

**ANALISIS KOMPUTASI FLUIDA DINAMIS
BANGUNAN PEREDAM ENERGI BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA PROVINSI JAWA TENGAH**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK PENGAIRAN
MINAT MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Magister Teknik**



**FRIKA DEDDY SOFYAN
NIM. 156060400011021**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**



LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS KOMPUTASI FLUIDA DINAMIS
BANGUNAN PEREDAM ENERGI BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA PROVINSI JAWA TENGAH

TESIS

PROGRAM MAGISTER TEKNIK PENGAIRAN
MINAT MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



FRIKA DEDDY SOFYAN
NIM. 156060400011021

Tesis ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 7 Februari 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Very Dermawan, ST., MT.
NIP. 19730217 199903 1 001

Emma Yuliani ST., MT., Ph.D.
NIP. 19750723 200003 2 001

Mengetahui
Ketua Program Magister Teknik Pengairan

Dr. Eng. Donny Harisuseno, ST., MT.
NIP. 19750227 199903 1 001



IDENTITAS TIM PENGUJI

JUDUL TESIS:

**ANALISIS KOMPUTASI FLUIDA DINAMIS
BANGUNAN PEREDAM ENERGI BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA PROVINSI JAWA TENGAH**

Nama Mahasiswa : Frika Deddy Sofyan

NIM : 156060400011021

Program Studi : Magister Teknik Pengairan

Minat : Manajemen Sumber Daya Air

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Dr. Very Dermawan, ST., MT.

Anggota : Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dian Sisingsih, ST., MT., Ph.D.

Dosen Penguji II : Dr. Sumiadi, ST., MT.

Tanggal Ujian : 7 Februari 2018

SK Penguji : Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik

Universitas Brawijaya Nomor : 288 Tahun 2018

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas dalam naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 Maret 2018

Mahasiswa,

Frika Deddy Sofyan
NIM. 156060400011021



plagiarism-detector
Cutting-edge class tool for plagiarism detection and prevention.

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
PASCASARJANA

18-0085 T

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI
Nomor: 325/UN10.F40/PN/2018
Sertifikat ini diberikan kepada:

Nama : Frika Deddy Sofyan
NIM : 156060400011021
Program Studi : Program Magister Teknik Sumber Daya Air
Fakultas : Fakultas Teknik
Universitas : Universitas Brawijaya

Dengan Judul Tesis
**Analisa Komputasi Fluida Dinamis Bangunan Peredam Energi Bendungan
Randugunting Kabupaten Blora Provinsi Jawa Tengah**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya secara online pada tanggal **22 Januari 2018**
dan dinyatakan **bebas plagiasi** dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$.

Malang, 29 Januari 2018
Ketua Badan Penerbitan Jurnal

Dr. Abdul Hakim, M.Si
NIP. 196410202 198503 1 006

Lukman Hakim, SSI, M.Sc, Dr.Sc.
NIP. 19820412 200312 1 002



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Frika Deddy Sofyan, lahir di kota Malang, 27 Nopember 1978, anak sulung dari 2 (dua) bersaudara. Melalui masa pendidikan di Kabupaten Bojonegoro dan Kota Malang. SD Negeri Kauman I Bojonegoro, SMP Negeri 1 Bojonegoro, SMU Negeri 1 Bojonegoro, dan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang. Bekerja sebagai Pegawai Negeri Sipil di lingkungan Pemerintah Kabupaten Bojonegoro sejak tahun 2010 sampai dengan sekarang. Mendapatkan kesempatan emas mengikuti pendidikan S-2 dengan beasiswa dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Tahun 2016 pada Program Studi Magister Teknik Pengairan Minat Manajemen Sumber Daya Air Fakultas Teknik Universitas Brawijaya di Kota Malang. Alamat email: frikadesof@gmail.com.

2018

Malang, 26 Maret

Penulis





Al-hamdulillāhi rabbil-‘ālamīn,
puji syukur atas segala episode kehidupan yang luar biasa
di 20160229 sampai 20180207.

teruntuk: Papa dan Mama yang selalu mendukungku dan merestuiku,
Ibu dan (Alm.) Bapak yang memberikan arti tentang hidup,
Hermin Puri Indriasari sebagai istri yang selalu menguatkan (*ti amo*),
Zytka, Zakiyyah dan Zafran anak-anakku yang membuatku semangat.

RINGKASAN

Frika Deddy Sofyan, Jurusan Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2018, “ANALISA KOMPUTASI FLUIDA DINAMIS BANGUNAN PEREDAM ENERGI BENDUNGAN RANDUGUNTING KABUPATEN BLORA PROVINSI JAWA TENGAH”, Dosen Pembimbing: Very Dermawan dan Emma Yuliani.

Pembangunan Bendungan Randugunting merupakan suatu alternatif dalam rangka pemenuhan kebutuhan air irigasi, air baku, pembangkit tenaga listrik, dan pengendalian banjir di Kabupaten Blora sekaligus sebagai upaya konservasi sumber daya air. Desain bangunan pelimpah menggunakan model *side-channel spillway* (pelimpah samping) dengan tipe ambang pelimpah *ogee*. Khusus untuk bagian bangunan peredam energi, secara teknis direncanakan berdasarkan debit banjir rancangan Q_{100} dan dikontrol dengan mengalirkan debit banjir Q_{1000} dan Q maksimum yang mungkin terjadi (Q_{PMF}).

Kajian ini bertujuan memberikan pemahaman yang lebih rinci berdasarkan model numerik berbasis CFD tentang variasi pola perilaku hidrolika yang terjadi di bangunan peredam energi, akibat variasi perubahan elevasi dasar kolam olakan dan panjang kolam olakan.

Dari hasil FLOW-3D hasil verifikasi dari model numerik dibandingkan dengan model fisik mempunyai kemiripan dan *trend* yang sama. Di ketahui bahwa perbedaan yang signifikan terjadi pada data hasil perhitungan kecepatan dengan debit bangkitan Q_{1000} dengan nilai sekitar 28,93% dan data data berikutnya di sepanjang saluran peluncur tidak ada yang mempunyai selisih kurang dari 10%. Namun secara keseluruhan performa model numerik dengan kondisi batas dan kondisi awal cukup baik dengan ditandai selisih di titik-titik awal saluran peluncur <10% untuk variabel V , H dan bilangan Froude.

Alternatif desain bangunan peredam energi yang direkomendasikan berdasarkan analisa model numerik berbasis CFD yaitu: bangunan peredam energi mempunyai elevasi dasar kolam olakan +63 m dengan panjang kolam olakan 31 m. Hasil analisa bangunan tersebut mempunyai efisiensi peredaman saat debit Q_{100} adalah 46,45%, debit Q_{1000} adalah 44,11% dan debit Q_{PMF} adalah 64,25%. Di bagian saluran *escape channel* terjadi aliran sub kritis dengan bilangan Froude 0,14 untuk debit Q_{100} ; 0,12 untuk debit Q_{1000} dan 0,37 untuk debit Q_{PMF} . Loncatan hidrolik yang terjadi adalah tipe B (awal loncatan hidrolik di bidang miring bagian saluran peluncur 15,036 m sebelum sudut lantai dan akhir loncatan di dalam kolam olak sejauh 15,404 m setelah sudut lantai) dengan panjang loncatan hidrolik 30,440m.

Kata Kunci: bangunan peredam energi, FLOW-3D, CFD

SUMMARY

Frika Deddy Sofyan, Irrigation Majors, Technique Faculty of Brawijaya University, 2018, January. **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC ANALYSIS OF THE STILLING BASIN AT RANDUGUNTING DAMS, BLORA DISTRICT PROVINCE OF CENTRAL JAVA.** Mentor: Very Dermawan and Emma Yuliani

Construction of Randugunting dams is an alternative in order to fulfill the water demand of irrigation, fresh water, electricity and flood control in Blora District as the conservation of water resources. Design of spillway is side-channel spillway with ogee type. For the stilling basin, it is based on flood discharge design Q_{100} and controlled by flood discharge design Q_{1000} and Q probably maximum flood (Q_{PMF}).

The aim of this study is to describe a detail of numerical model based on CFD about hydraulics patterns of stilling basin caused by variation of both elevations and longs. The result from numerical model verification FLOW-3D which is compared with physics model have the similary trend. From the calibration result is found that the significant differences appear in analzy of velocity at Q_{1000} which about 28,93%, while another analyse gives as it expected with the differences about less than 10%. For overall, a good performance of numerical model has shown in boundary and early condition with the differences about less than 10% for the variable of V , H and Froude number.

