,5	5	2	5,3852	37,9237	0,379	10	2,5	6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249	3	2,5	7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0														
4	2	0	5,5	2	5,8523	41,2137	0,412																																																																																																																												
	7,5	2						5	5	0,5	5	2	5,3852	37,9237	0,379	10	2,5	6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249	3	2,5	7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																								
5	5	0,5	5	2	5,3852	37,9237	0,379																																																																																																																												
	10	2,5						6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249	3	2,5	7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																		
6	0,5	0	2,5	2,5	3,5355	24,8981	0,249																																																																																																																												
	3	2,5						7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354	12	1	8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																												
7	7	0,5	5	0,5	5,0249	35,3869	0,354																																																																																																																												
	12	1						8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458	16,5	0,5	9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																						
8	10	0,5	6,5	0	6,5000	45,7746	0,458																																																																																																																												
	16,5	0,5						9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470	20,5	2	10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																
9	14	0,5	6,5	1,5	6,6708	46,9777	0,470																																																																																																																												
	20,5	2						10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	10	0	11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																										
10	4	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423																																																																																																																												
	10	0						11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565	18	0,5	12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																																				
11	10	0	8	0,5	8,0156	56,4480	0,565																																																																																																																												
	18	0,5						12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493	23	0,5	13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																																														
12	16	0,5	7	0	7,0000	49,2958	0,493																																																																																																																												
	23	0,5						13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463	18	1,5	14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																																																								
13	11,5	0,5	6,5	1	6,5765	46,3132	0,463																																																																																																																												
	18	1,5						14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423	20	0																																																																																																																		
14	14	0	6	0	6,0000	42,2535	0,423																																																																																																																												
	20	0																																																																																																																																	

Sumber : Hasil perhitungan, 2017

Tabel 5.1 menunjukkan besarnya vektor kecepatan pada pilar jembatan bentuk kapsul model fisik. Untuk membandingkan hasil kecepatan vektor model fisik dan matematik untuk pilar kapsul maka akan di tinjau beberapa titik sebagai acuan. Pada Gambar 5.3 (b) terlihat bahwa nomor vektor kecepatan 4,5, dan 6 pada hasil kecepatan vektor model fisik memiliki nilai kecepatan sebesar 0,412 m/s, 0,379 m/s, dan 0,249 m/s, sedangkan pada model matematik di dapatkan hasil 0,302 – 0,403 m/s

ditandai dengan warna hijau ke kuning. Jika dilihat nomor vektor 1 dan 10 pada hasil kecepatan vektor model fisik memiliki nilai kecepatan sebesar 0,494 m/s dan 0,423 m/s, sedangkan pada model matematik diperoleh hasil kecepatan vektor 0,436 – 0,470 m/s dan 0,436 m/s ditandai dengan warna kuning ke merah. Dan nilai vektor kecepatan tertinggi pada model fisik terjadi pada nomor vektor 11 dengan nilai kecepatan sebesar 0,565 m/s, sedangkan pada model matematik di dapatkan hasil vektor kecepatan sebesar 0,503 – 0,537 m/s di tandai dengan warna merah. Dengan demikian maka untuk vektor kecepatan model fisik dan matematik untuk jenis pilar jembatan bentuk kapsul terdapat perbedaan yang tidak terlalu besar.

2. Pilar tajam (aliran subkritik)



Kecepatan pada pilar jembatan bentuk tajam model matematik (Gambar 5.4 a)), terjadi perlambatan kecepatan aliran yang mengarah ke hulu saluran. Perlambatan tersebut ditandai dengan perubahan warna menjadi biru tua, walaupun jarak perubahan tersebut sangat pendek. Hal ini bisa terjadi karena aliran yang berasal dari hulu saluran menabrak pilar jembatan yang mengakibatkan kecepatan aliran menjadi lebih lambat. Selain itu, terjadi perlambatan kecepatan

pada bagian hilir disekitar pilar jembatan yang cukup jauh, hal ini disebabkan karena aliran yang seharusnya lurus menjadi berbelok arah kekanan atau kekiri setelah menabrak pilar jembatan yang mempunyai sudut di samping kanan dan kiri, sehingga aliran yang berada di balik pilar yang mempunyai sudut tersebut mengalami perlambatan kecepatan. Selain perlambatan kecepatan, terjadi juga percepatan pada bagian kiri dan kanan pilar jembatan sampai kearah tebing saluran. Terlihat warna kuning yang menunjukkan percepatan kecepatan yang mendominasi kecepatan aliran di sekitar kanan dan kiri pilar. Terdapat warna hijau hijau yang menjadi awal perlambatan kecepatan di depan sampai di sekitar kanan dan kiri pilar. Terdapat juga warna kemerahan di sekitar pilar yang menunjukkan terjadi penambahan kecepatan yang paling tinggi, sedangkan kecepatan tertinggi terjadi pada tebing sebelah kiri saluran yang ditandai dengan warna merah pekat. Terlihat jika perubahan percepatan menjadi lebih cepat atau lambat terjadi setelah aliran melewati pilar jembatan mengikuti pola aliran yang terjadi.

Nilai kecepatan pada sekitar tajam tajam untuk model fisik (Gambar 5.4 (b)) tertampil dalam Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Nilai kecepatan sekitar pilar tajam (Aliran subkritik)

Titik	x	Y	jarak x (cm)	jaraky (cm)	Perpindahan (cm)	Kecepatan (cm/s)	Kecepatan (m/s)
1	0,5	0	4,5	1	4,6098	33,4041	0,334
	5	1					
2	1,5	0,5	3	0	3,0000	21,7391	0,218
	4,5	0,5					
3	0,5	0,5	3	0,5	3,0414	22,0390	0,220
	3,5	1					
4	3,5	0	2,5	1	2,6926	19,5115	0,195
	6	1					
5	6	0	2	2,5	3,2016	23,1997	0,232
	8	2,5					
6	10,5	0,5	2,5	0	2,5000	18,1159	0,181
	13	0,5					
7	5,5	0	1,5	2	2,5000	18,1159	0,181
	7	2					

8	4	0	4	2,5	4,7170	34,1811	0,342
	8	2,5					
9	8	0,5	5	1,5	5,2202	37,8272	0,378
	13	2					
10	5	0	5,5	2	5,8523	42,4083	0,424
	10,5	2					
11	9	0	5	0	5,0000	36,2319	0,362
	14	0					
12	3	0	5	2	5,3852	39,0229	0,390
	8	2					
13	0	0,5	5,5	1,5	5,7009	41,3107	0,413
	5,5	2					
14	0,5	0	4,5	0	4,5000	32,6087	0,326
	5	0					
15	1	0,5	5,5	0,5	5,5227	40,0194	0,400
	6,5	1					
16	0,5	0	6,5	1	6,5765	47,6556	0,477
	7	1					
17	0	0	6	0,5	6,0208	43,6290	0,436
	6	0,5					
18	0	0	5	1,5	5,2202	37,8272	0,378
	5	1,5					

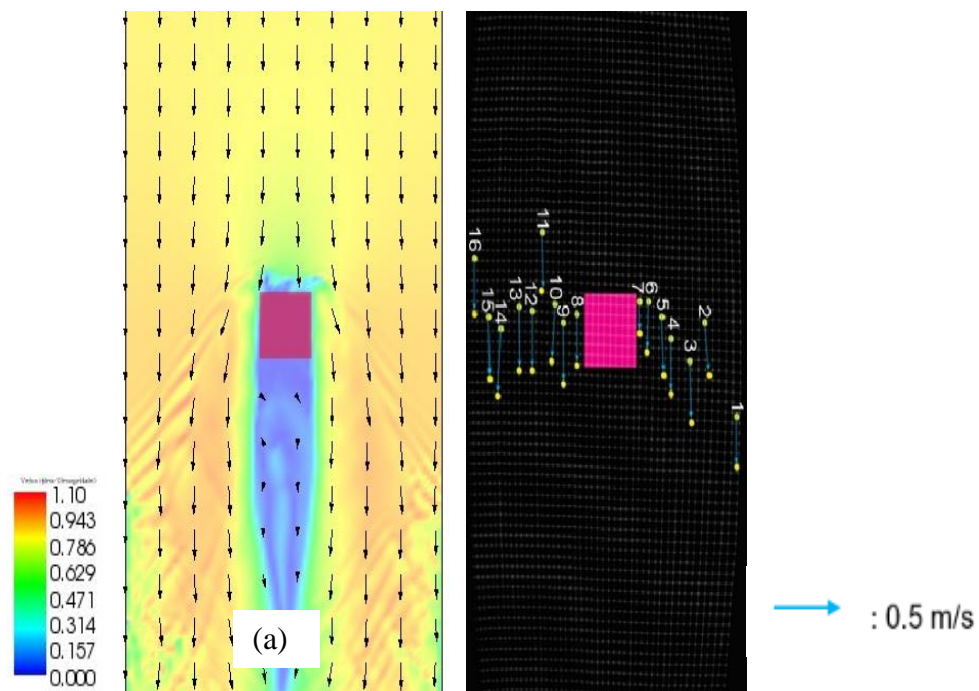
Sumber : Hasil perhitungan, 2017

Dari hasil analisis vektor kecepatan model fisik, terjadi perlambatan kecepatan di hulu sekitar pilar, seperti terlihat pada vektor nomor 2,3,4,5,7 secara berurutan bernilai 0,217 m/s, 0,22 m/s, 0,195 m/s, 0,232 m/s, 0,181 m/s. Jika dibandingkan dengan analisa menggunakan software iRIC : Nays2DH 1.0 terlihat pada Gambar 5.4 (b) juga terjadi perlambatan kecepatan aliran dimana ditandai dengan warna biru muda sampai hijau muda dengan kecepatan diantara 0,163-0,245 m/s. Jika dilihat pada vektor nomor 11 dan 13 didapatkan nilai kecepatan bernilai 0,362 m/s, 0,413 sedangkan pada model matematik di dapatkan nilai 0,326 – 0,367 m/s ditandai warna hijau muda. Dan nilai vektor kecepatan tertinggi pada analisa model fisik terjadi pada nomor 16 dengan nilai 0,477, sedangkan pada model matematik di dapat hasil 0,448 – 0,489 m/s ditandai dengan warna kuning ke merah-merahan.

Dengan demikian maka untuk vektor kecepatan model fisik dan matematik untuk jenis pilar jembatan bentuk tajam terdapat perbedaan yang tidak terlalu besar.

3. Pilar persegi (Aliran superkritik)

Perbedaan karakteristik kecepatan aliran pada saluran dengan pilar berbentuk persegi dari hasil simulasi *software iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisik dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Kecepatan aliran pada pilar persegi dari hasil simulasi *software iRIC: Nays2DH 1.0* (a) dan model fisik (b)

Pada Gambar 5.5 terlihat perbedaan karakteristik kecepatan aliran pada saluran dengan pilar berbentuk persegi dari hasil simulasi *software iRIC: Nays2DH 1.0* (a) dan model fisik (b).

Nilai kecepatan pada sekitar persegi kapsul untuk model fisik (Gambar 5.4 (b)) tertampil dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Nilai kecepatan sekitar pilar persegi (Aliran superkritik)

Titik	X	Y	Jarak x (cm)	Jarak y (cm)	Perpindahan (cm)	Kecepatan (cm/dtk)	Kecepatan (m/dtk)
1	1	1.5	5	0.1	5.0010	35.2183	0.3522

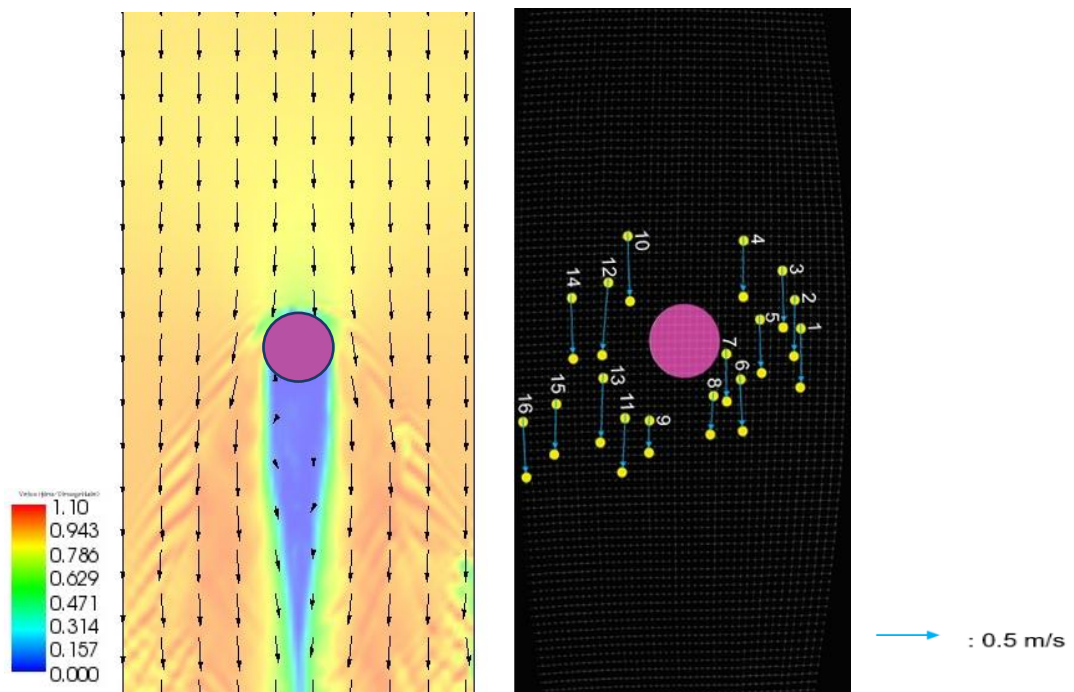
	6	1.6					
2	1	0.7	5	0.8	5.0636	35.6591	0.3566
	6	1.5					
3	1	0.7	6	0.3	6.0075	42.3063	0.4231
	7	1					
4	0.8	0.9	5.2	0.1	5.2010	36.6265	0.3663
	6	1					
5	0.5	0.5	5.5	0.1	5.5009	38.7388	0.3874
	6	0.6					
6	1	1.2	5	0.2	5.0040	35.2394	0.3524
	6	1					
7	0	0.8	3.2	0	3.2000	22.5352	0.2254
	3.2	0.8					
8	0.9	1	5.1	0.2	5.1039	35.9431	0.3594
	6	1.2					
9	0.5	1	6.5	0	6.5000	45.7746	0.4577
	7	1					
10	0	1.5	5.5	0.8	5.5579	39.1400	0.3914
	5.5	0.7					
11	0	1	5.6	0.1	5.6009	39.4429	0.3944
	5.6	1.1					
12	0.5	1.1	6	0.1	6.0008	42.2594	0.4226
	6.5	1.2					
13	0.1	0	6.4	0	6.4000	45.0704	0.4507
	6.5	0					
14	0.5	1.5	6.5	0.6	6.5276	45.9693	0.4597
	7	0.9					
15	0.3	1	5.9	0.2	5.9034	41.5732	0.4157
	6.2	1.2					
16	0.5	1.4	5.5	0.1	5.5009	38.7388	0.3874
	6	1.5					

Sumber : Hasil perhitungan, 2017

Perhitungan kecepatan aliran pada pilar persegi dengan menggunakan model fisik maupun dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* terdapat perbedaan kecepatan alirannya cukup jauh.