Alternative design of stilling basin that recommended based on analysis of numerical model CFD are: stilling basin with the elevation +63 m and longs about 31 m. From the analysis found that the result of efficiency of energy dissipation is about 46,45% at Q_{100} , 44,11% at Q_{1000} and 64,25% at Q_{PMF} . Sub-critical flows happened in the escape channel with the Froude number 0,14 for Q_{100} ; 0,12 for Q_{1000} dan 0,37 for Q_{PMF} . The B type of hydraulic jump occured which is toe position in chute slope with 15,036 m distance from kink. The total of hydraulic jump lengs is 30,440m.

Keywords: stilling basin, FLOW-3D, CFD

PENGANTAR

Al-hamdulillahi rabbil-‘alamin, banyak nikmat yang Allah berikan, tetapi sedikit sekali yang kita ingat. Segala puji hanya layak untuk Allah, Tuhan seru sekalian alam atas segala berkat, rahmat, taufik, serta hidayah-Nya yang tiada terkira besarnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “ANALISIS KOMPUTASI FLUIDA DINAMIS BANGUNAN PEREDAM ENERGI BENDUNGAN RANDUGUNTING KABUPATEN BLORA PROVINSI JAWA TENGAH” ini dengan lancar.

Dalam penyusunannya, penulis memperoleh banyak bantuan dari berbagai pihak, karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada: Keluarga tercinta atas dukungan, motivasi dan doa demi kelancaran penyelesaian tesis ini. Dari sanalah semua kesuksesan ini berawal, semoga semua ini bisa memberikan sedikit kebahagiaan dan menuntun pada langkah yang lebih baik lagi. Bapak Dr. Very Dermawan, ST., MT dan Ibu Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing serta Bapak Dian Sisinggih, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dr. Sumiadi, ST., MT selaku dosen penguji tesis atas segala masukannya sebagai tambahan ilmu bagi penulis. Semua pihak yang telah membantu dalam bentuk tenaga, pikiran maupun motivasi sehingga karya tulis ini dapat terselesaikan dengan baik.

Meskipun penulis berharap isi dari tesis ini bebas dari kekurangan dan kesalahan, namun selalu ada yang kurang. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran yang membangun guna menjadi bekal pengalaman bagi penulis untuk lebih baik di masa yang akan datang. Akhir kata, mengutip sebuah *motto* dari Wiebe de Witte, “*As ‘t net kin sa’t moat, dan moat it mar sa it kin*” (*If it cannot go as it should, then it should go as it could*).

Malang, Februari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR SIMBOL DAN ISTILAH	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Rumusan masalah	3
1.5 Maksud dan Tujuan	3
1.6 Penelitian Terdahulu.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Analisa hidrolika pada bangunan peredam energi.....	5
2.1.1 Peredam Energi Tipe Loncatan (<i>Water Jump Type</i>).....	5
2.1.2 Peredam Energi Tipe Kolam Olak (<i>Stilling Basin Type</i>).....	5
2.1.3 Peredam Energi Tipe Bak Pular (<i>Roller Bucket Type</i>).....	8
2.2 Loncatan Hidrolik.....	9
2.2.1 Tinggi loncatan	11
2.2.2 Kehilangan energi	12
2.2.3 Efisiensi	12
2.2.4 Panjang loncatan hidrolik	13
2.3 Loncatan Miring	14
2.4 CFD (<i>Computational Fluids Dynamic</i>)	16
2.5 Perangkat Lunak	16
2.5.1 Sistem Koordinat dan <i>Mesh</i>	17
2.5.2 Persamaan kontinuitas masa	18
2.5.3 Persamaan Momentum	18
2.5.4 Nilai kekasaran permukaan.....	19
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Lokasi Daerah Studi	21
3.2 Data perencanaan prototipe	22
3.3 Fasilitas Pengujian.....	28
3.4 Konstruksi Model	28
3.5 Tahapan dan Rancangan Pengujian	29
3.6 Kinerja model fisik	33
BAB IV HASIL ANALISIS & PEMBAHASAN	37
4.1 Model numerik	37
4.2 Penyesuaian parameter di model numerik.....	38
4.2.1 Nilai kekasaran permukaan.....	38
4.2.2 Vektor kecepatan	39
4.2.3 Tekanan air dan udara	39

4.3	Verifikasi	39
4.3.1	Hasil analisa numerik tentang kecepatan.....	44
4.3.2	Hasil analisa numerik tentang kedalaman aliran	49
4.3.3	Hasil analisa numerik tentang bilangan Froude.....	53
4.3.4	Rekapitulasi hasil model numerik seri E ₁ -L ₁	58
4.3.5	Performa model numerik seri E ₁ -L ₁	58
4.4	Hasil Analisa Model Numerik.....	59
4.4.1	Analisa Kecepatan	59
4.4.2	Analisa Kedalaman Aliran.....	79
4.4.3	Analisa Bilangan Froude	85
4.5	Penentuan Panjang Loncatan.....	104
4.5.1	Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L ₁	104
4.5.2	Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L ₂	107
4.5.3	Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L ₃	110
4.6	Efisiensi Peredam Energi.....	113
BAB 5 PENUTUP.....		117
5.1	Kesimpulan.....	117
5.2	Saran	118

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Beberapa persamaan panjang loncatan hidrolik dari peneliti terdahulu.....	13
Tabel 3.1	Tabulasi Kondisi Hidrologis Pelimpah Bendungan Randugunting.....	22
Tabel 3.2	Data Teknis Bendungan Randugunting.....	22
Tabel 3.3	Variasi panjang loncatan hidrolik (L_j) dari peneliti terdahulu.....	30
Tabel 3.4	Variasi perlakuan model.....	31
Tabel 3.5	Performa kolam olakan pada uji model fisik dengan debit Q_{100}	34
Tabel 3.6	Efisiensi kehilangan energi di kolam olak dengan debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF}	35
Tabel 4.1	Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{100}	40
Tabel 4.2	Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{1000}	41
Tabel 4.3	Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{PMF}	42
Tabel 4.4	Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{100}	45
Tabel 4.5	Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{1000}	47
Tabel 4.6	Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{PMF}	48
Tabel 4.7	Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{100}	50
Tabel 4.8	Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{1000}	51
Tabel 4.9	Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{PMF}	53
Tabel 4.10	Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{100}	54
Tabel 4.11	Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{1000}	56
Tabel 4.12	Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{PMF}	57
Tabel 4.13	Rekapitulasi hasil nilai kecepatan perhitungan FLOW-3D untuk seri E_1-L_1	58
Tabel 4.14	Rekapitulasi hasil nilai kedalaman air perhitungan FLOW-3D untuk seri E_1-L_1	58
Tabel 4.15	Rekapitulasi hasil bilangan Froude perhitungan FLOW-3D untuk seri E_1-L_1	58
Tabel 4.16	Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L_1).....	63
Tabel 4.17	Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L_2).....	70
Tabel 4.18	Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 53 m (L_3).....	77
Tabel 4.19	Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L_1).....	79
Tabel 4.20	Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L_2).....	81
Tabel 4.21	Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65m dengan model panjang kolam olakan 53 m (L_3).....	83
Tabel 4.22	Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L_1).....	88
Tabel 4.23	Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L_2).....	95

Tabel 4.24	Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 53 m (L_3).....	102
Tabel 4.25	Perbandingan energi yang hilang akibat loncatan dengan energi sebelum loncatan.....	113