4. Pilar lingkaran (Aliran superkritik)

Perbedaan karakteristik kecepatan aliran pada saluran dengan pilar berbentuk lingkaran dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b) dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Kecepatan aliran pada pilar lingkaran dari hasil simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 (a) dan model fisik (b)

Nilai kecepatan pada sekitar tajam lingkaran untuk model fisik (Gambar 5.4 (b)) tertampil dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Nilai kecepatan sekitar pilar persegi (Aliran superkritik)

Titik	x	y	Jarak x (cm)	Jarak y (cm)	Perpindahan (cm)	Kecepatan (cm/s)	Kecepatan (m/s)
1	0	0.7	7.3	0.3	7.3062	52.9432	0.5294
	7.3	1					

2	0	0.1	6.5	0.4	6.5123	47.1906	0.4719
	6.5	0.5					
3	0	0	7	0	7.0000	50.7246	0.5072
	7	0					
4	0	0	7	0.2	7.0029	50.7453	0.5075
	7	0.2					
5	0	0	6.5	0.4	6.5123	47.1906	0.4719
	6.5	0.4					
6	0.3	0	6.5	0.5	6.5192	47.2406	0.4724
	6.8	0.5					
7	0.2	0	5.8	0.2	5.8034	42.0540	0.4205
	6	0.2					
8	0.3	1.5	4.7	0.5	4.7265	34.2502	0.3425
	5	1					
9	0.1	0	3.9	0	3.9000	28.2609	0.2826
	4	0					
10	0.2	0	7.8	0.5	7.8160	56.6377	0.5664
	8	0.5					
11	0	0.5	6.5	0.5	6.5192	47.2406	0.4724
	6.5	0					
12	0	1.1	9	0.9	9.0449	65.5427	0.6554
	9	0.2					
13	0	1.3	7.8	0.4	7.8102	56.5960	0.5660
	7.8	0.9					
14	0	0.4	7.3	0.6	7.3246	53.0769	0.5308
	7.3	1					
15	0	1	6	0.5	6.0208	43.6290	0.4363
	6	0.5					
16	0	1	6.7	0.1	6.7007	48.5561	0.4856
	6.7	1.1					

Sumber : Hasil perhitungan, 2017

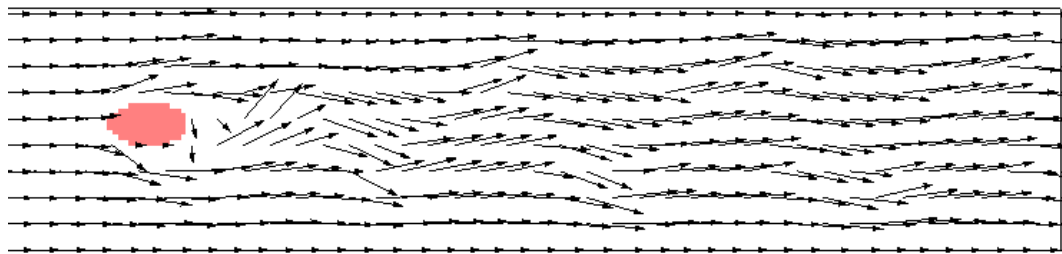
Perhitungan kecepatan aliran pada pilar lingkaran dengan menggunakan model fisik maupun dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* tidak terdapat perbedaan yang signifikan.

C. Analisa Pola Aliran

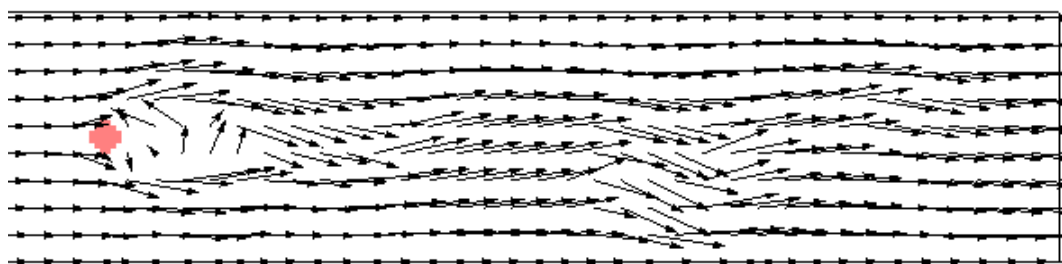
Arah aliran pada kondisi normal mengalir dari hulu daluran menuju ke hilir saluran. Dalam teori hidrolika air akan mengalir dari daerah yang memiliki tekanan tinggi menuju ke daerah yang memiliki tekanan yang rendah. Namun arah aliran

dapat berbelok jika menemui hambatan pada tengah saluran seperti adanya pilar jembatan. Adanya hambatan yang berada pada tengah saluran menyebabkan arah aliran berbelok dan dapat menyebabkan turbulensi aliran yang akan berpengaruh terhadap kedalaman dan pola gerusan yang terjadi.

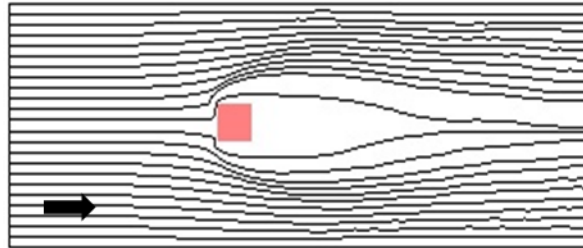
Dalam simulasi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* pola aliran dapat dimodelkan dengan menggunakan garis aliran (*streamline*). Pola aliran pada pilar berbentuk kapsul, tajam, persegi dan lingkaran yang dimodelkan dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dapat dilihat pada Gambar 5.7



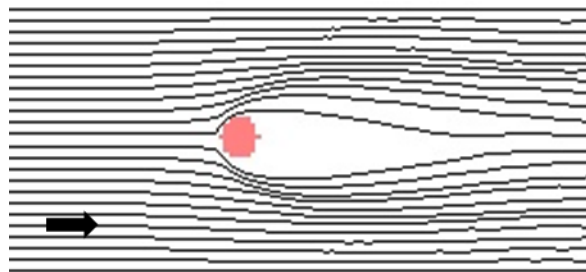
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. 7 Hasil pola aliran pada masing-masing bentuk pilar menggunakan software iRIC: Nays2DH 1.0

Pada Gambar 5.7 terlihat arah dan kecepatan aliran (pola aliran) sangat dipengaruhi oleh bentuk pilar jembatan dengan lebar yang sama. Dilihat dari hilir pilar jembatan terlihat bahwa terjadi turbulensi disekitar pilar jembatan dengan bentuk tajam dan kapsul, namun turbulensi pada hilir pilar jembatan dengan bentuk tajam

terjadi lebih besar bila dibandingkan dengan turbulensi yang terjadi pada hilir pilar jembatan dengan bentuk kapsul.

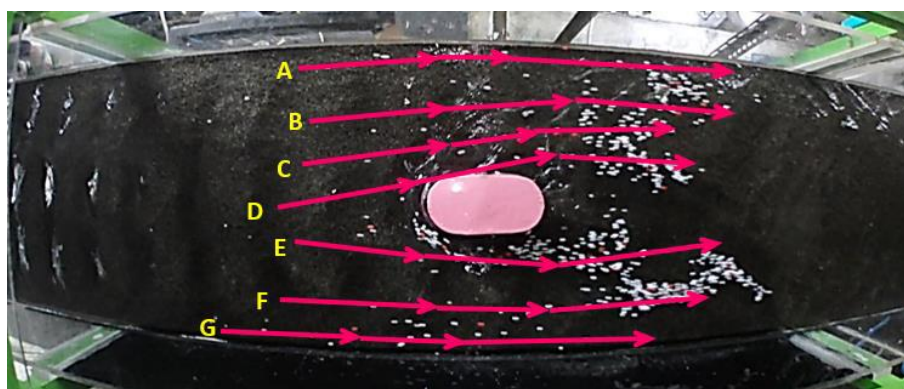
Ditinjau dari pengaruh perubahan arah kecepatan aliran menjadi normal kembali ke arah hilir saluran, untuk pilar jembatan bentuk kapsul dan tajam terlihat bahwa pengaruh perubahan arah aliran terjadi panjang untuk menjadi normal kembali. Untuk pilar jembatan bentuk kapsul terlihat bahwa pola perubahan kecepatan aliran lebih besar dan lebih tidak teratur jika dibandingkan dengan pola aliran dari pilar jembatan bentuk tajam.

Jika ditinjau dari perubahan arah aliran menjadi normal kembali, pola aliran dengan bentuk persegi akan akan melebar pada saat membentur pilar. Pada pilar berbentuk lingkaran arah alirannya cenderung mengikuti bentuk pilar pada saat membentur pilar, namun untuk berubah menjadi normal kembali pola aliran pada pilar persegi lebih cepat dari pada pilar lingkaran.

Pada model fisik pola aliran dianalisis dengan menggunakan *sediment tracking*. *Sediment tracking* tersebut akan mengalir mengikuti arah aliran yang terjadi. Dari pergerakan *sediment tracking* tersebut dapat diketahui pola alirannya.

1. Pilar kapsul

Pola aliran menggunakan model fisik pada pilar kapsul dapat dilihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar kapsul model fisik

Ditinjau dari pengaruh perubahan arah kecepatan aliran menjadi normal kembali ke arah hilir saluran, untuk pilar jembatan bentuk kapsul dan tajam terlihat bahwa pengaruh perubahan arah aliran terjadi panjang untuk menjadi normal

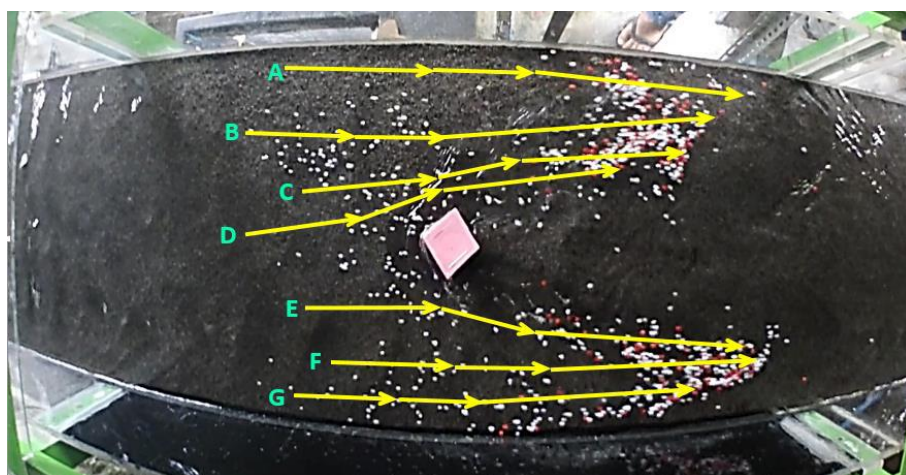
kembali. Untuk pilar jembatan bentuk kapsul terlihat bahwa pola perubahan kecepatan aliran lebih besar dan lebih tidak teratur jika dibandingkan dengan pola aliran dari pilar jembatan bentuk tajam.

Gambar 5.8 menunjukkan alur terjadinya pola aliran dari hulu pilar samapai ke hilir pilar tajam pada model fisik dengan bantuan sedimen tracking. Terlihat bahwa pola aliran pada bagian hulu saluran masih stabil, semakin mendekati pilar mulai terlihat pola aliran menuju kanan dan kiri mengikuti dari bentuk pilar. Terlihat pola aliran membelah menjadi dua bagian karena terhalang oleh pilar jembatan, semakin ke arah hilir saluran terlihat sediment tracking mulai mengumpul ke tengah saluran dan terlihat sedikit pola aliran tepat setelah pilar jembatan kapsul menuju hilir terjadi pola aliran yang tidak stabil.

Jika di bandingkan dengan hasil pola aliran model matematik, maka pola aliran yang terjadi hampir sama dengan pola aliran model fisik. Pada model matematik terlihat bahwa tepat setelah pilar jembatan menuju hilir saluran terjadipola aliran yang tidak stabil, sedangkan pada model fisik tidak terlihat dengan jelas pola aliran tepat setelah pilar jembatan.

2. Pilar Tajam

Pola aliran menggunakan model fisik pada pilar tajam dapat dilihat pada Gambar 5.9.



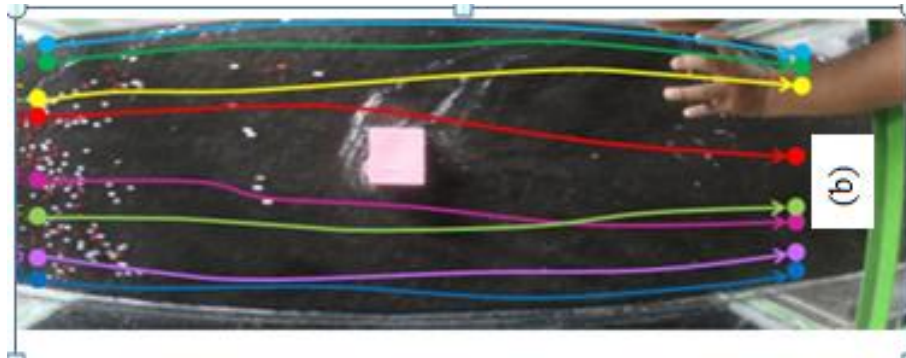
Gambar 5.9 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar tajam model fisik

Gambar 5.9 menunjukkan alur terjadinya pola aliran dari hulu pilar samapai ke hilir pilar tajam pada model fisik dengan bantuan *sedimen tracking*. Terlihat bahwa pola aliran pada bagian hulu saluran masih stabil, semakin mendekati pilar mulai terlihat pola aliran menuju kanan dan kiri mengikuti dari bentuk pilar. Terlihat pola aliran membelah menjadi dua bagian karena terhalang oleh pilar jembatan, semakin ke arah hilir saluran terlihat sediment tracking masih terpisah ke dua bagian dan belum terlihat kestabilan pola aliran.

Jika dibandingkan dengan dengan pola aliran dari model matematik menggunakan software iRIC : Nays 2DH 1.0 terlihat bahwa pola aliran pada pilar jembatan bentuk tajam hampir memiliki pola aliran yang sama. Dimana pola aliran akan terbagi menjadi 2 bagaian karena terhalang oleh pilar tajam dan kestabilan pola aliran belum terjadi di dekat pilar jembatan. Namun pada hasil pola aliran model fisik tidak terlihat pola aliran tepat dibagian pilar jembatan menuju ke hilir, jika didalam model matematik terlihat bahwa terjadi turbulensi/pola aliran yang tidak stabil terjadi, maka pada model fisik tidak terlihat dengan jelas pola aliran yang terjadi tepat di bagian jembatan menuju ke hilir saluran.

3. Pilar persegi

Pola aliran menggunakan model fisik pada pilar persegi dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Pola aliran dari hulu sampai persegi pilar tajam model fisik

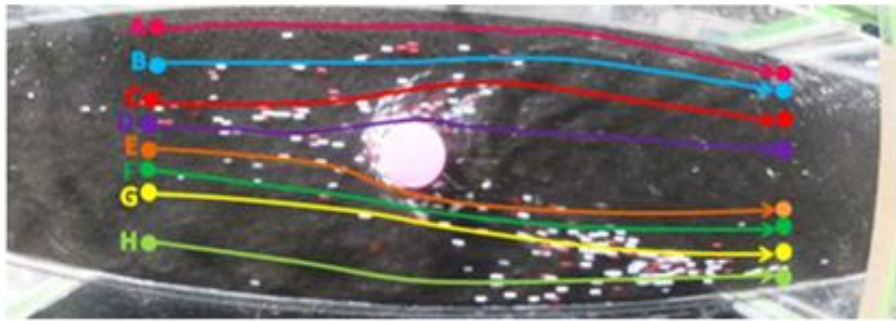
Gambar 5.10 menunjukkan bahwa pola aliran pada pilar persegi pada bagian hulu masih stabil. Ketika aliran membentur pilar terjadi turbulensi pada bagian depan pilar dan menyebabkan aliran melebar kesamping. Semakin kehilir pola aliran akan kembali normal.