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bentuk lengkungan pada peredam energi tipe loncatan	5
Gambar 2.2	Bentuk kolam olak datar tipe I.....	6
Gambar 2.3	Bentuk kolam olak datar tipe II	6
Gambar 2.4	Bentuk kolam olak datar tipe III.....	7
Gambar 2.5	Bentuk kolam olak datar tipe IV.....	7
Gambar 2.6	Peredam energi tipe bak pusran	8
Gambar 2.6	Peredam energi tipe bak pusran	8
Gambar 2.7	Sketsa loncatan hidrolik.....	9
Gambar 2.8	Hubungan percobaan antara F , D_3/D_1 , dan h/D_1 untuk peninggian mendadak	11
Gambar 2.9	Bentuk dari loncatan hidrolik.....	11
Gambar 2.10	Tipe aliran loncatan miring.....	15
Gambar 2.11	Skema arah aliran kecepatan pada loncatan B.....	15
Gambar 2.12	Variasi dari dimensi mesh yang dihasilkan dari FAVOR.....	17
Gambar 2.13	<i>Mesh</i> dan aturan penamaannya serta lokasi variabel dalam <i>mesh cell</i>	18
Gambar 3.1	Sketsa Lokasi Bendungan Randugunting Kabupaten Blora	21
Gambar 3.2	Gambar teknis Bendungan dan model tes.....	23
Gambar 3.3	Denah situasi pelimpah.....	24
Gambar 3.4	Potongan memanjang sistem pelimpah dan peredam energi	25
Gambar 3.5	Denah dan potongan bangunan peredam energi	26
Gambar 3.6	Bangunan model fisik peredam energi Bendungan Randugunting.....	27
Gambar 3.7	Diagram Alir Pengerjaan Tesis.....	29
Gambar 3.8	Diagram alir proses analisa menggunakan <i>CFD</i>	30
Gambar 3.9	Histogram nilai L_j dari peneliti terdahulu	31
Gambar 4.1	Potongan memanjang model desain final bangunan peredam energi.....	37
Gambar 4.2	Model numerik FLOW-3D seri E_1-L_1 dan kondisi batasnya.....	37
Gambar 4.3	Hasil <i>mesh</i> FAVOR model numerik Seri E_1-L_1	38
Gambar 4.4	Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{100}	40
Gambar 4.5	Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{1000}	42
Gambar 4.6	Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{PMF}	43
Gambar 4.7	Kecepatan aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{100}	44
Gambar 4.8	Grafik profil kecepatan merata di tengah penampang pada Q_{100}	44
Gambar 4.9	Kecepatan aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{1000}	46
Gambar 4.10	Grafik profil kecepatan merata di tengah penampang pada Q_{1000}	46
Gambar 4.11	Kecepatan aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{PMF}	47
Gambar 4.12	Grafik profil kecepatan merata di tengah penampang pada Q_{PMF}	48
Gambar 4.13	Kedalaman aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{100}	49
Gambar 4.14	Grafik profil kedalaman aliran pada Q_{100}	49
Gambar 4.15	Kedalaman aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{1000}	50
Gambar 4.16	Grafik profil kedalaman aliran pada Q_{1000}	51
Gambar 4.17	Kedalaman aliran pada seri E_1-L_1 pada Q_{PMF}	52
Gambar 4.18	Grafik profil kedalaman pada Q_{PMF}	52
Gambar 4.19	Bilangan Froude pada seri E_1-L_1 pada Q_{100}	53
Gambar 4.20	Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{100}	54
Gambar 4.21	Bilangan Froude pada seri E_1-L_1 pada Q_{1000}	55
Gambar 4.22	Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{1000}	55
Gambar 4.23	Bilangan Froude pada seri E_1-L_1 pada Q_{PMF}	56
Gambar 4.24	Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{PMF}	57

Gambar 4.25	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₂ -L ₁	59
Gambar 4.26	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₂ -L ₁	60
Gambar 4.27	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₂ -L ₁	60
Gambar 4.28	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₃ -L ₁	61
Gambar 4.29	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₃ -L ₁	61
Gambar 4.30	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₃ -L ₁	62
Gambar 4.31	Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 31m	64
Gambar 4.32	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₁ -L ₂	65
Gambar 4.33	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₁ -L ₂	65
Gambar 4.34	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₁ -L ₂	66
Gambar 4.35	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₂ -L ₂	66
Gambar 4.36	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₂ -L ₂	67
Gambar 4.37	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₂ -L ₂	67
Gambar 4.38	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₃ -L ₂	68
Gambar 4.39	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₃ -L ₂	68
Gambar 4.40	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₃ -L ₂	69
Gambar 4.41	Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 39m	71
Gambar 4.42	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₁ -L ₃	72
Gambar 4.43	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₁ -L ₃	72
Gambar 4.44	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₁ -L ₃	73
Gambar 4.45	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₂ -L ₃	73
Gambar 4.46	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₂ -L ₃	74
Gambar 4.47	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₂ -L ₃	74
Gambar 4.48	Profil kecepatan Q_{100} pada E ₃ -L ₃	75
Gambar 4.49	Profil kecepatan Q_{1000} pada E ₃ -L ₃	75
Gambar 4.50	Profil kecepatan Q_{PMF} pada E ₃ -L ₃	76
Gambar 4.51	Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 53m	78
Gambar 4.52	Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolam Olakan 31m	80
Gambar 4.53	Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolam Olakan 39m	82
Gambar 4.54	Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolam Olakan 53m	84
Gambar 4.55	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₂ -L ₁	85
Gambar 4.56	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₂ -L ₁	85
Gambar 4.57	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₂ -L ₁	86
Gambar 4.58	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₃ -L ₁	86
Gambar 4.59	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₃ -L ₁	87
Gambar 4.60	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₃ -L ₁	87
Gambar 4.61	Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolam Olakan 31m	89
Gambar 4.62	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₁ -L ₂	90
Gambar 4.63	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₁ -L ₂	90
Gambar 4.64	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₁ -L ₂	91
Gambar 4.65	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₂ -L ₂	91
Gambar 4.66	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₂ -L ₂	92
Gambar 4.67	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₂ -L ₂	92
Gambar 4.68	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₃ -L ₂	93
Gambar 4.69	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₃ -L ₂	93
Gambar 4.70	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₃ -L ₂	94
Gambar 4.71	Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolam Olakan 39m	96
Gambar 4.72	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E ₁ -L ₃	97
Gambar 4.73	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E ₁ -L ₃	97
Gambar 4.74	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E ₁ -L ₃	98

Gambar 4.75	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E_2-L_3	98
Gambar 4.76	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E_2-L_3	99
Gambar 4.77	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E_2-L_3	99
Gambar 4.78	Profil bilangan Froude Q_{100} pada E_3-L_3	100
Gambar 4.79	Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E_3-L_3	100
Gambar 4.80	Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E_3-L_3	101
Gambar 4.81	Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolam Olakan 53m.....	103
Gambar 4.82	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_1-L_1	104
Gambar 4.83	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_2-L_1	105
Gambar 4.84	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_3-L_1	106
Gambar 4.85	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_1-L_2	107
Gambar 4.86	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_2-L_2	108
Gambar 4.87	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_3-L_2	109
Gambar 4.88	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_1-L_3	110
Gambar 4.89	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_2-L_3	111
Gambar 4.90	Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E_3-L_3	112
Gambar 4.91	Grafik perbandingan energi yang hilang akibat loncatan dengan energi sebelum loncatan.....	114





DAFTAR SIMBOL DAN ISTILAH

VARIABEL

Besaran dasar

Perbandingan luas terbuka dengan luas teraliri

Kedalaman hidrolis

Luas dari permukaan sumber di *cell*

Aliran massa (debit)

Energi spesifik

Bilangan Froude

Percepatan viskositas

Body Accelerations

Percepatan gravitasi

Kedalaman aliran

Panjang loncatan hidrolis

Kekasaran permukaan

Konstanta Manning

Tekanan

Komponen kecepatan aliran

Kecepatan aliran rata-rata di penampang

Perbandingan volume terbuka terhadap aliran fluida

Koordinat *cartesian*

Berat jenis fluida

Satuan

Simbol

A_x, A_y, A_z

D

dA

m^3/dt

Q

m

E_s

F

m/dt^2

f_x, f_y, f_z

m/dt^2

G_x, G_y, G_z

m/dt^2

g

m

h

m

L_j

m

k

n

Pa

P

m/dt

u, v, w

m/dt

\bar{V}

V_f

m

x, y, z

kg/m^3

ρ

NOTASI

E_1, E_2, E_3 : Elevasi dasar kolam olakan

L_1, L_2, L_3 : Panjang kolam olakan

ISTILAH

CFD : *Computational Fluids Dynamic*

TKE : *Turbulence Kinetic Energy*

RNG : *Re-Normalization Group*





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Infrastruktur, khususnya bidang Sumber Daya Air (SDA), mempunyai peranan sangat penting dan strategis dalam mendorong pertumbuhan ekonomi nasional. Pembangunan infrastruktur Sumber Daya Air tidak berdiri sendiri tetapi terkait dengan pembangunan sektor-sektor lainnya, seperti pertanian, pengendalian banjir, penyediaan air baku, energi/listrik, dan lainnya. Terkait dengan hal tersebut, wilayah Kabupaten Blora yang wilayahnya berada di sisi timur Provinsi Jawa Tengah, merupakan daerah yang relatif kering, dengan sumber air yang tersedia relatif sedikit dibandingkan dengan daerah lain di Provinsi Jawa Tengah. Dalam rangka pemenuhan kebutuhan air irigasi, air baku, pembangkit tenaga listrik dan pengendalian banjir di Kabupaten Blora, maka direncanakan pembangunan Bendungan Randugunting.

Salah satu proses kegiatan perencanaan tersebut yang lazim dilaksanakan adalah melakukan uji model hidrolika. Uji model hidrolika ini nantinya dapat memprediksi perilaku dari suatu bangunan yang akan dibuat nantinya. Beberapa kekurangan terjadi dapat diketahui sebelumnya sehingga dapat segera diantisipasi. Selain itu model ini juga dapat memberikan beberapa alternatif desain bangunan yang dianggap paling optimal.

Dalam kehidupan sehari-hari terdapat banyak ragam jenis dan karakteristik dari suatu aliran fluida yang sangat kompleks. Beberapa dekade ini dengan cepat berkembangnya keilmuan tentang teknologi komputasi dan manajemen kapasitas data, maka banyak bermunculan beberapa aplikasi perangkat lunak (*software*) sebagai alat bantu untuk memodelkan perilaku dinamik fluida. Salah satu aplikasi yang secara umum biasanya digunakan dalam bidang mekanika fluida berbasis elemen hingga serta menggunakan persamaan-persamaan fluida sering disebut dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD memprediksi perilaku dinamik fluida menggunakan perangkat komputer. Kemampuan hasil model numerik berbasis CFD sangat membantu untuk memudahkan mengenali beberapa fenomena fluida yang berkaitan dengan pola aliran, antara lain: terjadinya aliran silang, aliran memutar (*vortex*), efek degradasi-agradasi serta loncatan hidrolis. Pola aliran tersebut terkadang sangat perlu diperhatikan selain sifat-sifat aliran yang terjadi dalam proses perencanaan bangunan air agar didapatkan performa bangunan air yang paling optimum dari beberapa variasi desain. Penggunaan aplikasi CFD ini diharapkan bisa

mendukung dan memantapkan proses evaluasi dan optimasi desain yang lazimnya menggunakan model fisik di laboratorium guna tercapainya syarat-syarat keamanan bendungan yang direncanakan.

1.2 Identifikasi Masalah

Desain bangunan pelimpah di Bendungan Randugunting menggunakan model *side-channel spillway* (pelimpah samping) dengan tipe ambang pelimpah *ogee*. Khusus untuk bagian bangunan peredam energi, secara teknis direncanakan berdasarkan debit banjir rancangan Q_{100} dan dikontrol dengan mengalirkan debit banjir Q_{1000} dan Q maksimum yang mungkin terjadi (Q_{PMF}) atau dengan kata lain saat Q_{PMF} bangunan peredam energi diharapkan mempunyai performa yang baik, yaitu membuat aliran subkritis pada bagian *escape channel*.

Berdasarkan parameter-parameter desain tersebut perlu dipelajari perilaku hidrolika pada bangunan pelimpah (*spillway*), antara lain peredam energi (*stilling basin*), saluran peluncur, saluran transisi, dan pelimpah samping (*side channel*), serta pola gerusan yang terjadi di bagian hilir *stilling basin*. Setelah didekati dengan beberapa perhitungan teoritis, maka hasil tersebut diuji dengan kondisi hasil uji model yang diharapkan hasil tersebut mempunyai nilai penyimpangan yang kecil. Khusus penelitian ini menitikberatkan bahasan tentang penentuan panjang kolam olak optimum serta variasi elevasi dasar bangunan kolam olak yang penentuannya dilakukan dengan pendekatan empiris. Hasil dari perhitungan empiris tersebut diuji menggunakan model numerik guna memvalidasi dimensi yang direncanakan sesuai dengan kriteria perencanaan bangunan peredam energi yang diharapkan. Kriteria yang menjadi perhatian adalah nilai bilangan Froude di aliran bagian hilir bangunan peredam energi, panjang loncatan hidrolik yang harus terjadi di daerah kolam olak serta efisiensi loncatan hidrolik yang optimum.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dikaji dalam penelitian ini dengan tujuan bahasannya tidak menyimpang, diantaranya sebagai berikut:

1. Model fisik yang digunakan adalah *review design* dari bangunan pelimpah samping (*side channel spillway*) pada Waduk Randugunting dengan menggunakan skala *undistorsted* (horizontal dan vertikal = 1:40).
2. Menganalisa aspek hidrolika pada sistem saluran pelimpah samping (*side channel spillway*) khususnya bangunan peredam energi dengan menggunakan variabel debit banjir rancangan Q_{100} dan dikontrol dengan mengalirkan Q_{1000} dan Q_{PMF} .

3. Data analisa yang digunakan sebagai input CFD adalah data primer hasil pengukuran di laboratorium yang dilakukan oleh tim perencana.
4. Rumus empiris yang dipakai di perhitungan kajian ini disesuaikan dengan klasifikasi pedoman penggunaannya dan telah terbukti kebenarannya berdasarkan beberapa pengalaman dan metode keilmuan.

1.4 Rumusan masalah

Beberapa permasalahan yang nantinya akan dibahas pada kajian ini sebagaimana batasan masalah yang disampaikan di atas antara lain :

1. Bagaimana perilaku aliran di bangunan peredam energi saat kondisi final desain— evaluasi setelah dilakukan uji model fisik di laboratorium—ditinjau dari pendekatan dengan CFD (*Computational Fluid Dynamic*)?
2. Bagaimana alternatif yang direkomendasikan berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamic*) agar bangunan peredam energi lebih optimal ?

1.5 Maksud dan Tujuan

Kajian ini dilakukan dengan maksud untuk mempelajari perilaku hidrolika pada model uji fisik Bendungan Randugunting yang memakai sistem peredam energi kolam olakan datar USBR tipe II. Sedangkan tujuan yang ingin diperoleh adalah:

1. Memberikan gambaran seberapa besar pendekatan model numerik berbasis CFD dibandingkan model fisik.
2. Memberikan pemahaman yang lebih rinci berdasarkan model numerik berbasis CFD tentang perilaku hidrolika yang terjadi di bangunan peredam energi (*stilling basin*), akibat variasi elevasi dasar kolam olak dan panjang kolam olak.

1.6 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Tahun	Substansi Penelitian
1.	Luis G. Castillo, José M. Carrillo, Juan T. García, Antonio Viguera- Rodríguez	2014	Pengukuran aliran turbulen dan loncatan hidrolik yang terjadi pada <i>sluice gate</i> menggunakan simulasi numerik dan model fisik laboratorium. Model numerik didasarkan pada persamaan turbulen $k-\varepsilon$ dan $k-\omega$ menggunakan perangkat lunak ANSYS CFX, OpenFOAM dan FLOW-3D. Model FLOW-3D menggunakan <i>freesurface</i> dan <i>Volume Of Fluid</i> . Hasil dari penelitian ini adalah penyelesaian model

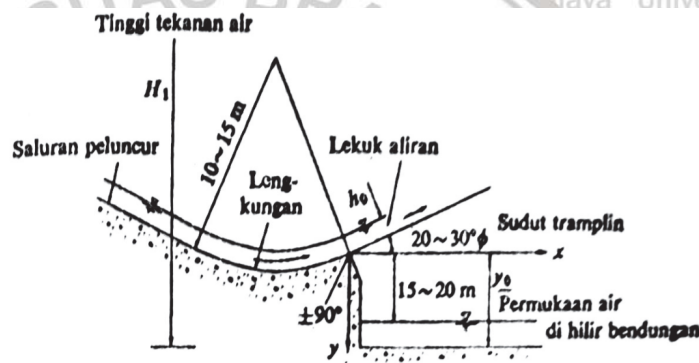
No.	Peneliti	Tahun	Substansi Penelitian
			loncatan hidrolik menggunakan persamaan turbulen $k-\varepsilon$ tidak perlu diragukan lagi.
2.	Hamidreza Babaali, Abolfazl Shamsai, Hamidreza Vosoughifar.	2014	Penyelidikan bangunan peredam energi USBR tipe II dengan variasi perubahan sudut pada dinding salurannya menggunakan persamaan turbulen $k-\varepsilon$ dan RNG (<i>Re-Normalization Group</i>) dalam aplikasi perangkat lunak FLOW-3D. Model turbulen RNG mempunyai hasil yang lebih baik dari model turbulen $k-\varepsilon$.
3.	Anggara Cahyo Wibowo	2016	Perbandingan pola hidrolika yang terjadi di model pelimpah samping (<i>side channel spillway</i>) untuk optimalisasi desain dengan hasil yang diperoleh dari CFD di Bendungan Telagawaja Bali.
4.	D. Valero, D. B. Bung, B.M. Crookston dan J. Matos.	2016	Investigasi numerik untuk performa aliran di hilir peredam energi USBR tipe III. Persamaan <i>unsteady</i> RANS digunakan bersamaan dengan teknik VOF dan RNG $k-\varepsilon$ untuk identifikasi <i>free surface</i> model dan perilaku turbulen.
5.	Armau Bayon, Daniel Valero, Rafael García-Bartual, Francisco José Vallés-Morán, P. Amparo López-Jiménez.	2016	Analisa model numerik loncatan hidrolik dengan bilangan Reynolds yang rendah menggunakan perangkat lunak FLOW-3D dan OpenFOAM. FLOW-3D mempunyai hasil yang baik untuk interaksi antar aliran superkritis dan subkritis adapun OpenFOAM mempunyai hasil yang baik untuk struktur loncatan hidrolik.
6.	Sadegh Dehdar-behbahani, Abbas Parsaie.	2016	Penggunaan aplikasi perangkat lunak FLOW-3D untuk menyelidiki pola aliran yang terjadi pada saluran pelimpah di bendungan tipe urugan Balaroud, Iran. Model turbulen RNG $k-\varepsilon$ mempunyai kemampuan yang tinggi untuk memodelkan pola aliran dibandingkan model lain.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisa hidrolika pada bangunan peredam energi