4. Pilar lingkaran

Pola aliran menggunakan model fisik pada pilar tajam dapat dilihat pada Gambar 5.11.

(a)

(b)



Gambar 5.11 Pola aliran dari hulu sampai hilir pilar tajam model fisik

Gambar 5.11 menunjukkan bahwa pola aliran pada pilar lingkaran di daerah hulu masih stabil. Ketika menabrak pilar, pola aliran melebar dengan kecenderungan mengikuti bentuk pilar. Setelah melewati pilar, pola aliran akan kembali normal secara perlahan.

Hal ini menunjukkan bahwa pola aliran pada simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* maupun dengan model fisik tidak jauh berbeda.

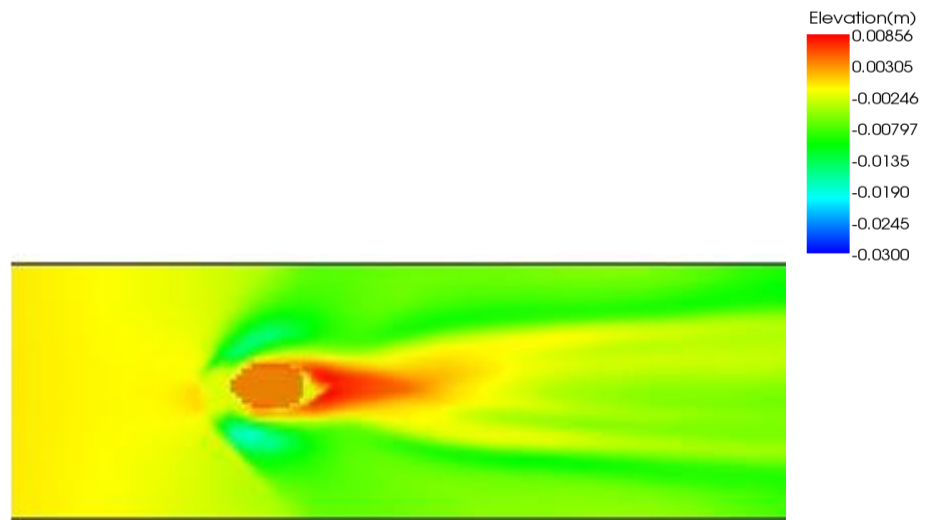
D. Analisa Pola Gerusan

Pola gerusan di sekitar pilar terjadi karena aliran dihalangi oleh pilar. Hal ini menyebabkan terganggunya pola aliran sehingga menyebabkan terjadinya pusaran air (*vortex*) di sekitar pilar. Besarnya gerusan ditentukan oleh besarnya pusaran yang terjadi dan kecepatan aliran di sekitar pilar.

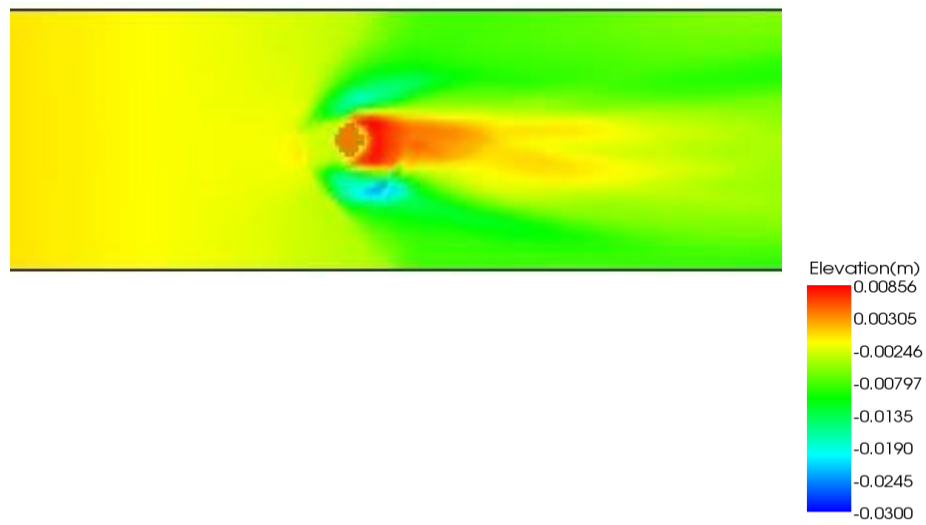
Pada simulasi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* pola gerusan ditampilkan dengan elevasi dasar saluran seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8. Pola gerusan dengan model fisik dapat dilihat pada Gambar 5.9. Garis kuning menunjukkan adanya gerusan, sedangkan garis abu-abu menunjukkan adanya sedimentasi.

Elevasi dasar pada saluran pada awalnya bernilai stabil. Akan tetapi, elevasi dasar saluran dapat berubah apabila terjadi perubahan morfologi penampang saluran seperti adanya pembuatan pilar jembatan. Perubahan elevasi dasar saluran dapat berupa penurunan elevasi dasar atau kenaikan elevasi dasar saluran, untuk penurunan elevasi dasar saluran akan berhubungan dengan gerusan. Pada penelitian ini, perubahan elevasi dasar saluran hanya akan dipengaruhi oleh bentuk pilar jembatan yang menjadi halangan aliran saja, karena dimensi lebar pilar jembatan tersebut sama.

Gambar 5.12 dan 5.13 menunjukkan elevasi dasar saluran yang ditunjukkan dengan skala warna. Warna merah menunjukkan elevasi dasar saluran tertinggi dan warna biru menunjukkan elevasi dasar saluran terendah. Elevasi dasar saluran berubah ketika terdapat pilar pada tengah saluran. Perubahan elevasi dasar saluran tersebut memiliki karakteristik yang berbeda tergantung pada bentuk pilar.



(a)



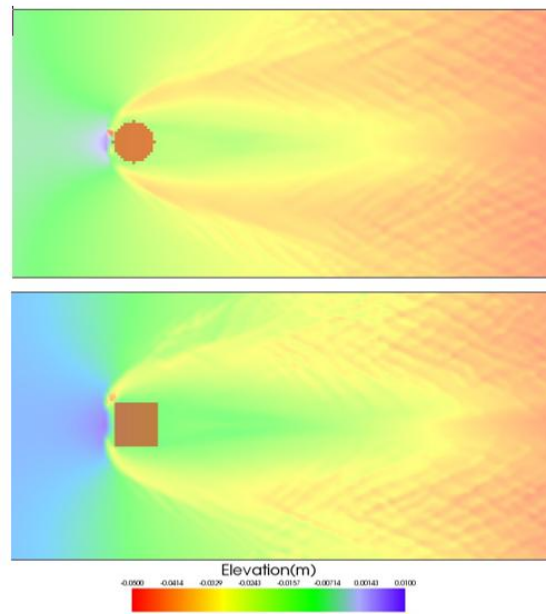
(b)

Gambar 5.12 Hasil elevasi gerusan pada simulasi software iRIC: Nays2DH 1.0 aliran subkritik (a) pilar kapsul (b) Pilar tajam

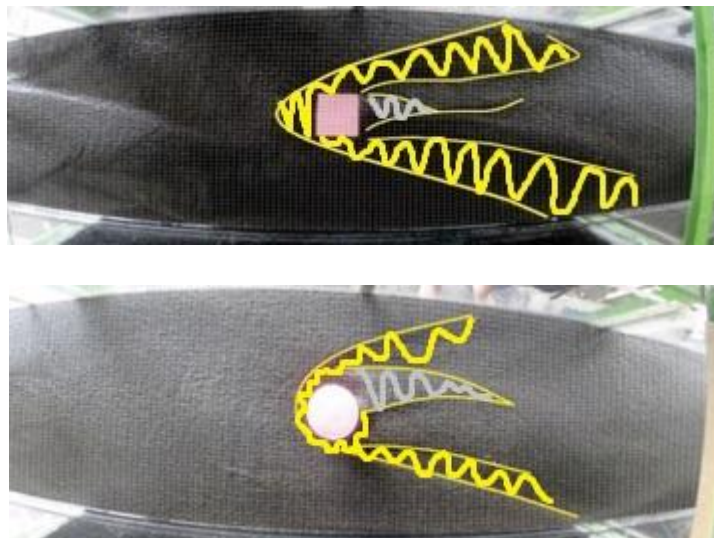
Pada gambar 5.12 terlihat bahwa pilar jembatan bentuk tajam dan kapsul mengalami perubahan elevasi dasar saluran baik terjadi penurunan atau kenaikan elevasi dasar saluran, dimana elevasi dasar saluran normal di bagian hulu berwarna kuning pekat berubah menjadi kuning muda sebelum adanya pilar jembatan.

Pada pilar jembatan bentuk tajam perubahan elevasi terjadi disisikannya dan kiri pilar jembatan ke arah tebing saluran. Perubahan berupa penurunan elevasi dasar (gerusan) terlihat dari warna hijau, biru muda sampai biru pekat. Dimana warna biru pekat menandakan terjadinya penurunan yang paling tinggi di sebelah kanan saluran, sedangkan di sebelah kiri saluran terlihat hanya berwarna biru muda. Selain penurunan elevasi dasar, terjadi juga kenaikan elevasi dasar saluran yang ditandai dengan warna kemerahan, dimana kenaikan terjadi di sekitar pilar arah hilir saluran yang kemudian semakin ke arah hilir saluran semakin turun kenaikan elevasi dasar saluran.

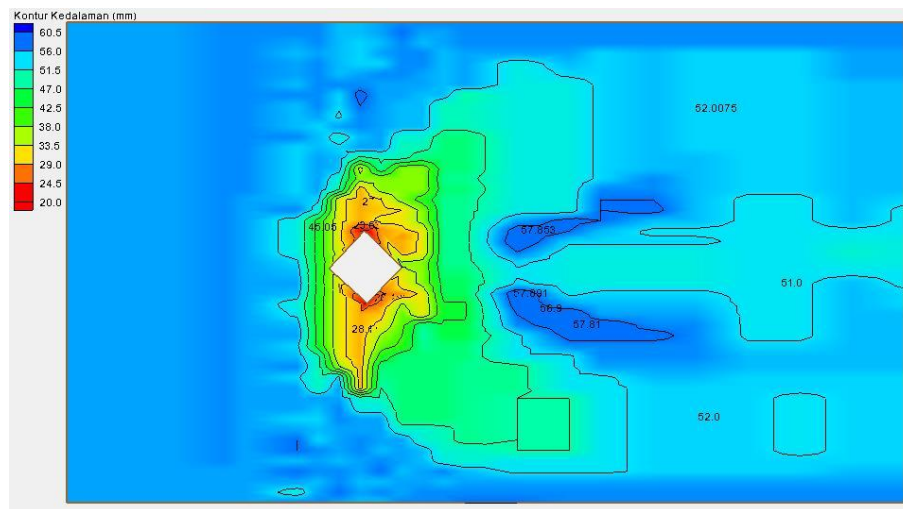
Sedangkan pada pilar bentuk kapsul juga terjadi penurunan elevasi dasar saluran di sebelah kanan dan kiri pilar yang ditunjukkan dengan warna biru muda, tetapi penurunan elevasi dasar saluran tidak sebesar dan sedalam seperti pilar jembatan bentuk tajam. Kenaikan elevasi dasar saluran juga terjadi seperti pilar bentuk tajam, tetapi panjang perubahan kenaikan elevasi dasar saluran ke arah hilir lebih panjang jika dibandingkan dengan pilar jembatan bentuk tajam.



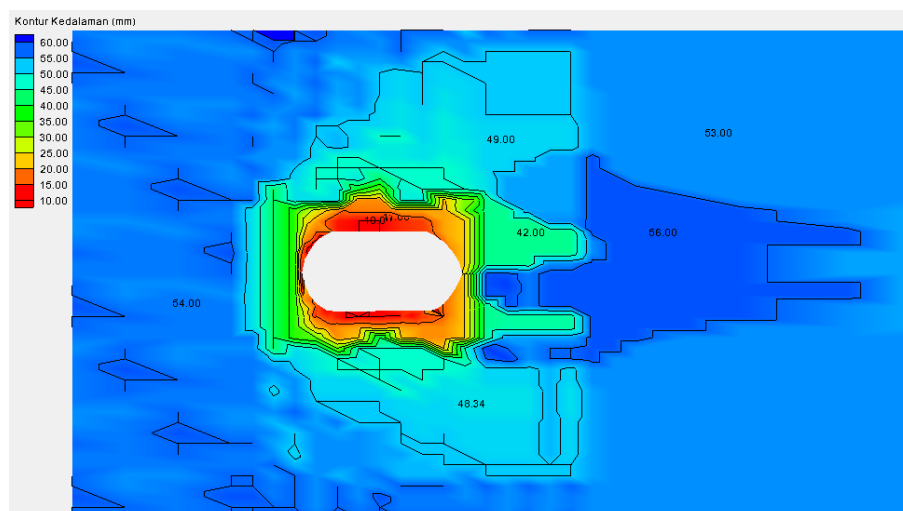
Gambar 5.13 Hasil elevasi gerusan pada simulasi software iRIC: Nays2DH
1.0 aliran superkritik



Gambar 5.14 Hasil gerusan pada pilar persegi dengan model fisik



(a)



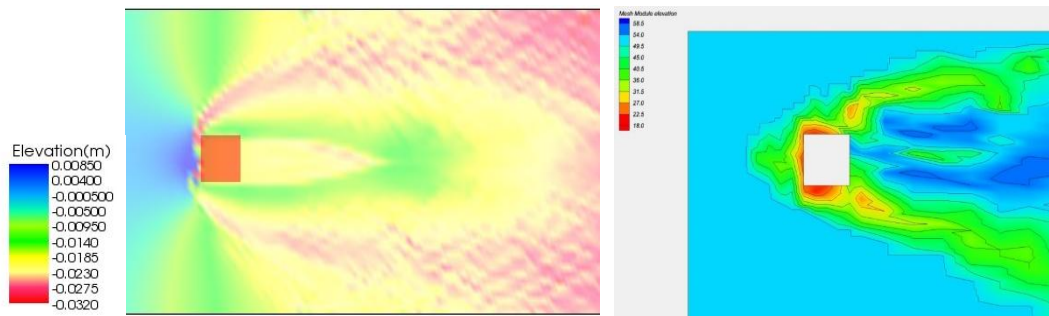
(b)

Gambar 5.15 Hasil analisa kontur elevasi dasar disekitar pilar kapsul pada model fisik aliran subkritik (a) Pilar tajam (b) Pilar kapsul

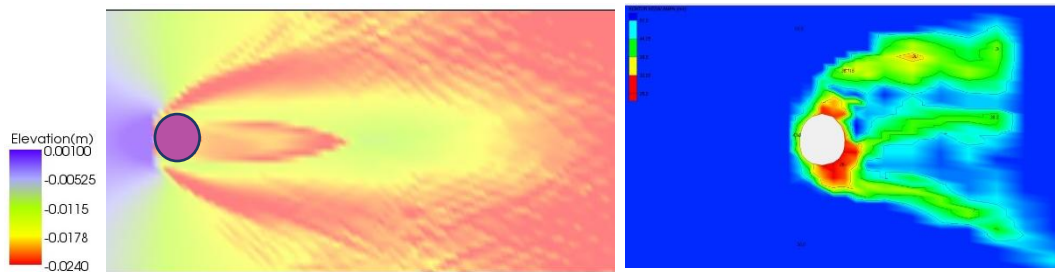
Gambar 5.15 bagian (a) dan (b) mendeskripsikan elevasi dasar saluran jenis pilar jembatan tajam dan kapsul untuk hasil dari model fisik. Pada pilar jembatan bentuk tajam, terlihat bahwa elevasi dasar saluran mula berubah ketika terdapat halang di tengah saluran berupa pilar jembatan. Terlihat skalanya biru tua untuk elevasi dasar sebesar 60,5 mm sampai warna merah tua dengan elevasi dasar saluran sebesar 10 mm. Untuk elevasi dasar saluran di hulu saluran ditunjukkan

dengan warnabirusebesar54mm.Perubahantersebutterlihatdarihulusampaihilir saluran disekitar pilar. Penurunanelevasidasar saluran tertinggi ditandai dengan warnamerah dimanamenunjukkan elevasidasarsedalam20,6mmyangterletakdi sebelahsamping kanan kiripilartajam,semakinmenujuketebing saluranelevasi mengalamikenaikanyang ditunjukkan dengan warnakuning dan hijau.Selain penurunanelevasidasarsaluran,terjadijuga kenaikanelevasidasarsaluran di bagianhilirdengan elevasidasarsaluran sebesar57,89mmyang ditandai dengan warnabiru tua.