Sebelum aliran yang melewati bangunan pelimpah kembali lagi ke dalam sungai, maka aliran dengan kecepatan tinggi dan kondisi yang superkritis itu sebaiknya diperlambat dan dirubah menjadi kondisi aliran subkritis. Sehingga kandungan energi yang membawa daya penggerus sangat kuat yang timbul dalam aliran tersebut harus direduksi sampai pada tingkat yang normal kembali, sehingga saat kembali ke dalam sungai tidak membahayakan kestabilan alur sungai (Sosrodarsono, 1981:213). Peredam energi mempunyai berbagai tipe berdasarkan kondisi topografi dan sistem kerjanya, yaitu:

2.1.1 Peredam Energi Tipe Loncatan (*Water Jump Type*)



Gambar 2.1 Bentuk lengkungan pada peredam energi tipe loncatan
Sumber: Sosrodarsono, 1981:215

Peredam energi loncatan (Gambar 2.1) biasanya diterapkan pada sungai-sungai yang dangkal (memiliki kedalaman kecil dibanding kedalaman loncatan hidrolis aliran). Tipe ini cocok untuk sungai yang dasar alurnya kukuh. Biaya pembuatannya cukup rendah sedangkan efektifitas kerjanya lebih rendah dari tipe yang lain dan menimbulkan olakan-olakan pada aliran di hilirnya (Sosrodarsono, 1981:214).

2.1.2 Peredam Energi Tipe Kolam Olak (*Stilling Basin Type*)

Suatu bangunan peredam energi berbentuk kolam, dimana sebagian besar prinsip peredaman energinya terjadi disebabkan gesekan pada molekul-molekul air yang mengalir dengan air di dalam kolam, yang mengakibatkan timbulnya olakan-olakan di dalam kolam, sehingga dinamakan peredam energi tipe kolam olak. Kolam olak ini dibedakan menjadi 3 (tiga) tipe utama, yaitu: kolam olak datar, kolam olak miring ke hilir dan kolam

olak miring ke udik. Selanjutnya kolam olak datar inipun masih mempunyai berbagai variasi dan yang terpenting adalah 4 (empat) tipe, yang dibedakan oleh rezim hidrolika alirannya dan kondisi konstruksinya, seperti uraian di bawah ini:

1. Kolam olak datar tipe I

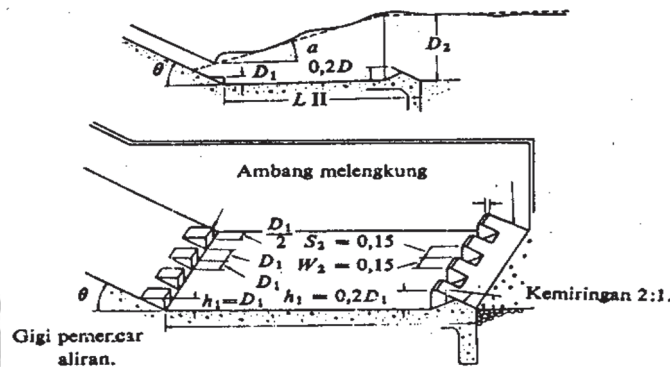
Kolam olak Tipe ini (Gambar 2.2) berdimensi kecil, digunakan untuk debit yang kecil serta kapasitas peredaman energi yang kecil pula. Tipe ini biasanya dibuat untuk kondisi yang tidak memungkinkan untuk perlengkapan-perengkapan lainnya pada kolam olak tersebut.



Gambar 2.2 Bentuk kolam olak datar tipe I
Sumber: Sosrodarsono, 1981:217

2. Kolam olak datar tipe II

Penampang memanjang loncatan hidrolis.

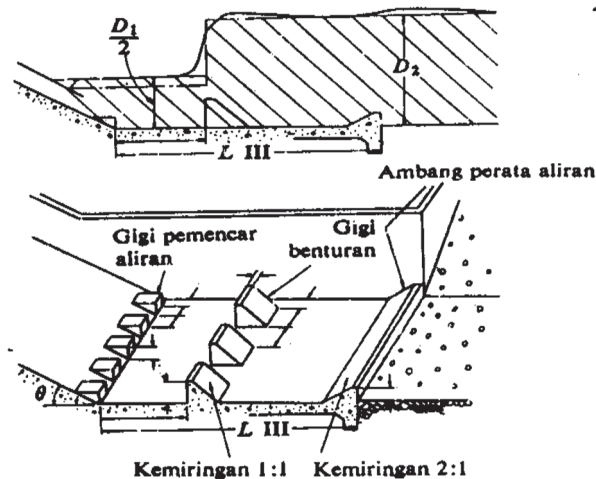


Gambar 2.3 Bentuk kolam olak datar tipe II
Sumber: Sosrodarsono, 1981:218

Kolam olak ini (Gambar 2.3) dibuat dengan gigi-gigi pemancar aliran di pinggir hulu dasar kolam dan di pinggir hilirnya. Gigi-gigi pemancar aliran berfungsi sebagai peningkat efektifitas peredaman, ambang bergerigi berfungsi sebagai penstabil loncatan hidrolis dalam kolam olak. Tipe ini digunakan untuk aliran yang memiliki tekanan hidrostatik tinggi dan debit yang besar ($q = 45 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$, tekanan hidrostatik $> 60 \text{ m}$ dan bilangan Froude $> 4,5$). Kolam olak tipe ini cocok untuk bendungan tipe urugan dan penggunaannya cukup luas.

3. Kolam olak datar tipe III

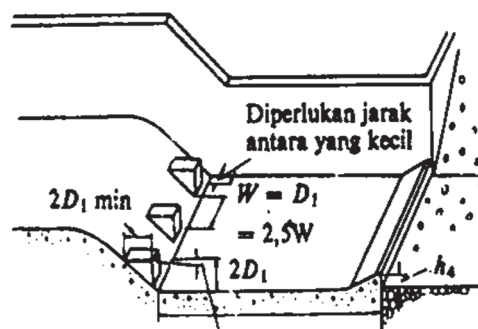
Pada prinsipnya sistem kerja kolam olak ini hampir mirip dengan sistem kerja kolam olak datar tipe II, tetapi lebih cocok untuk aliran air bertekanan hidrostatik rendah dan debit yang agak kecil ($q < 18,5 \text{ m}^3/\text{dt/m}$, $V < 18 \text{ m/dt}$ dan bilangan Froude $> 4,5$). Biasanya gigi-gigi pemancar aliran dibuat di tepi hulu dasar kolam dan gigi-gigi penghadang aliran pada dasar kolam olak untuk mengurangi panjang kolam olak. Tipe ini biasanya digunakan pada bangunan pelimpah bendungan urugan yang rendah.



Gambar 2.4 Bentuk kolam olak datar tipe III
Sumber: Sosrodarsono, 1988:218

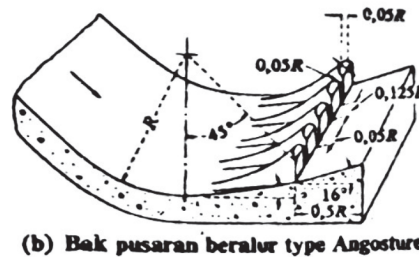
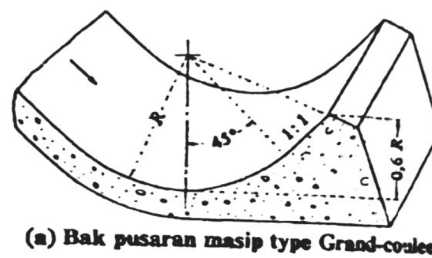
4. Kolam olak datar tipe IV

Sistem kerja dari tipe kolam ini mirip dengan sistem kerja kolam olak tipe III, tetapi penggunaannya untuk tekanan hidrostatik yang rendah pada aliran dan debit yang cukup besar per unit lebar, yakni pada aliran super kritis dengan bilangan Froude antara 2,5 s/d 4,5. Desain puncak gigi pemancar aliran disarankan dibuat 5° condong ke hilir seperti pada Gambar (2.5). Biasanya kolam olak ini digunakan pada bangunan pelimpah bendungan urugan yang sangat rendah.