Padapilarjembatanbentuk kapsul,terlihat skalaelevasidasarsaluran tertinggi sebesar60mmditunjukkan dengan warna birutasampai elevasidasarsaluran terendah sebesar 10mmditunjukkan dengan warna merah tua.Sedangkan elevasi awal dasar saluran ditunjukkan dengan warnabirusebesar 54 mmyang terdapat di bagianhulusaluran.Penurunanelevasidasarsaluran terlihat dimulaidarihulupilar sampai hilir pilarjembatan. Penurunan elevasi dasar saluran tertinggi terjadi disisi kanan dankiri pilarkapsulyang di tandai dengan warna merah yang menunjukkan elevasidasar dengan kedalaman 10 mm. Daerah pengaruh herusan jugaterlihat mendekatitebing saluran,semakinmenuju ketebing saluranelevasidasarsaluran mengalamikenaikanyang ditunjukkan dengan warnakuning dan hijau.Selain terjadipenurunanelevasidasar saluran,terjadijuga kenaikanelevasidasarsaluran dibagianhilirpilaryang ditunjukkan dengan warnabirutas yang menunjukkan elevasi dasar saluran sebesar 56 mm.



(a)



(b)

Gambar 5.16 Perbandingan hasil gerusan menggunakan software *iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisik pada pilar persegi (a) dan lingkaran (b)

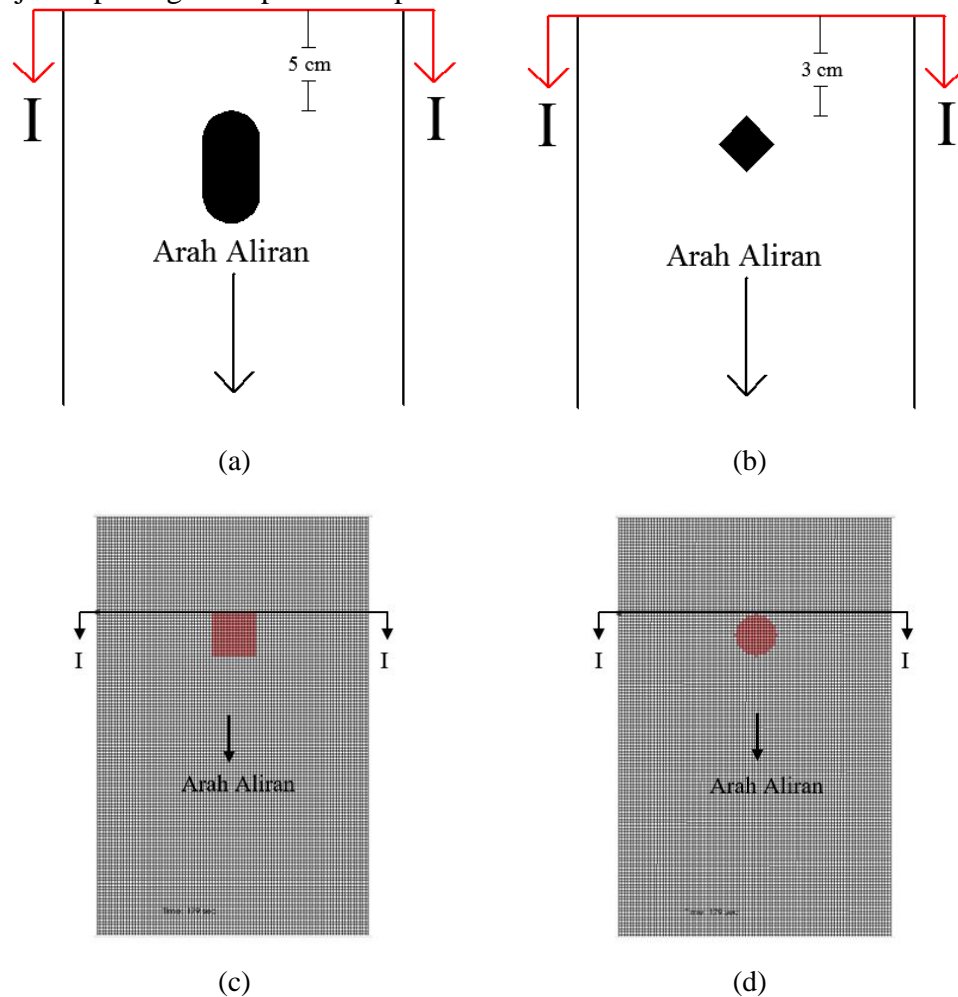
Gambar 5.16 menunjukkan perbandingan elevasi gerusan pada pilar persegi menggunakan *iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisik. Pada elevasi gerusan menggunakan *iRIC: Nays2DH 1.0* kedalaman gerusan ditunjukkan oleh skala warna dari yang tertinggi yaitu merah menunjukkan adanya gerusan sedangkan warna biru menunjukkan adanya sedimentasi. Sedangkan pada elevasi gerusan menggunakan model fisik pada gambar ditunjukkan bahwa digunakan skala warna biru menunjukkan adanya sedimentasi, sedangkan warna merah menunjukkan adanya gerusan.

Walaupun memiliki elevasi gerusan yang berbeda, namun pola gerusan yang dihasilkan oleh *software iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisik hampir sama yaitu elevasi dasar saluran mulai berubah ketika mendekati halangan yang berupa pilar persegi dan pada bagian belakang terjadi sedimentasi.

Dari Gambar 5.16 dapat diketahui bahwa pada pilar persegi menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisiknya mempunyai pola gerusan yang sama sedangkan pada pilar lingkaran pola gerusannya berbeda.

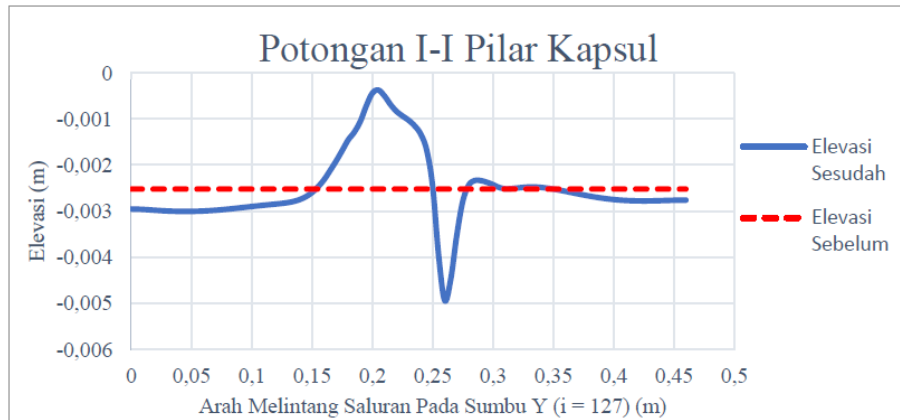
Perubahan elevasi dasar saluran terlihat kurang jelas baik hasil dari model fisik atau model matematik untuk penurunan maupun kenaikan elevasinya, maka dilakukan tinjauan dari beberapa potongan di sekitar pilar jembatan. Peninjauan tersebut dilakukan untuk pengakuratan analisa mengenai perubahan elevasi dasar saluran terutama analisa mengenai gerusan di sekitar pilar. Peninjauan dilakukan dengan menggunakan grafik yang dibuat dari *Microsoft Excel*. Peninjauan ini dilakukan dengan 4 potongan bagian sebagai berikut.

1. Tinjauan potongan I-I pada hulu pilar

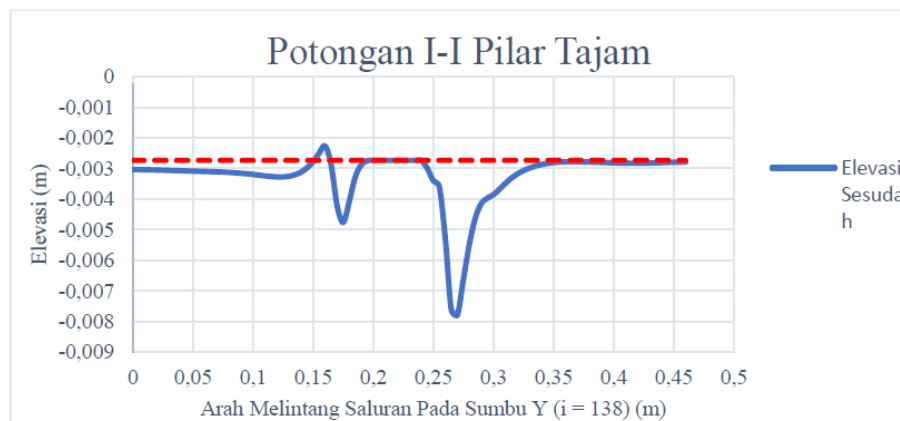


Gambar 5.17 Potongan I-I pada hulu pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c)

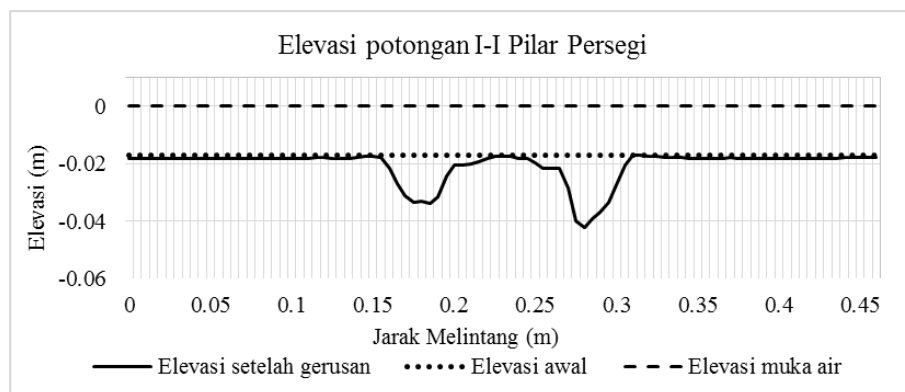
pilar persegi (d) dan pilar lingkaran



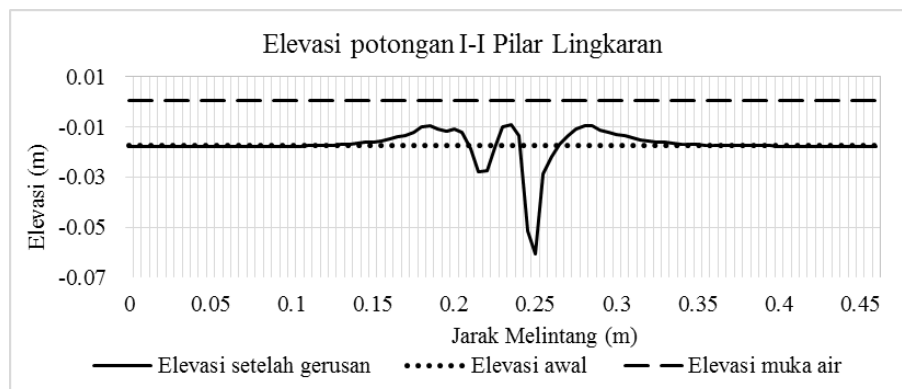
(a)



(b)



(c)



(d)

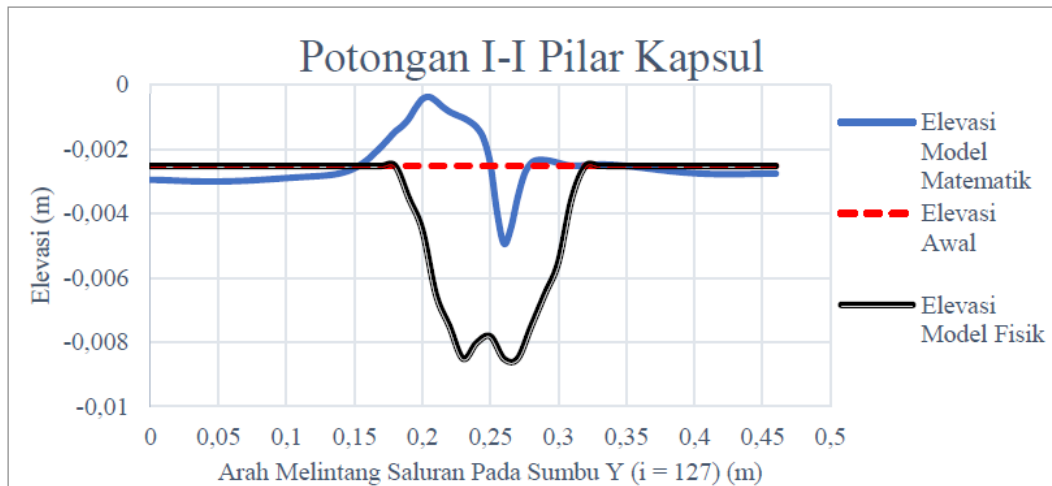
Gambar 5. 18 Elevasi dasar saluran pada potongan I-I pada masing-masing pilar dengan software iRIC: Nays2DH 1.0

Potongan I-I merupakan potongan melintang pada hulu pilar yang terdapat pada *grid* $i = 138$ untuk pilar jembatan bentuk tajam, *grid* $= 127$ untuk pilar jembatan bentuk kapsul dan *grid* $i = 97$ untuk pilar jembatan bentuk persegi dan lingkaran.

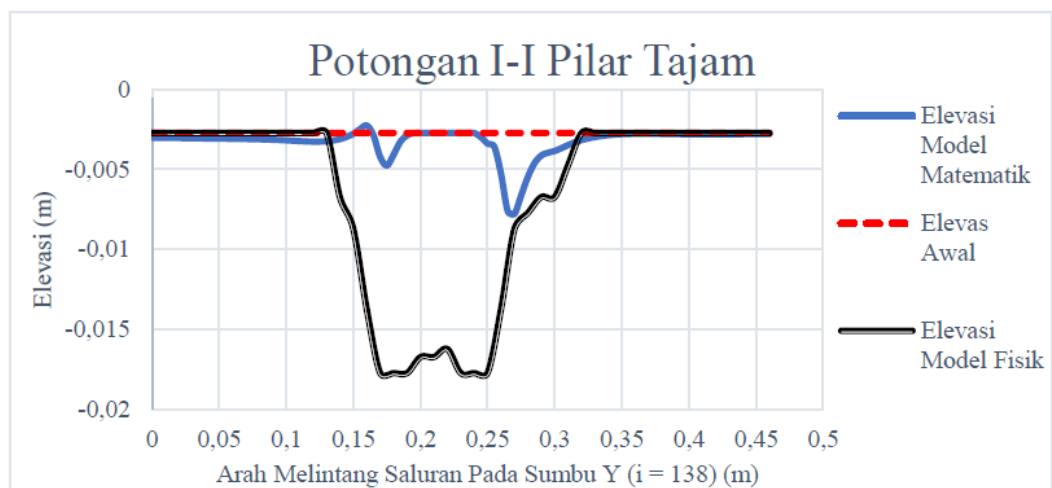
Pada aliran subkritik (pilar kapsul dan tajam), pilar jembatan bentuk tajam terjadi gerusan yang paling besar diantara ke dua bentuk pilar jembatan tersebut. Pada pilar ini seluruh elevasi dasar saluran mengalami penurunan yang hamir tetapi terjadi gerusan yang paling dalam pada sisi kiri saluran, selain penurunan elevasi terjadi juga keniakan elevasi dasar saluran yang relatif kecil. Sedangkan untuk gerusan pada pilar jembatan bentuk kapsul, penurunan elevasi dasar saluran terjadi di bagian kanan, kiri, dan tengah saluran. Selain penurunan elevasi juga terjadi keniakan elevasi dasar saluran di bagian tengah saluran

Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkaran), karakteristik gerusan yang terjadi pada pilar persegi cenderung melebar dan lebih lebar dibandingkan dengan gerusan yang terjadi pada pilar berbentuk lingkaran yang cenderung memiliki gerusan yang hanya terjadi disekitar pilar. Pada pilar berbentuk lingkaran gerusan yang terjadi relatif sedikit dan cenderung banyak terdapat sedimentasi. Hal ini terjadi karena pada saat aliran air membentur pilar persegi terdapat aliran yang kembali dan menyebabkan terjadinya turbulensi, sehingga menyebabkan aliran melebar kesamping. Sedangkan pada pilar berbentuk lingkaran aliran air akan cenderung mengikuti bentuk pilar dan turbulensi yang terjadi lebih sedikit dari pada yang terjadi di pilar persegi, sehingga gerusan yang terjadi lebih sedikit.

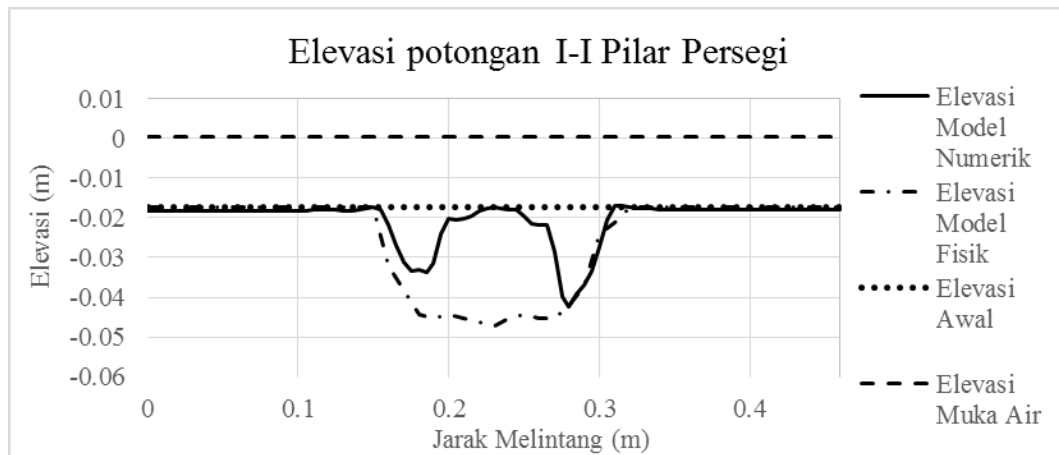
Gambar 5.19 menunjukkan elevasi gerusan grafik hasil penelitian model fisik dan matematik pada masing-masing pada potongan I-I di hulu pilar.



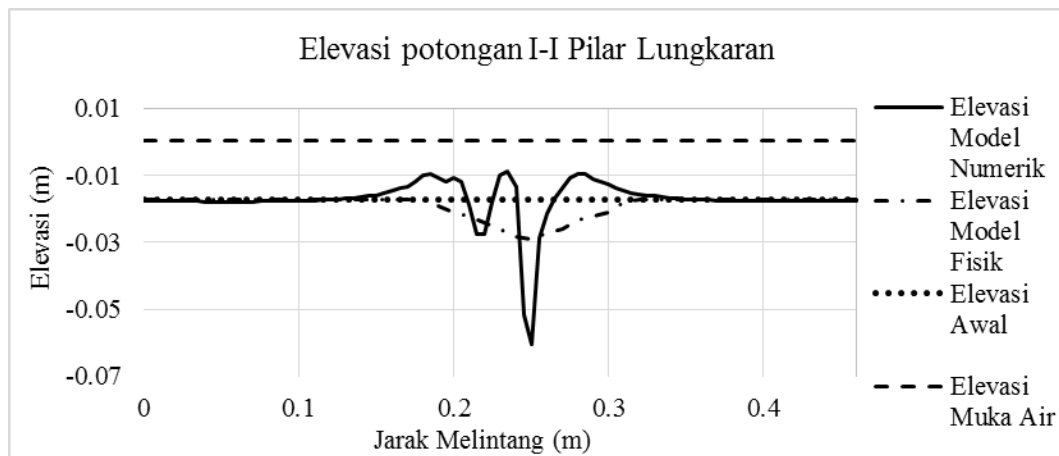
(a)



(b)



(c)



(d)

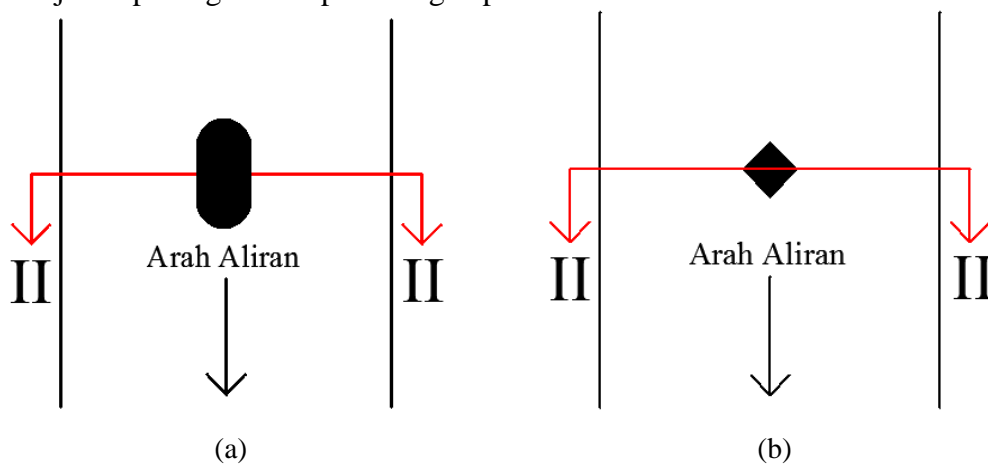
Gambar 5. 19 Grafik elevasi dasar saluran potongan I-I hulu pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik

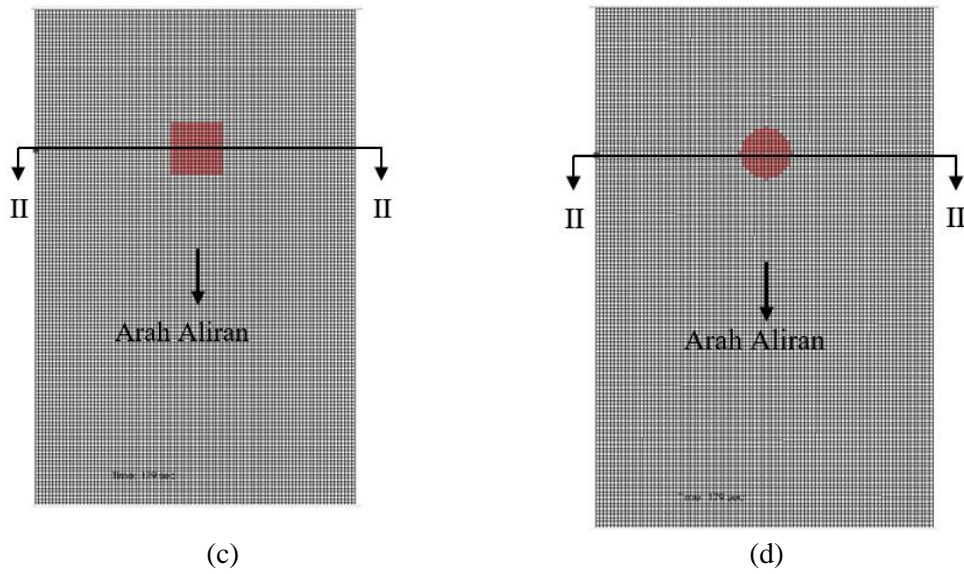
Dari hasil simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* yang dibandingkan dengan hasil pengujian model fisik di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Yogyakarta adalah penurunan elevasi kedalaman gerusan pada ke dua model relatif sama dengan mempunyai perbedaan kedalaman sekitar 0,01 m untuk pilar bentuk tajam dan 0,0035 m untuk pilar bentuk kapsul sedangkan untuk kenaikan elevasi dasar saluran pada model matematik terjadi kenaikan tetapi pada model fisik tidak terjadi kenaikan elevasi. Tetapi pada pola gerusan pada kedua model juga berbeda.

Jika lebar pilar 0,0762 m dan tinggi muka air sebesar 0,0175 m, maka dapat diketahui perbandingan persentase kedalaman gerusan dan sedimentasi terhadap lebar pilar dan tinggi muka air bentuk pilar persegi dan lingkaran berdasarkan

dengan analisis model numerik dan model fisik. Dari Gambar tersebut, elevasi gerusan pada pilar persegi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* dan model fisik didapatkan kedalaman gerusan yang hampir sama. Sedangkan bentuk dan kedalaman gerusan pada pilar lingkaran model fisik berbeda dari simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*. Kedalaman gerusan pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,025 m dan 0,03 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 33,02% dan 39,37%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 143,76% dan 171,43%. Kedalaman gerusan pada pilar lingkaran dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,0434 m dan 0,0120 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 57% dan 15,74%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 248,18% dan 68,55%. Sedimentasi yang terjadi pada pilar persegi dan lingkaran dengan model numerik sebesar 0,0003 m dan 0,0083 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 0,38% dan 10,85%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 1,63% dan 47,25%, sedangkan pada pilar persegi dan lingkaran dengan model fisik tidak terjadi sedimentasi.

2. Tinjauan potongan II-II pada tengah pilar

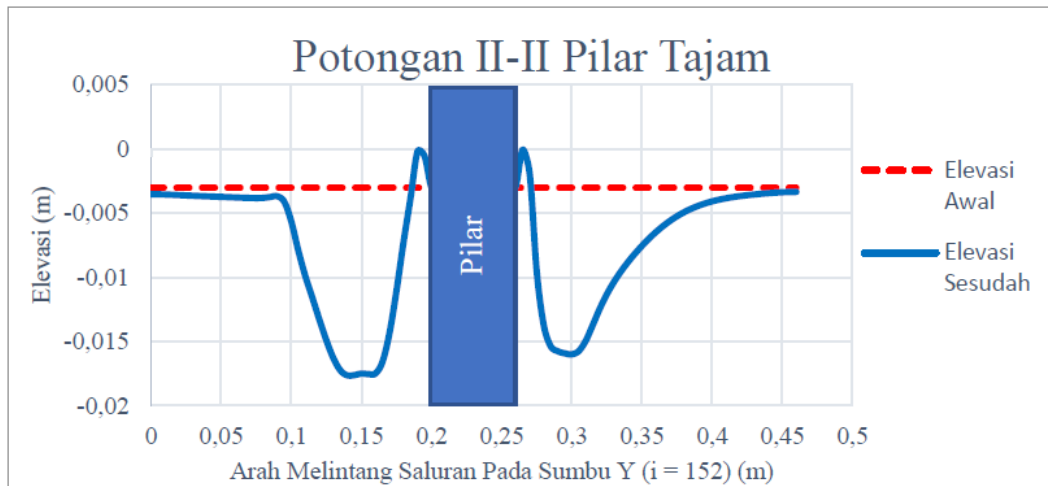




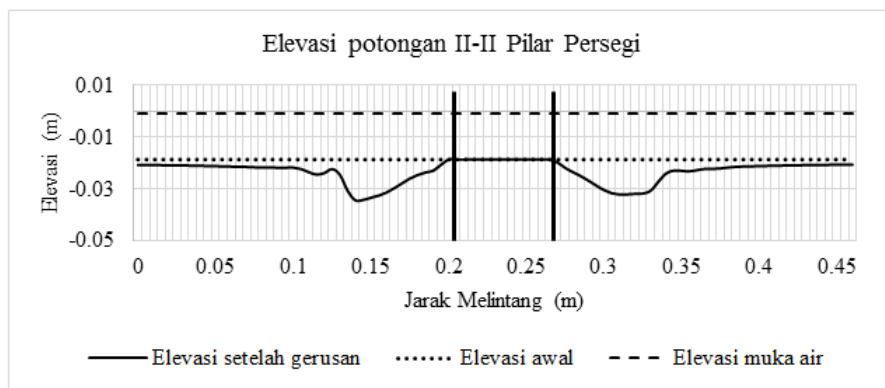
(c) (d)
 Gambar 5. 20 Potongan II-II pada hulu pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran



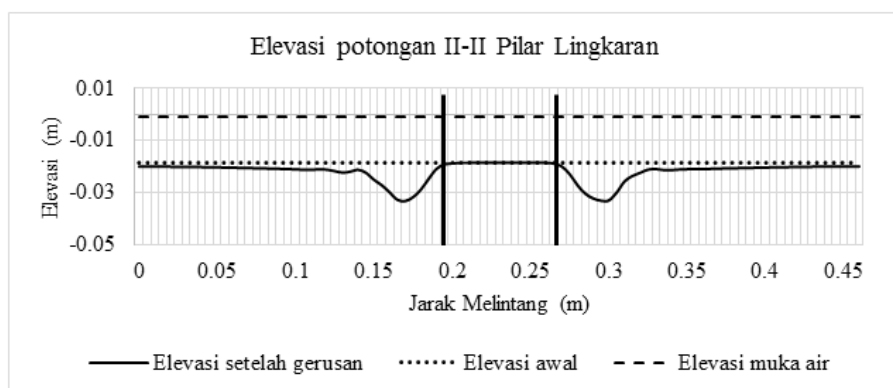
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. 21 Elevasi dasar saluran pada potongan II-II pada masing-masing pilar dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*

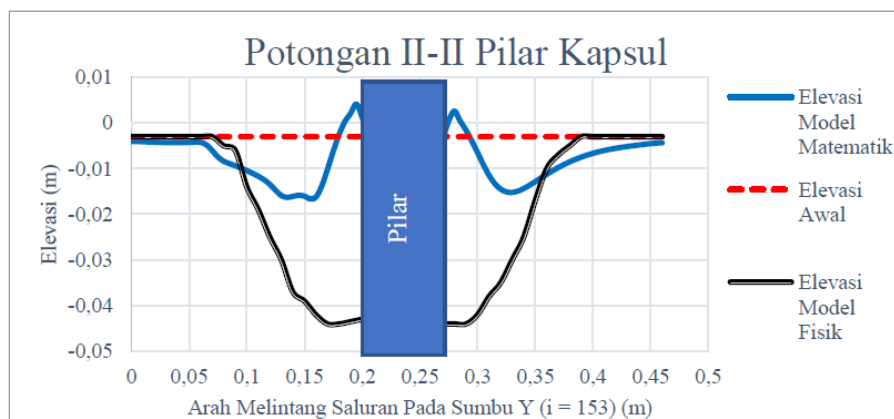
Potongan II-II ini merupakan potongan melintang saluran pada tengah pilar yang terletak pada grid $i = 153$ untuk pilar jembatan bentuk kapsul dan grid $i = 152$

untuk pilar jembatan bentuk tajam serta *grid* $i = 105$. Gambar 5.21 menunjukkan elevasi gerusan pada masing-masing pilar dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*.