Gambar 2.5 Bentuk kolam olak datar tipe IV
Sumber: Sosrodarsono, 1988:219

2.1.3 Peredam Energi Tipe Bak Pusar (*Roller Bucket Type*)



Gambar 2.6 Peredam energi tipe bak pusaran

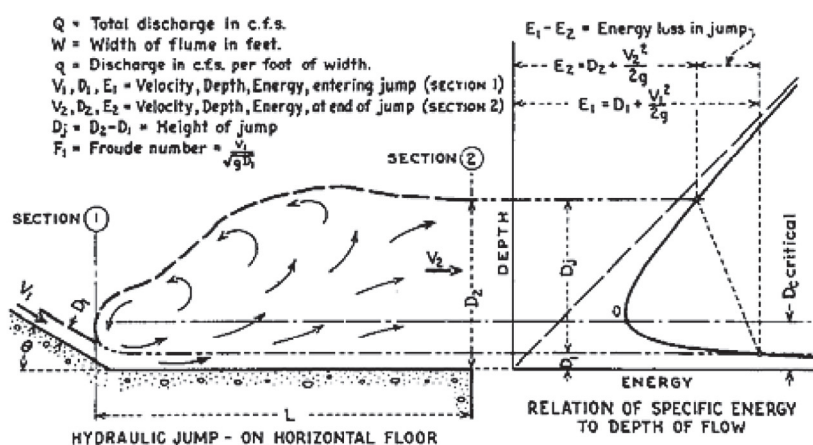
Sumber: Sosrodarsono, 1988:226

Bangunan peredam energi tipe bak pusar yang ada di dalam aliran air dimana terjadi proses pergesekan molekul-molekul air diakibatkan oleh munculnya pusaran-pusaran vertikal di dalam kolam. Pada umumnya bak pusaran ini menggunakan pondasi batuan yang kokoh dan air di hilirnya cukup dalam. Bak pusaran ini mempunyai bentuk serta modifikasi yang beraneka ragam, disesuaikan dengan topografi dan geologi dimana kedudukannya serta kondisi fluktuasi permukaan air di hilir kolam tersebut. Pada hakekatnya kondisi-kondisi teknis bak pusaran secara detail belum ada penelitian lebih lanjut yang jelas, seperti efektifitas pereduksiannya, kondisi alirannya dan aspek-aspek lainnya. Metode pembuatan rencana teknisnya hanya didasarkan pada penelitian-penelitian model hidrolika.

Agar diperoleh tipe peredam energi yang sesuai untuk bangunan peredam energi, maka hal-hal yang perlu dipertimbangkan antara lain:

1. Gambaran karakteristik dari loncatan hidrolis pada peredam energi yang didesain;
2. Keterkaitan lokasi antara peredam energi dengan tubuh bendungan;
3. Karakteristik hidrolika dan karakteristik konstruktif dari bangunan pelimpah;
4. Kondisi-kondisi topografi, geologi dan hidrolika di lokasi tepatnya kedudukan bangunan peredam energi;
5. Kondisi serta laju perkembangan sungai di sebelah hilir.

2.2 Loncatan Hidrolik



Gambar 2.7 Sketsa loncatan hidrolik

Sumber: Peterka, 1984:6

Menurut Chow (1997) loncatan hidrolik, pertama kali diselidiki dengan cara percobaan oleh Bidone, sarjana Italia, pada tahun 1818. Hal ini memberikan gagasan pada Bélanger (1828) untuk memecah antara kemiringan landai (subkritis) dengan curam (superkritis), karena Bélanger kemudian menemukan bukti bahwa loncatan-loncatan hidrolik pada saluran curam yang seringkali diakibatkan oleh penghalang pada aliran dimana dari semula seragam. Kemudian banyak sekali dilakukan penelitian dan hasilnya dikemukakan oleh beberapa penulis. Pengklasifikasian kondisi dari aliran subkritis, kritis dan superkritis didefinisikan oleh bilangan Froude (Peterka, 1984:6):

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot D_1}} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

F_1 = bilangan Froude di titik 1;

V_1 = kecepatan aliran rata-rata di penampang (m/dt) di titik 1;

g = percepatan gravitasi (m/dt²);

D_1 = kedalaman hidrolik (m) di titik 1.

Penulisan Persamaan loncatan hidrolik berdasarkan tekanan dan momentum (hukum Newton II) bisa ditulis kembali sebagai berikut:

$$D_2 = -\frac{D_1}{2} + \sqrt{\frac{D_1^2}{4} + \frac{2 \cdot V_1^2 D_1}{g}} \dots \dots \dots (2.2)$$

atau

$$D_2 = -\frac{D_1}{2} + \sqrt{\frac{D_1^2}{4} + \frac{2 \cdot V_1^2 D_1^2}{g \cdot D_1}} \quad (2.3)$$

Transpose D_1 ke sisi kiri Persamaan dan substitusi F_1^2 untuk $\frac{V_1^2}{g \cdot D_1}$ maka:

$$\frac{D_2}{D_1} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2 \cdot F_1^2} \quad (2.4)$$

atau

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1) \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) menunjukkan bahwa rasio kedalaman hidrolik adalah fungsi dari bilangan Froude (Peterka, 1984:7).

Pengontrol loncatan hidrolis dengan kenaikan yang mendadak (*abrupt rise*) atau drempel. Dari data percobaan, Forster dan Skrinde (Chow, 1997:371) telah mengembangkan suatu diagram (Gambar 2.8) yang menunjukkan hubungan antara F_1 , D_3/D_1 , dan h/D_1 , suatu peninggian curam (*abrupt rise*) atau drempel, untuk $x = 5(h + D_3)$.

Konsistensi hubungan-hubungan tersebut telah diuji dengan analisa teoretis, dengan menggunakan teori momentum. Diagram-digram tersebut memberikan sifat-sifat pendekatan dari suatu peninggian mendadak bila harga-harga V_1 , D_1 , D_2 , D_3 dan h diketahui.

Pada diagram, suatu titik ($F_1, D_3/D_2$) terletak di atas garis $D_3 = D_2$, menunjukkan keadaan $D_3 > D_2$, di mana suatu peninggian mendadak hanya berfungsi sebagai pembesar efek pembenaman. Untuk titik-titik yang terletak pada selang antara garis-garis $D_3 = D_2$ dan $D_3 = D_c$, posisi titik relatif terhadap kurva h/D_1 yang sesuai, menunjukkan pengaruh peninggian mendadak pada bentuk aliran yang datar. Jadi, jika titik terletak pada kurva h/D_1 , loncatan akan terbentuk, dengan $x = 5(h + D_3)$. Jika titik terletak di sebelah kiri dan di atas kurva, peninggiannya terlalu besar, dan loncatan akan bergerak ke hulu, dan akhirnya akan lenyap. Jika titik berada di sebelah kanan, peninggian terlalu rendah, dan loncatan akan bergerak ke hilir, ke arah peninggian mendadak, dan akhirnya saluran di hilir peredam energi mempunyai potensi untuk mengalami kerusakan.

$$D_j = D_2 - D_1 \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan:

D_j = kedalaman loncatan (m);

D_1 = kedalaman di titik 1 (m);

D_2 = kedalaman di titik 2 (m);

2.2.2 Kehilangan energi

Kehilangan energi pada loncatan diartikan sebagai perbedaan energi spesifik sebelum loncatan dan sesudah terjadi loncatan (Peterka, 1984:6), besarnya adalah:

$$E_1 = D_1 + \frac{V_1^2}{2g} \dots\dots\dots (2.7)$$

dan

$$E_2 = D_2 + \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots (2.8)$$

maka

$$E_L = E_1 - E_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

E_L = kehilangan energi tinggi tekanan pada loncatan hidrolik (m);

D_1 = kedalaman di titik 1 (m);

D_2 = kedalaman di titik 2 (m);

V_1 = kecepatan aliran air di titik 1 (m);

V_2 = kecepatan aliran air di titik 2 (m);

g = konstantan percepatan gravitasi (m/dt).

2.2.3 Efisiensi

Efisiensi loncatan hidrolik didefinisikan sebagai rasio antara energi spesifik setelah loncatan hidrolik dibanding dengan sebelum terjadinya loncatan hidrolik, di tuliskan sebagai berikut:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2 \cdot (2 + F_1^2)} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan:

F_1 = bilangan Froude di titik 1.

Sedangkan efisiensi dari kehilangan energi disusun dengan Persamaan (2.7), Persamaan (2.8) dan Persamaan (2.10) didefinisikan sebagai berikut (Peterka, 1984):

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{(E_1 - E_2)}{E_1} \times 100\% \quad (2.12)$$

Nilai dari Persamaan (2.12) dipakai untuk menunjukkan seberapa besar kemampuan bangunan peredam energi berfungsi.