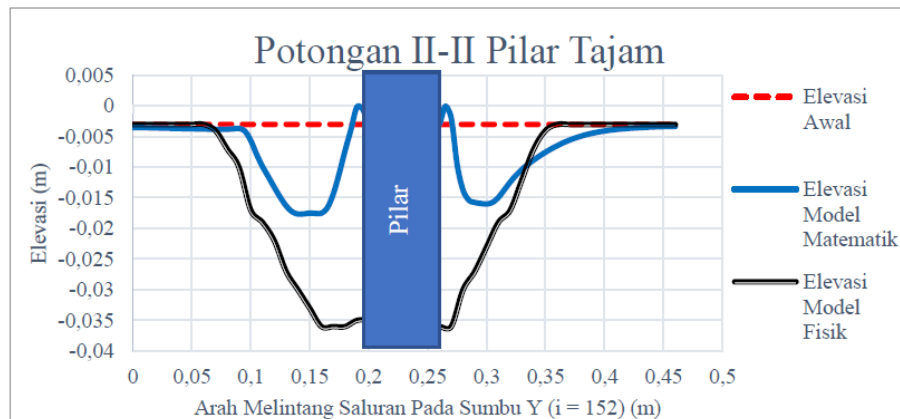
Pada aliran subkritik (pilar kapsul dan tajam), pilar jembatan bentuk kapsul mempunyai kedalaman gerusan yang hampir sama jika dibandingkan pilar bentuk tajam. Tetapi gerusan pada pilar ini lebih banyak terjadi serta gerusan didominasi disisi kanan pilar, dan terjadi kenaikan elevasi dasar yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pilar bentuk tajam. Sedangkan pada pilar jembatan bentuk tajam juga terjadi gerusan yang paling dalam disisi sebelah kanan pilar.

Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkara), gerusan pada pilar persegi yang terjadi disamping pilar cenderung melebar dan sudut kemiringan gerusan yang terjadi lebih landai. Sedangkan pada pilar lingkaran gerusan yang terjadi cenderung sempit namun memiliki sudut kemiringan gerusan yang lebih curam. Hal ini terjadi karena turbulensi yang terjadi pada pilar lingkaran lebih sedikit dari pada turbulensi yang terjadi pada pilar persegi.

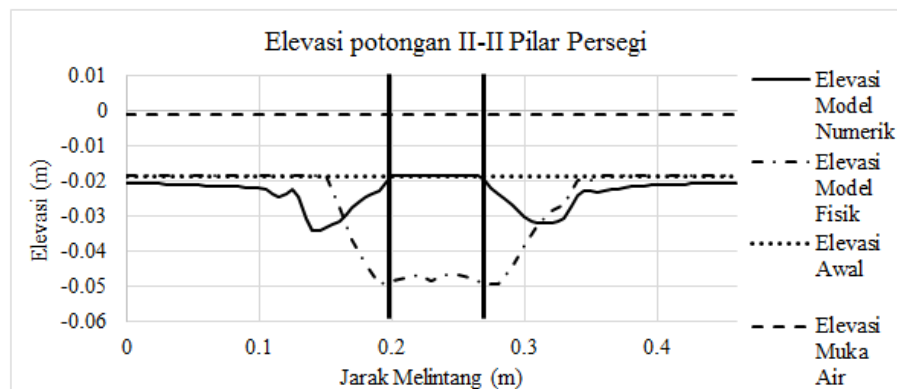
Gambar 5.19 menunjukkan elevasi gerusan grafik hasil penelitian model fisik dan matematik pada masing-masing pada potongan II-II di tengah pilar.



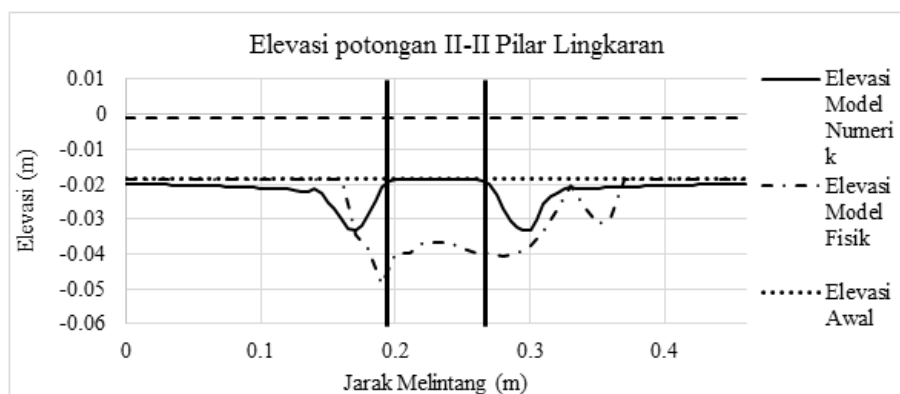
(a)



(b)



(c)



(d)

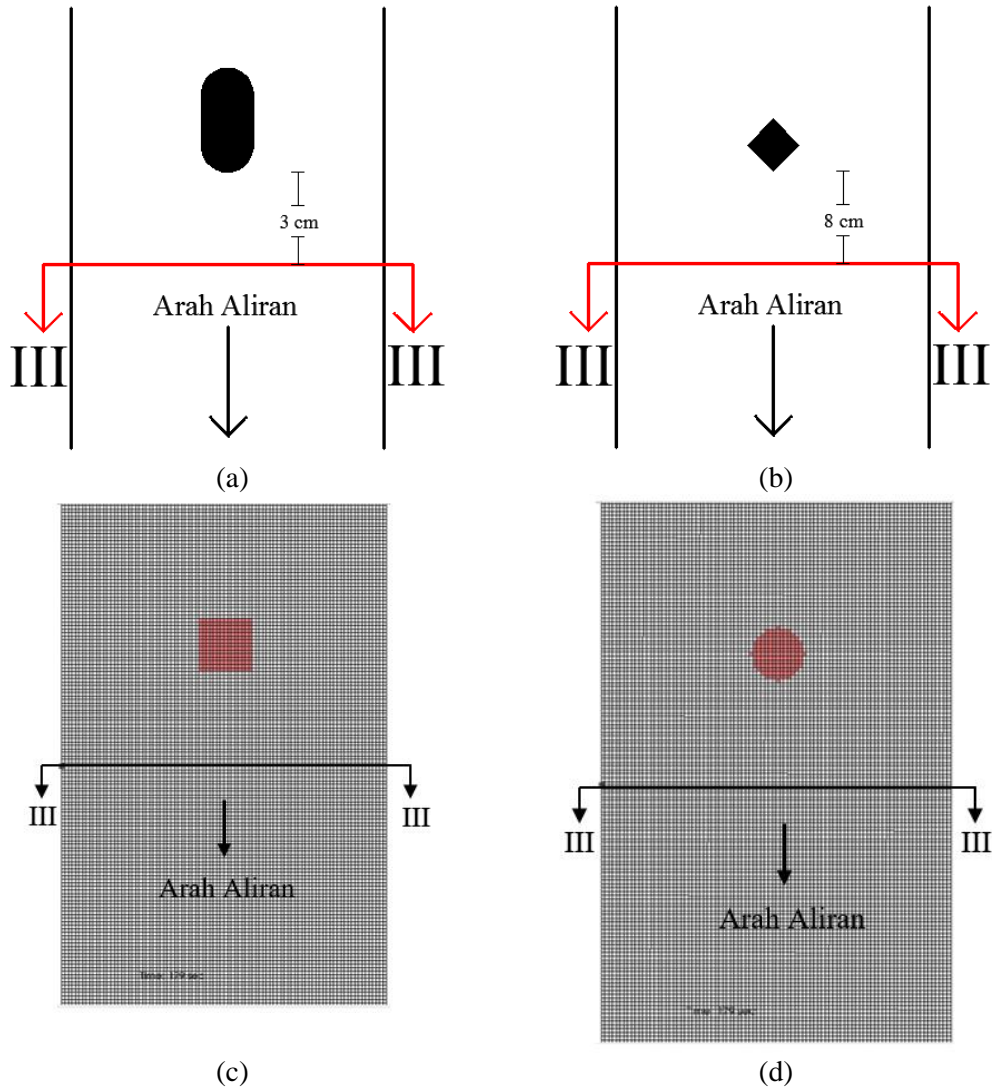
Gambar 5. 22 Grafik elevasi dasar saluran potongan II-II tengah pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik

Pada aliran subkritik (pilar kapsul dan tajam), dari hasil simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* yang dibandingkan dengan hasil pengujian model fisik

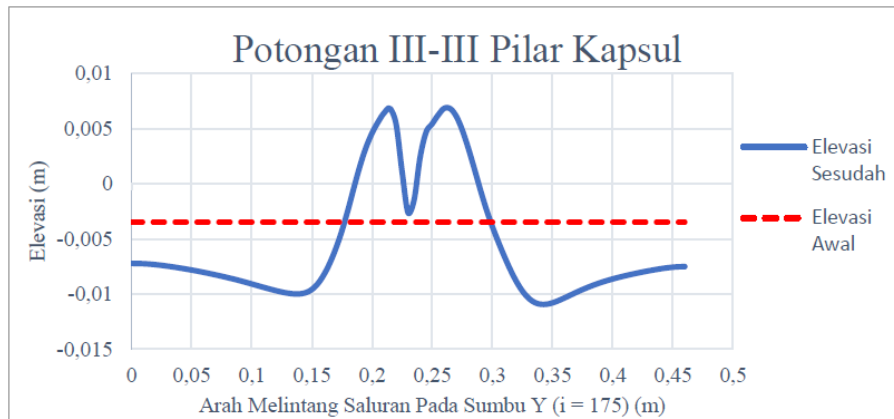
adalah penurunan elevasi kedalaman gerusan pada ke dua model mempunyai perbedaan yang cukup jauh dengan perbedaan kedalaman sekitar 0,018 m untuk pilar bentuk tajam dan 0,027 m untuk pilar bentuk kapsul sedangkan untuk kenaikan elevasi dasar saluran pada model matematik terjadi kenaikan tetapi pada model fisik tidak terjadi kenaikan elevasi. Dan untuk pola gerusan pada kedua model juga berbeda.

Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkaran), dari perbandingan elevasi gerusannya dengan *software iRIC: Nays2DH1.0* dan model fisik dapat diketahui bahwa elevasi gerusan model fisik dan dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* sedikit berbeda. Namun karakteristik gerusan antara model fisik dengan pemodelan menggunakan *software iRIC:Nays2DH 1.0* baik pada pilar persegi dan lingkaran cenderung sama. Jika lebar pilar 0,0762 m dan tinggi muka air sebesar 0,0175 m, maka dari Gambar 5.22 dapat diketahui perbandingan persentase kedalaman gerusan dan sedimentasi terhadap lebar pilar dan tinggi muka air untuk kedua pilar dengan model numerik dan model fisik. Kedalaman gerusan pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,016 m dan 0,031 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 20,66% dan 40,68%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 89,94% dan 177,14%. Kedalaman gerusan pada pilar lingkaran dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,0147 m dan 0,03 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 19,31% dan 39,38%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 84,08% dan 171,45%. Pada pilar persegi dan lingkaran dengan model numerik maupun model fisik tidak terjadi sedimentasi.

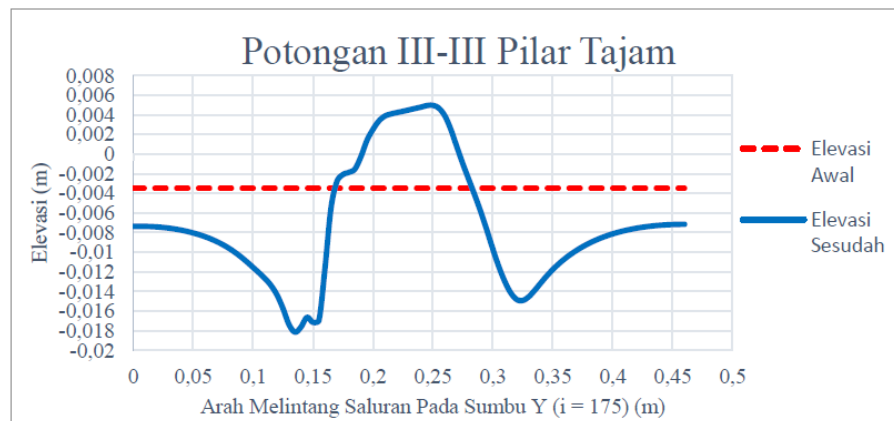
3. Tinjauan potongan III-III pada hilir pilar 1



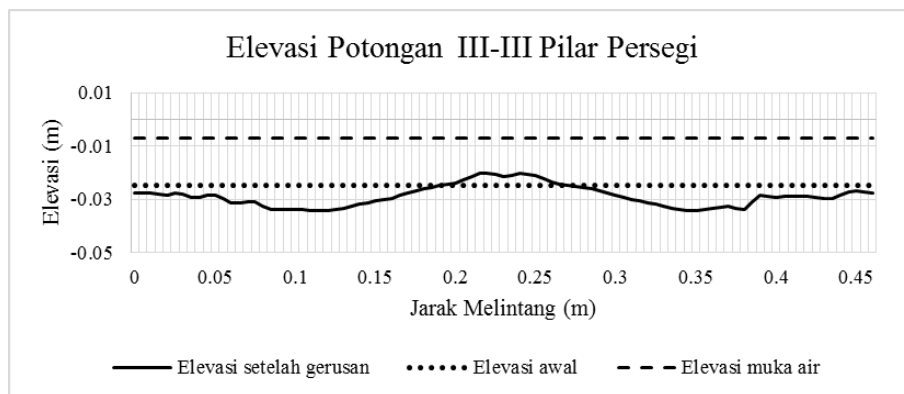
Gambar 5. 23 Potongan III-III pada hilir 1 pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran



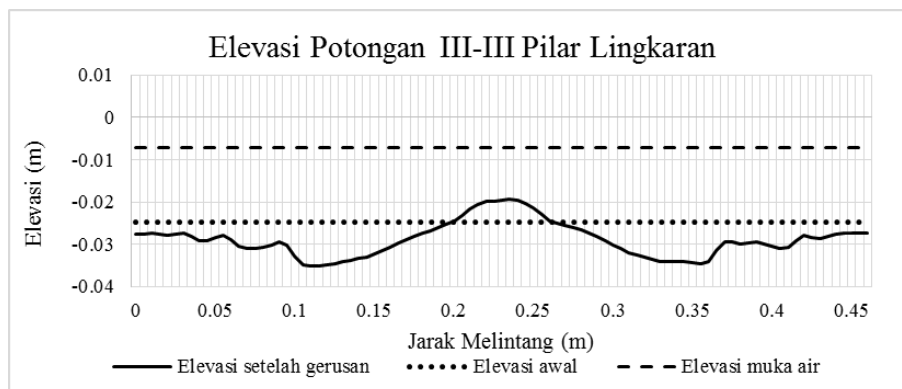
(a)



(b)



(c)



(d)

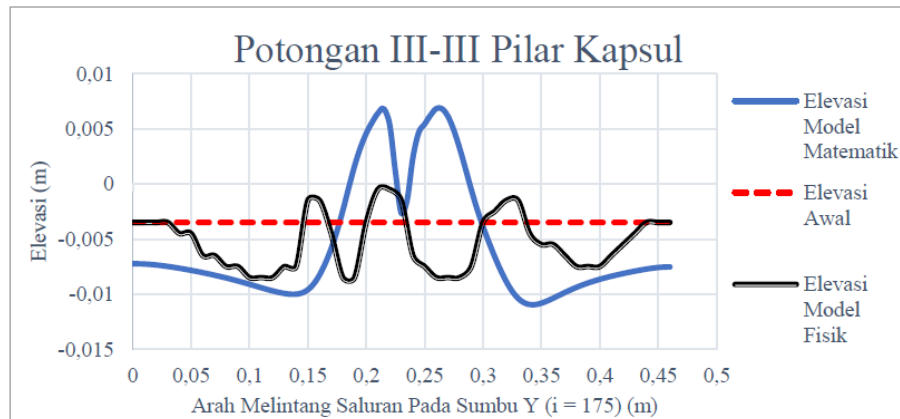
Gambar 5. 24 Elevasi dasar saluran pada potongan III-III pada masing-masing pilar dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*

Potongan III-III merupakan potongan melintang saluran pada $grid\ i = 175$ untuk pilar jembatan bentuk tajam dan kapsul dan $grid\ i = 139$ atau pada jarak 17 cm dari pilar untuk pilar persegi dan lingkaran. Gambar 5.31 menunjukkan elevasi gerusan pada masing-masing pilar dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*.

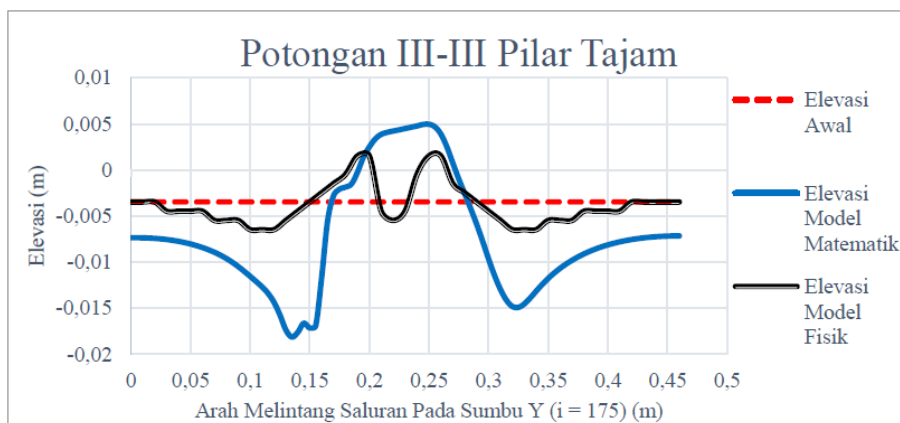
Pada aliran superkritik (pilar kapsul dan tajam), pada pilar jembatan bentuk tajam masih terjadi gerusan di sebelah kanan dan kiri pilar, penurunan elevasi dasar saluran paling tinggi didominasi di sebelah kanan pilar selain penurunan elevasi dasar saluran juga terjadi kenaikan elevasi dasar saluran yang terjadi di bagian tengah. Sedangkan untuk pilar jembatan bentuk kapsul juga terjadi penurunan elevasi dasar saluran di sebelah kanan dan kiri pilar dengan kedalaman gerusan yang hampir sama, selain itu juga terjadi kenaikan elevasi dasar saluran yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pilar jembatan bentuk tajam di bagian tengah saluran.

Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkaran), pada potongan III-III yang terdapat pada hilir pilar 1 ini gerusan yang terjadi pada saluran dengan pilar persegi maupun saluran dengan pilar lingkaran cenderung sama. Hal ini terjadi karena aliran air pada titik ini sudah mulai normal kembali.

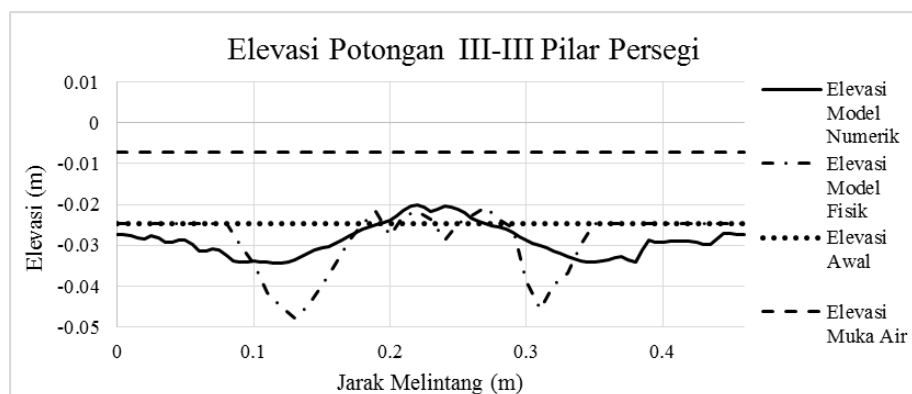
Gambar 5.25 menunjukkan elevasi gerusan grafik hasil penelitian model fisik dan matematik pada masing-masing pada potongan III-III di hilir 1 pilar.



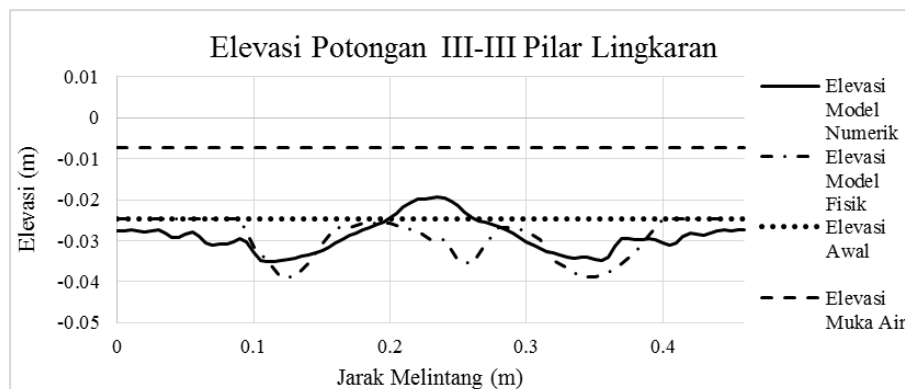
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. 25 Grafik elevasi dasar saluran potongan III-III hilir 1 pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik

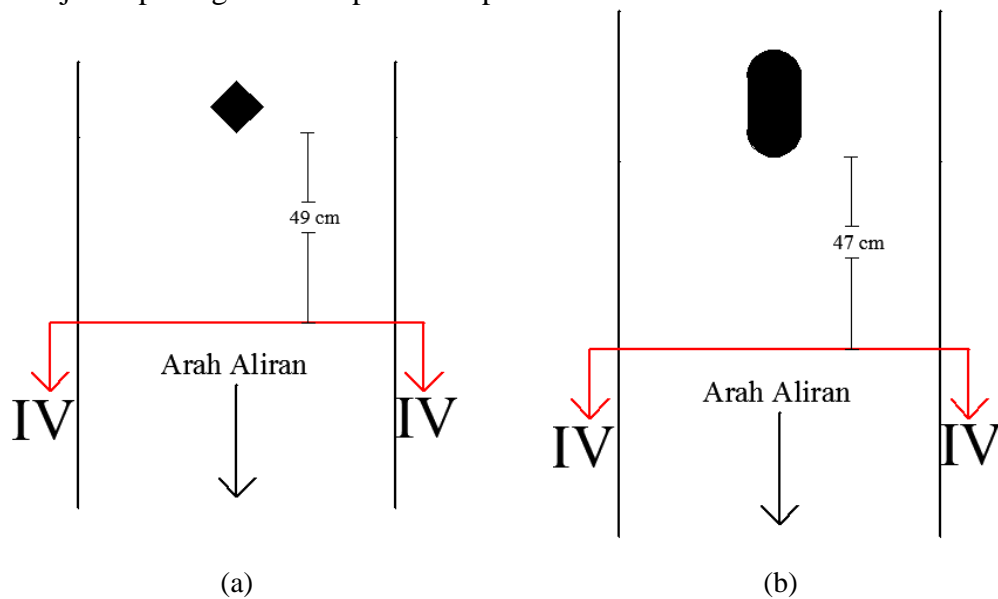
Pada aliran subkritik (pilar kapsul dan tajam), dari hasil simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* yang dibandingkan dengan hasil pengujian model fisik di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Yogyakarta adalah penurunan elevasi kedalaman gerusan pada model mempunyai perbedaan kedalaman sekitar 0,012 m untuk pilar bentuk tajam dan 0,002 m untuk pilar bentuk kapsul, sedangkan untuk kenaikan elevasi dasar saluran pada model pilar bentuk tajam sama terjadi kenaikan sekitar 0,003 m, untuk pilar bentuk kapsul terjadi perbedaan kenaikan elevasi dasar sebesar 0,007 m. Dan untuk pola gerusan pada kedua model juga berbeda.

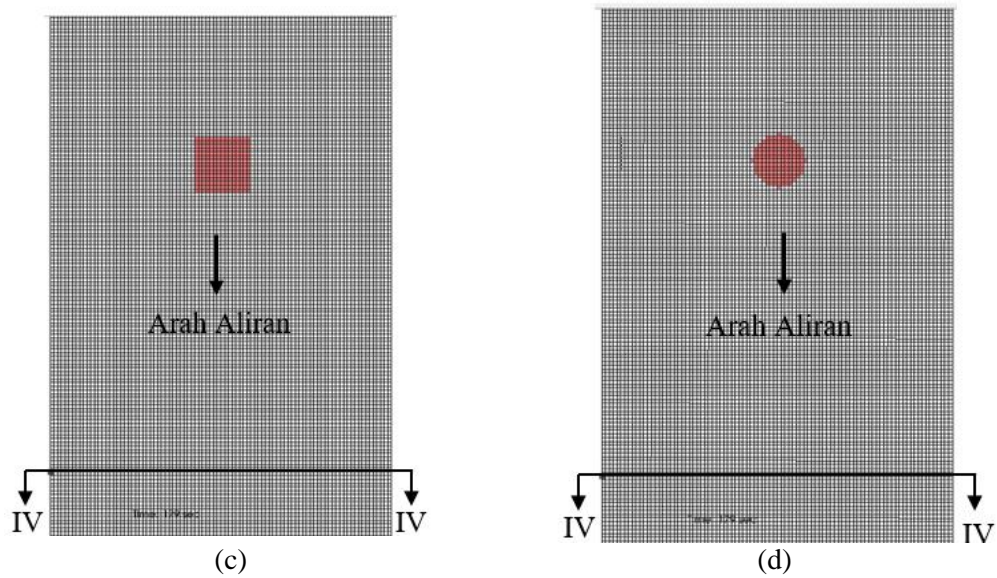
Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkaran), karakteristik gerusan yang terjadi antara pemodelan fisik maupun pemodelan dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* baik pilar persegi maupun pilar lingkaran mempunyai pola gerusan yang tidak jauh berbeda.

Jika lebar pilar 0,0762 m dan tinggi muka air sebesar 0,0175 m, maka dari Gambar 5.30 dan 5.31 dapat diketahui perbandingan persentase kedalaman gerusan dan sedimentasi terhadap lebar pilar dan tinggi muka air untuk kedua pilar dengan model numerik dan model fisik. Kedalaman gerusan pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,010 m dan 0,023 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 12,62% dan 30,18%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 54,95% dan 131,42%. Kedalaman gerusan pada pilar lingkaran dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar

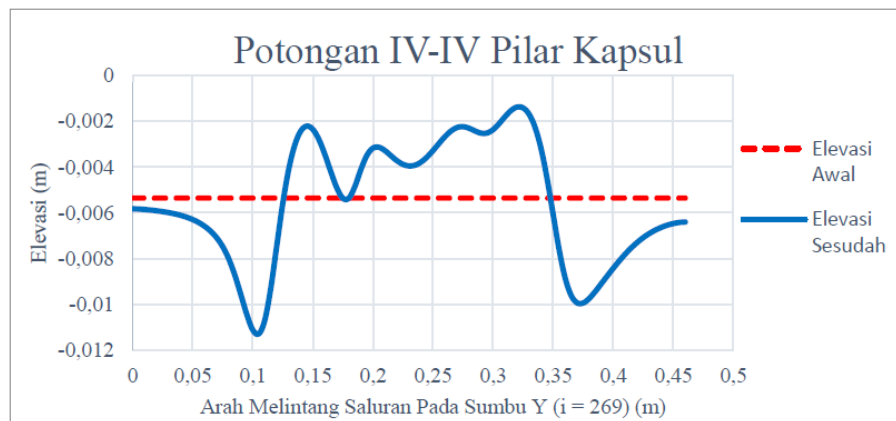
0,0105 m dan 0,0140 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 13,73% dan 18,37%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 59,78% dan 79,99%. Sedimentasi yang terjadi pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,005 m dan 0,004 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 6,06% dan 5,25%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 26,37% dan 22,87%. Sedimentasi pada pilar lingkaran dengan model numerik sebesar 0,0054 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 7,11%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 30,98%. Pada pilar lingkaran dengan model fisik tidak terdapat sedimentasi.