2.2.4 Panjang loncatan hidrolik

Panjang loncatan hidrolik (L_j) adalah jarak yang dihitung mulai dari permukaan depan loncatan hidrolik sampai dengan suatu titik pada permukaan gulungan ombak yang menuju ke hilir. Percobaan untuk menentukan panjang loncatan hidrolik dalam suatu model tidaklah mudah dikarenakan terjadinya turbulensi yang kuat serta adanya arus satu fase dan dua fase yang menambah kesulitan dalam pengukuran kedalaman aliran, distribusi kecepatan dan panjang loncatan hidrolik. Didalam Schulz (2015) menerangkan bahwa menurut Elevatorski (1959), perumusan awal untuk panjang loncatan hidrolik dilakukan oleh Riegel dan Beebe (1917). Kemudian tahun 1927-1929, Safranez melakukan kajian sistematis tentang panjang gulungan (*roller*) pada loncatan hidrolik. Selanjutnya Bakhmeteff dan Matzke (1936) mendefinisikan bahwa akhir dari loncatan hidrolik merupakan posisi dimana permukaan bebas mencapai ketinggian maksimum. Peterka (1984) menemukan bahwa akhir loncatan hidrolik dianalogikan sebagai posisi saat kecepatan pancaran tertinggi yang mulai terlepas dari dasar lalu meluncur ke hilir. Hasil penemuan Peterka ini adalah yang sering digunakan untuk menghitung panjang dari loncatan hidrolik pada kolam olak.

Tabel 2.1 Beberapa persamaan panjang loncatan hidrolik dari peneliti terdahulu

Peneliti	Rumus Empiris	Tahun
Riegel dan Beebe	$L_j \approx 5(D_2 - D_1)$	(1917)
Safranez	$L_j \approx 5,2D_2$	(1927)
Ludin dan Barnes	$L_j = \left(4,5 - \frac{V_1}{V_c}\right) D_2$	(1934)
Woycieki	$L_j = (D_2 - D_1) \left(8 - 0,05 \frac{D_2}{D_1}\right)$	(1934)
Smetana	$L_j \approx 6(D_2 - D_1)$	(1934)
Douma	$L_j = 5,2D_2$	(1934)

Peneliti	Rumus Empiris	Tahun
Aravin	$L_j \approx 5,4(D_2 - D_1)$	(1935)
Kinney	$L_j = 6,02(D_2 - D_1)$	(1935)
Page	$L_j = 5,6D_2$	(1935)
Chertoussov	$L_j = 10,3D_1(F_1 + 1)^{0,81}$	(1935)
Bakhmetef, Matzke	$L_j = 5(D_2 - D_1)$	(1936)
Ivanchenko	$L_j = 10,6(D_2 - D_1)(F_1^2)^{-0,185}$	(1936)
Posey	$L_j \approx 4,5 - 7(D_2 - D_1)$	(1941)
Wu	$L_j = 10(D_2 - D_1)F_1^{-0,16}$	(1949)
Hager dkk.	$\frac{L_j}{D_1} = 220 \cdot \text{tgh}\left(\frac{F_1 - 1}{22}\right)$	(1992)
Marques dkk.	$L_j = 8,5(D_2 - D_1)$	(1997)
Simões	$\frac{L_j}{D_2} = \frac{F_1^2 - 81,85F_1 + 61,13}{-0,62 - 10,17F_1}$	(2008)
Simões dkk.	$L_j = 9,52(D_2 - D_1)$	(2012)

Sumber: Schulz, 2015:81

Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa panjang loncatan hidrolis adalah $L_j = 8,5(D_2 - D_1)$ dengan syarat $2 \leq F_1 \leq 20$. Beberapa ahli mencoba merumuskan panjang loncat air sebagai sebuah persamaan empiris seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.1.

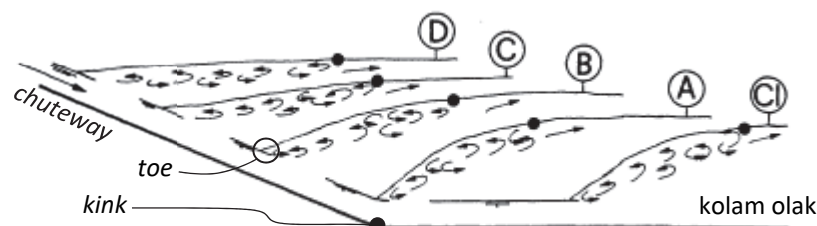
Panjang loncatan hidrolis adalah variabel yang sulit untuk ditentukan dan melibatkan tingkat ketidakpastian yang signifikan, dimanapun pengukuran dilakukan: lapangan, laboratorium atau bahkan simulasi numerik. Hal ini pada dasarnya disebabkan oleh perubahan level permukaan air yang terkait dengan pembentukan pusaran arus internal. Beberapa variabel yang tampak, seperti profil kecepatan pada suatu potongan atau kedalaman aliran subkritis, dapat digunakan secara praktis untuk menghasilkan kriteria sistematis dalam penentuan titik akhir loncatan hidrolis. TKE (*Turbulence Kinetic Energy*) juga dapat digunakan untuk menentukan titik akhir loncatan hidrolis (Bayon, 2016).

2.3 Loncatan Miring

Saat aliran bergerak miring, lokasi loncatan akan bervariasi sesuai dengan debit alirannya, seperti halnya pada arus banjir. Loncatan miring, adalah loncatan dalam saluran dengan kemiringan positif pada bagian hulu dan horizontal pada bagian hilir. Kindsvater

(1944) di dalam Hager (1992) mengklasifikasikan loncatan berdasarkan posisi relatif awal loncatan terhadap sudut lantai (*bottom kink*), sebagai berikut:

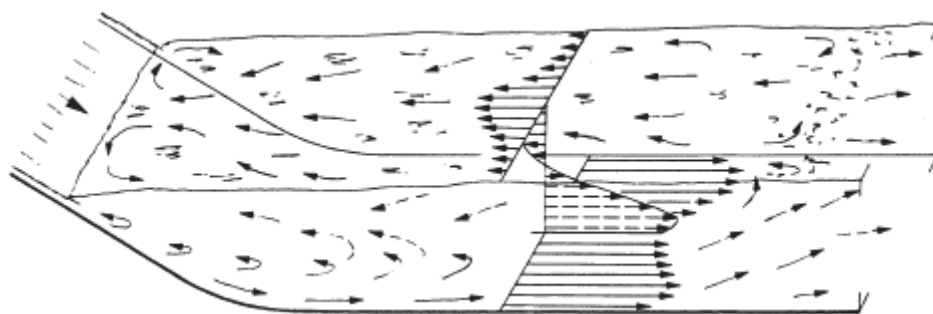
1. Loncatan A, awal loncatan (*toe*) berada di atas sudut lantai (*kink*).
2. Loncatan B, berada diantara loncatan A dan C
3. Loncatan C, putaran terakhir ada di atas tekukan lantai
4. Loncatan D, seluruh putaran berada di bagian aliran miring.



Gambar 2.10 Tipe aliran loncatan miring

Sumber: Hager, 1992:42

Hager (1992) menerangkan bahwa Mahmood (1964) mempelajari loncatan miring pada variasi tipe dasar kemiringan 0,191; 0,323; dan 0,673. Terlihat bahwa dimensi utama loncatan A dan loncatan klasik adalah sama. Sedangkan kerusakan pada kecepatan dasar antara loncatan miring dan klasik juga identik. Rajaratnam dan Murahari (1974) di dalam Hager (1992), beranggapan bahwa distribusi kecepatan pada loncatan D adalah sebesar $\theta < 0,25$. Ditemukan bahwa distribusi kecepatan pada zona aliran di atas sebanding dengan distribusi pada dinding semburan klasik. Pada kecepatan maksimal, loncatan D berada diantara loncatan klasik dan semburan klasik. Diterangkan dalam Hager (1992) bahwa Kawagoshi dan Hager (1990) mempelajari distribusi kecepatan loncatan miring secara tiga dimensi. Gambar 2.11 menunjukkan tipe distribusi kecepatan dan mengungkapkan kecepatan dasar maksimal di dekat dinding samping. Kecepatan permukaan maksimal berarah terbalik sepanjang garis tengah.



Gambar 2.11 Skema arah aliran kecepatan pada loncatan B

Sumber: Hager, 1992:51

2.4 CFD (*Computational Fluids Dynamic*)

Dibutuhkan suatu langkah yang dapat memprediksi hasil, berbagai macam jenis karakteristik fluida yang diteliti atau disimulasi dengan akurat dan cepat. Maka muncullah suatu ilmu yang bernama *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Langkah kerja CFD ada tiga tahapan, antara lain:

1. *Pre-Processing*

Proses yang dilakukan pada langkah ini adalah: membuat geometri model untuk menjadi domain komputasi, pembuatan mesh dan grid, mendefinisikan properties fluida serta pengaturan *solver* (*numerical scheme, convergence controls, convergence monitors, dll*)

2. Solusi (*solver execution*)

Pada tahapan ini persamaan-persamaan yang akan digunakan pada simulasi CFD diselesaikan secara iterasi hingga tercapai kondisi konvergen. Tingkat keakuratan *solver* ditentukan antara lain oleh keakuratan kondisi batas atau asumsi yang dipakai, *meshing* dan kesalahan numerik (baik karena keterbatasan perangkat lunak maupun karena kekeliruan pengguna perangkat lunak).