4. Tinjauan potongan IV-IV pada hilir pilar 2

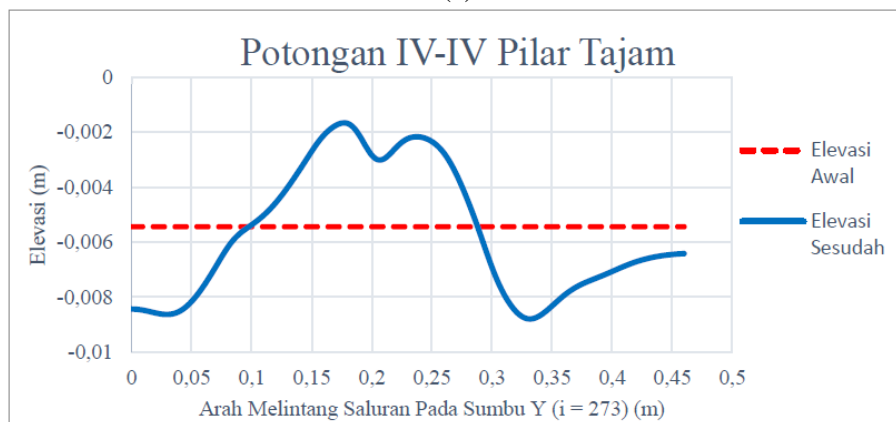




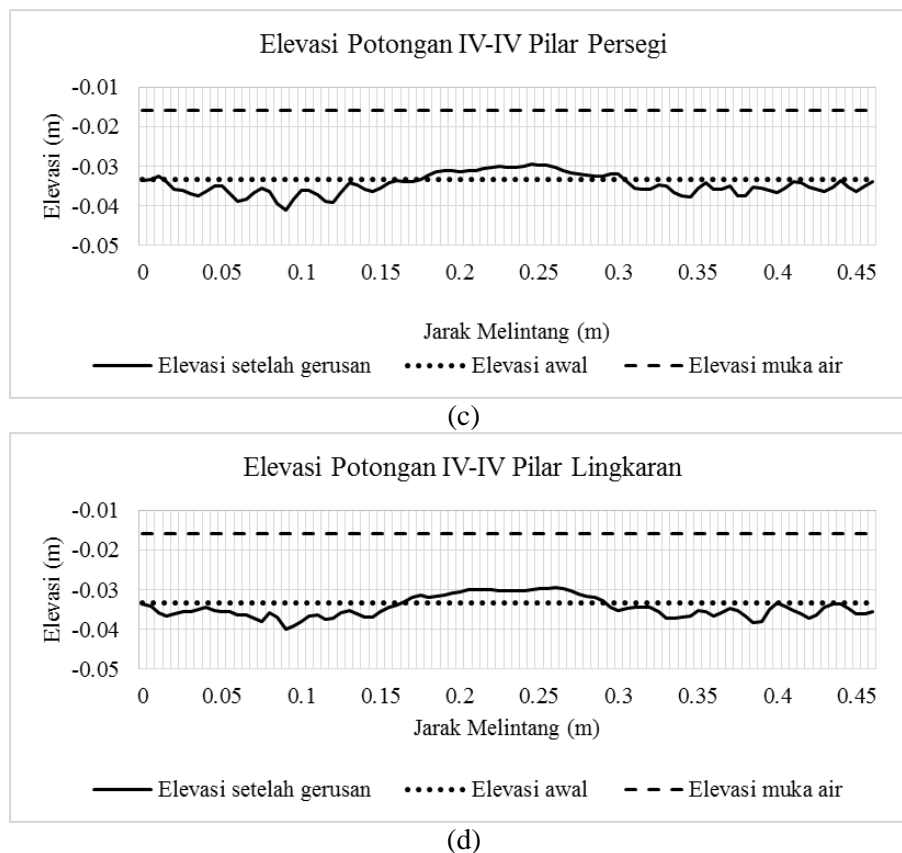
Gambar 5. 26 Potongan IV-IV pada hilir 2 pilar bentuk (a) pilar kapsul (b) pilar tajam (c) pilar persegi (d) dan pilar lingkaran



(a)



(b)



Gambar 5. 27 Elevasi dasar saluran pada potongan IV-IV pada masing-masing pilar dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0*

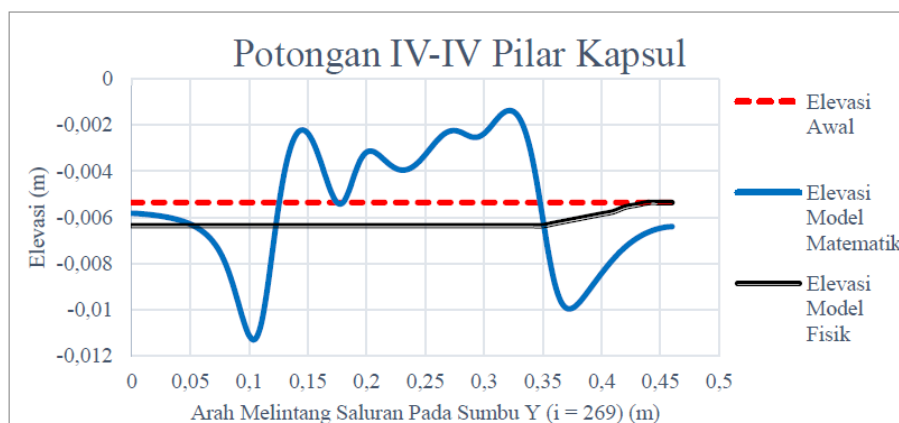
Potongan IV-IV merupakan potongan melintang saluran pada *grid* $i = 187$ atau pada jarak 41 cm dari pilar (untuk pilar jembatan bentuk persegi dan lingkaran) serta *grid* $i = 273$ (untuk pilar jembatan bentuk tajam) dan juga *grid* $i = 269$ (untuk pilar jembatan bentuk kapsul). Gambar 5.27 menunjukkan elevasi gerusan pada masing-masing pilar menggunakan *software iRIC: Nays2DH 1.0*.

Pada aliran subkritik (pilar kapsul dan tajam), pada pilar jembatan bentuk tajam terjadi penurunan elevasi dasar saluran di bagian kiri dan kanan saluran dan penurunan elevasi tertinggi terjadi pada sisi kiri pilar. Untuk pilar jembatan bentuk kapsul terjadi penurunan elevasi dasar saluran yang didominasi di bagian kanan dan kiri saluran dan di bagian tengah saluran juga mengalami penurunan elevasi dasar saluran.

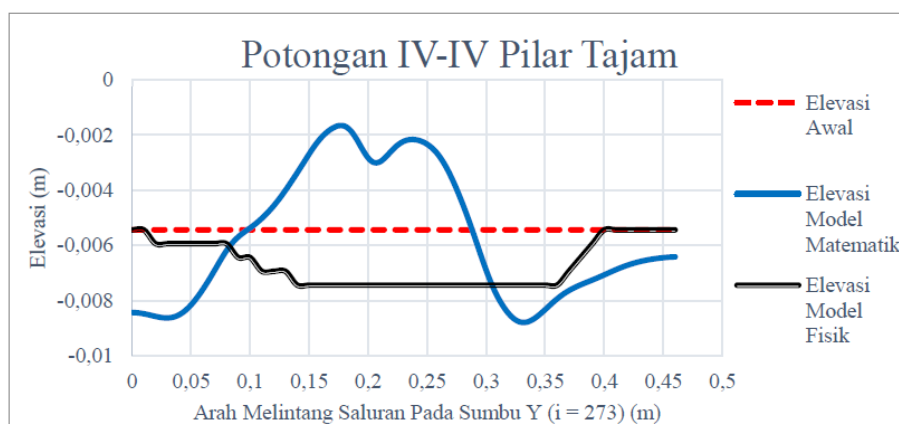
Pada aliran superkritik (pilar persegi dan lingkaran), pada potongan IV-IV yang terdapat pada hilir pilar 2 ini gerusan yang terjadi pada saluran dengan pilar

persegi maupun saluran dengan pilar lingkaran dan sedimentasi yang terjadi cenderung sama. Hal ini terjadi karena aliran air pada titik ini sudah mulai normal kembali.

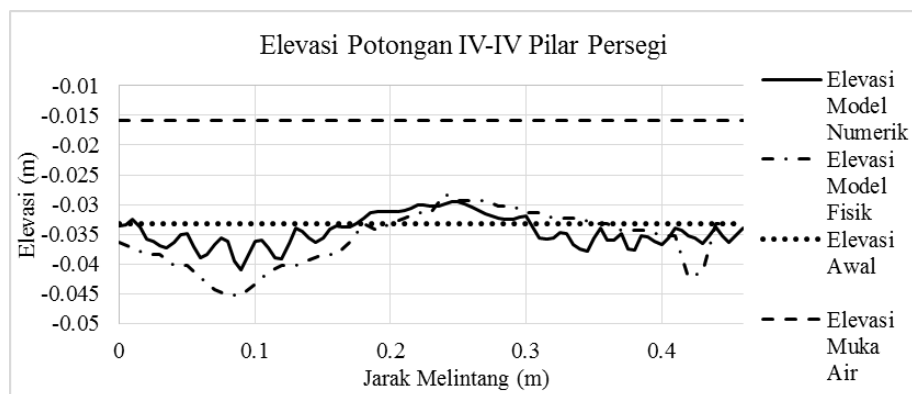
Gambar 5.28 menunjukkan elevasi gerusan grafik hasil penelitian model fisik dan matematik pada masing-masing pada potongan IV-VI di hilir 2 pilar.

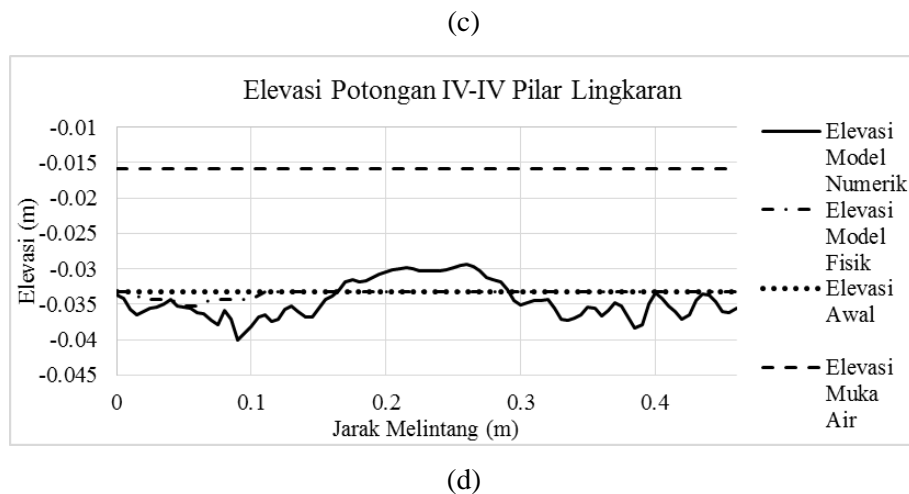


(a)



(b)





Gambar 5. 28 Grafik elevasi dasar saluran potongan IV-IV hilir 2 pilar jembatan hasil penelitian model fisik dan matematik

Pada aliran superkritik (pilar kapsul dan tajam), dari hasil simulasi dengan software *iRIC: Nays2DH 1.0* yang dibandingkan dengan hasil pengujian model fisik di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Yogyakarta adalah penurunan elevasi kedalaman gerusan pada ke dua model relatif sama dengan mempunyai perbedaan kedalaman sekitar 0,001 m untuk pilar bentuk tajam dan 0,005 m untuk pilar bentuk kapsul, sedangkan untuk kenaikan elevasi dasar saluran pada model matematik terjadi kenaikan tetapi pada model fisik tidak terjadi kenaikan elevasi. Untuk pola gerusan pada kedua model juga berbeda.

Pada aliran subkritik (pilar persegi dan lingkaran), dari Gambar 5.28 dapat diketahui bahwa karakteristik gerusan pada pilar persegi baik yang menggunakan model fisik maupun dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* tidak jauh berbeda, namun gerusan yang terjadi pada pilar lingkaran dengan model fisik dan dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* jauh berbeda. Pada simulasi dengan *software iRIC: Nays2DH 1.0* karakteristik gerusan pada pilar lingkaran terjadi gerusan dan sedimentasi yang cukup besar, namun pada model fisik gerusan yang terjadi pada pilar lingkaran hanya sedikit. Jika lebar pilar 0,0762 m dan tinggi muka air sebesar 0,0175 m, maka dari Gambar 5.37 dan 5.38 dapat diketahui perbandingan persentase kedalaman gerusan dan sedimentasi terhadap lebar pilar dan tinggi

muka air untuk kedua pilar dengan model numerik dan model fisik. Kedalaman gerusan pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,0077 m dan 0,012 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 10,05% dan 15,74%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 43,74% dan 68,55%. Kedalaman gerusan pada pilar lingkaran dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,0067 m dan 0,0020 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 8,79% dan 2,62%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 38,28% dan 11,41%. Sedimentasi yang terjadi pada pilar persegi dengan model numerik dan fisik masing-masing sebesar 0,0037 m dan 0,005 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar didapatkan persentase sebesar 4,90% dan 6,57%, sedangkan jika dibandingkan dengan tinggi muka air maka didapatkan persentase sebesar 21,34% dan 28,59%. Sedimentasi pada pilar lingkaran dengan model numerik sebesar 0,0039 m, maka jika dibandingkan dengan lebar pilar dan tinggi muka air didapatkan persentase sebesar 5,09% dan 22,15%. Pada pilar lingkaran dengan model fisik tidak terdapat sedimentasi.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan data serta hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan pada pilar jembatan berbentuk kapsul dan tajam (aliran subkritik) serta persegi dan lingkaran (aliran superkritik), maka dapat disimpulkan hasil sebagai berikut:

1. Berdasarkan simulasi dengan *software iRIC : Nays2DH 1.0* didapatkan hasil :
 - a. Pada *output velocity* (ms-1), bentuk pilar jembatan yang mempunyai kecepatan paling besar di sekitar pilar adalah pilar bentuk tajam.
 - b. Pada *output arrow velocity* (ms-1), bentuk pilar jembatan yang mempunyai pola turbulensi aliran paling kecil disekitar pilar adalah pilar bentuk kapsul.
 - c. Pada *output elevation* (m), bentuk pilar jembatan yang mempunyai gerusan paling kecil di sekitar pilar jembatan adalah pilar bentuk kapsul.
 - d. Pada *output velocity* (ms-1) menggunakan skala yang sama antar ke dua pilar jembatan, bentuk pilar jembatan yang mempunyai kecepatan paling besar di sekitar pilar adalah pilar jembatan bentuk lingkaran.
 - e. Pada *output streamline* menggunakan skala yang sama antar ke dua pilar jembatan, bentuk pilar jembatan yang mempengaruhi pola turbulensi aliran paling kecil disekitar pilar adalah pilar jembatan bentuk lingkaran.
 - f. Pada *output elevation*(m) menggunakan skala yang sama antar ke dua pilar jembatan, bentuk pilar jembatan yang mempunyai gerusan paling kecil di sekitar pilar jembatan adalah pilar bentuk lingkaran. Analisa tersebut diperkuat dengan tinjauan grafik pada 4 potongan melintang.
2. Berdasarkan hasil perbandingan antara analisa model matematik menggunakan *software iRIC : Nays2DH 1.0* dengan analisa model fisik didapatkan hasil :
 - a. Pada *output velocity* (ms-1) antara model fisik dan model matematik mempunyai perbedaan yang relatif kecil.
 - b. Pada *output arrow velocity* (ms-1) antara model fisik dan model matematik mempunyai pola aliran yang hampir sama.

- c. Pada *output elevation* (m) antara model fisik dan model matematik mempunyai perbedaan kedalaman elevasi yang relatif kecil baik di hulu, tengah dan hilir pilar jembatan dengan perbedaan yang paling tinggi sekitar 0,027 m dan untuk pola gerus juga berbeda.
- d. Pada *output velocity* (ms-1) antara model fisik dan model numerik mempunyai perbedaan yang relatif kecil.
- e. Pada *output streamline* antara model fisik dan model numerik mempunyai pola aliran yang hampir sama.
- f. Pada *output elevation* (m) antara model fisik dan model numerik pada bagian hulu dan tengah pilar terdapat perbedaan, sedangkan pada hilir pilar elevasi gerusan yang terjadi antara model fisik dan numerik hampir sama.

B. Saran

Karena penelitian ini merupakan penelitian awal dalam analisa pengaruh bentuk pilar terhadap gerusan lokal menggunakan *software iRIC Nays2DH 1.0* dan penelitian tahap pertama dalam membandingkan hasil analisa dengan penelitian model fisik, maka ada beberapa saran untuk memperlengkap penelitian ini, diantaranya sebagai berikut :

1. Sebaiknya pada model numerik angka koefisien *manning* di sekitar pilar diubah sehingga pola gerusan pada hulu dan tengah pilar yang di dapatkan dari model numerik dan fisik sama.
2. Pada *running* dengan pemodelan dengan *software iRIC:Nays2DH 1.0* debit yang digunakan sebaiknya debit *unsteady* supaya sesuai dengan kondisi di sungai yang mempunyai debit *unsteady*.
3. Dilaksanakannya penelitian lanjutan mengenai perkembangan kedalaman gerusan terhadap waktu di sekitar pilar dengan bentuk pilar yang berbeda.
4. Perlu adanya variasi data, seperti gradasi sedimen, merubah aliran menjadi tidak seragam.