3. *Post Processor*

Pada langkah ini hasil-hasil komputasi numerik dibuat visualisasi dan didokumentasi. Bila perlu hasil ini dilakukan pengujian lagi untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat sehingga menjawab pertanyaan tentang kesesuaian geometri model, pemenuhan kondisi batas dan kecukupan ukuran *mesh*.

2.5 Perangkat Lunak

FLOW-3D adalah perangkat lunak komputasi fluida dinamis umum menggunakan teknik numerik yang dikembangkan secara khusus untuk menyelesaikan persamaan gerak fluida agar diperoleh solusinya dalam tiga dimensi. Gerakan fluida dijelaskan dengan persamaan non linier, dinamis, diferensial orde kedua. Solusi numerik dari persamaan ini melibatkan pendekatan dari berbagai bentuk ekspresi aljabar. Persamaan yang dihasilkan kemudian diselesaikan dengan proses simulasi untuk menghasilkan solusi pendekatan terhadap masalah asli. Solusi persamaan turbulen yang dapat diaplikasikan dalam perangkat lunak FLOW-3D adalah persamaan $k-\epsilon$, $k-\omega$, RNG (*Re-Normalization Group*) dan *Large Eddy Simulation*.

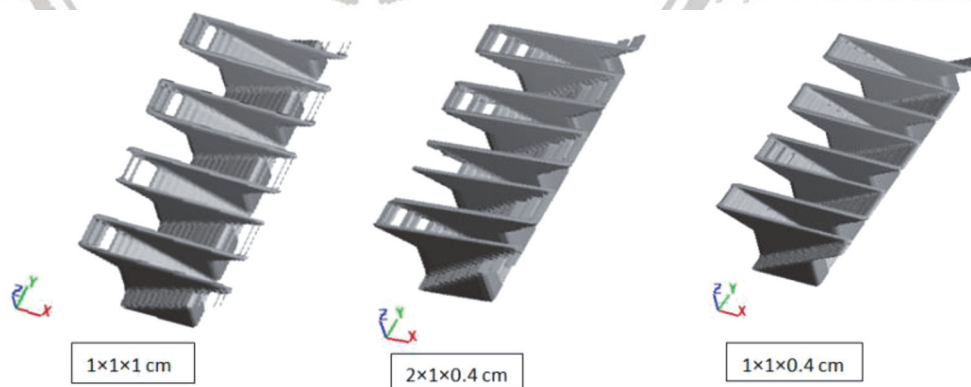
Penggunaan solusi persamaan turbulen RNG mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan persamaan turbulen $k-\epsilon$ walaupun mempunyai bentuk standar yang serupa, diantaranya (Babaali, 2014):

1. Model RNG mempunyai tambahan bentuk persamaan ϵ yang signifikan meningkatkan akurasi hasil untuk model aliran fluida yang cepat.
2. Peningkatan akurasi hasil untuk efek aliran yang mempunyai banyak pusaran pada pemodelan aliran turbulen RNG.
3. Model fluida dengan bilangan Reynolds yang kecil dan besar dapat diselesaikan dengan model RNG dengan baik, sedangkan model $k-\epsilon$ hanya berkemampuan baik dalam menyelesaikan model dengan bilangan Reynolds yang besar.
4. Model RNG menyediakan formula analisis untuk menghitung bilangan Prandtl, sedangkan model persamaan standar $k-\epsilon$ menggunakan nilai yang konstan.

Garis besar algoritma solusi numerik yang tersedia di FLOW-3D mengikuti aturan dalam persamaan gerak sebagai berikut:

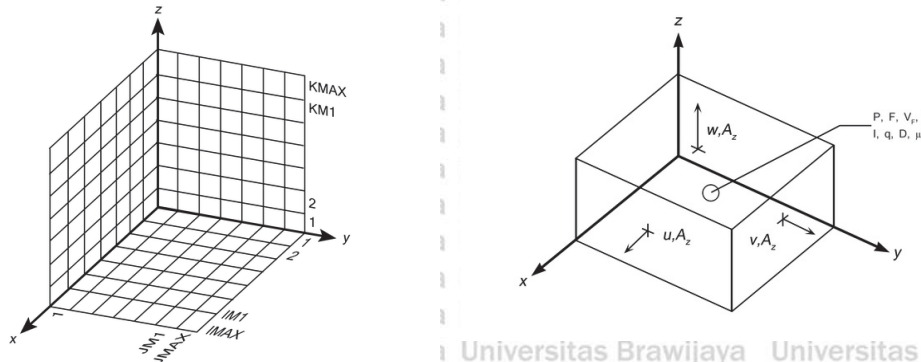
2.5.1 Sistem Koordinat dan *Mesh*

Persamaan diferensial yang harus diselesaikan ditulis dalam kaidah koordinat *cartesian* (x, y, z). Semua persamaan yang digunakan untuk memodelkan daerah geometris kompleks diformulasikan dengan fungsi luas dan fungsi porositas volume yang disebut FAVOR™ (*Fractional Area/Volume Obstacle Representation*) dan secara umum fungsi FAVOR™ adalah didasarkan waktu *independent*. Salah satu keunggulan dari aplikasi FLOW-3D dibandingkan dengan aplikasi CFD lainnya adalah kemampuannya untuk mendefinisikan dan membentuk *mesh* secara baik dari bentuk geometri model dengan FAVOR. (Abrari, 2015). Bentuk dari geometri pelimpah model piano dengan ukuran *mesh* berbeda beda yang dibangun dengan FAVOR dapat dilihat di Gambar 2.12. Hasil terbaik dari proses FAVOR ini didapatkan ukuran mesh sebesar $(1 \times 1 \times 0,4)$ cm.



Gambar 2.12 Variasi dari dimensi *mesh* yang dihasilkan dari FAVOR.

Sumber: Abrari, 2015



Gambar 2.13 Mesh dan aturan penamaannya serta lokasi variabel dalam *mesh cell*

Sumber: FLOW-3D *user manual*, Anonim, 2015

Aturan penamaan dan penomoran dalam *mesh* terhadap sumbu global yang digunakan dalam aplikasi FLOW-3D terlihat dalam seperti pada Gambar 2.13. Kecepatan aliran (u , v , w) dan fraksi luas (A_x , A_y , A_z) fluida terletak pada lokasi *cell* pada masing masing sumbu (x , y , z), tekanan (P), fraksi fluida (F), fraksi volume (V_F), berat jenis (ρ), energi internal (I), besaran turbulen untuk energi (q), peredaman energi (D), dan viskositas (μ) semuanya terletak di tengah *cell*.

2.5.2 Persamaan kontinuitas masa

Secara umum persamaan kontinuitas masa dalam perangkat lunak FLOW-3D untuk permasalahan *incompressible flow* dengan nilai ρ adalah konstan di koordinat *cartesian* dituliskan sebagai berikut:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{P_{SOR}}{\rho} \quad (2.13)$$

Dengan: V_F adalah perbandingan volume terbuka terhadap aliran fluida, ρ berat jenis fluida, P_{SOR} sumber masa. Komponen kecepatan (u , v , w) dalam arah koordinat (x , y , z). A_x menyatakan perbandingan luas terbuka dengan luas teraliri dalam sumbu x , begitu pula A_y dan A_z dalam sumbu y dan z .

2.5.3 Persamaan Momentum

Persamaan gerak fluida untuk komponen kecepatan fluida (u , v , w) pada tiga arah koordinat adalah Persamaan Navier-Stokes dengan beberapa tambahan:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \dots \dots \dots (2.14)$$

dalam Persamaan (2.14) tersebut P adalah tekanan fluida, (G_x, G_y, G_z) adalah *body accelerations* yang terbentuk akibat percepatan aliran fluida, (f_x, f_y, f_z) adalah percepatan *viscositas*.

2.5.4 Nilai kekasaran permukaan

Nilai kekasaran permukaan ekuivalen yang diseragamkan biasanya direpresentasikan dengan nilai koefisien Manning. Software Flow-3D memakai nilai tipe kekasaran Nikuradse yang berdimensi panjang, sehingga perlu dikonversikan menggunakan Persamaan (2.15) Yen, (1991):

$$k_s = \left(n \frac{m^{\frac{1}{6}}}{0,0389} \right)^6 \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan:

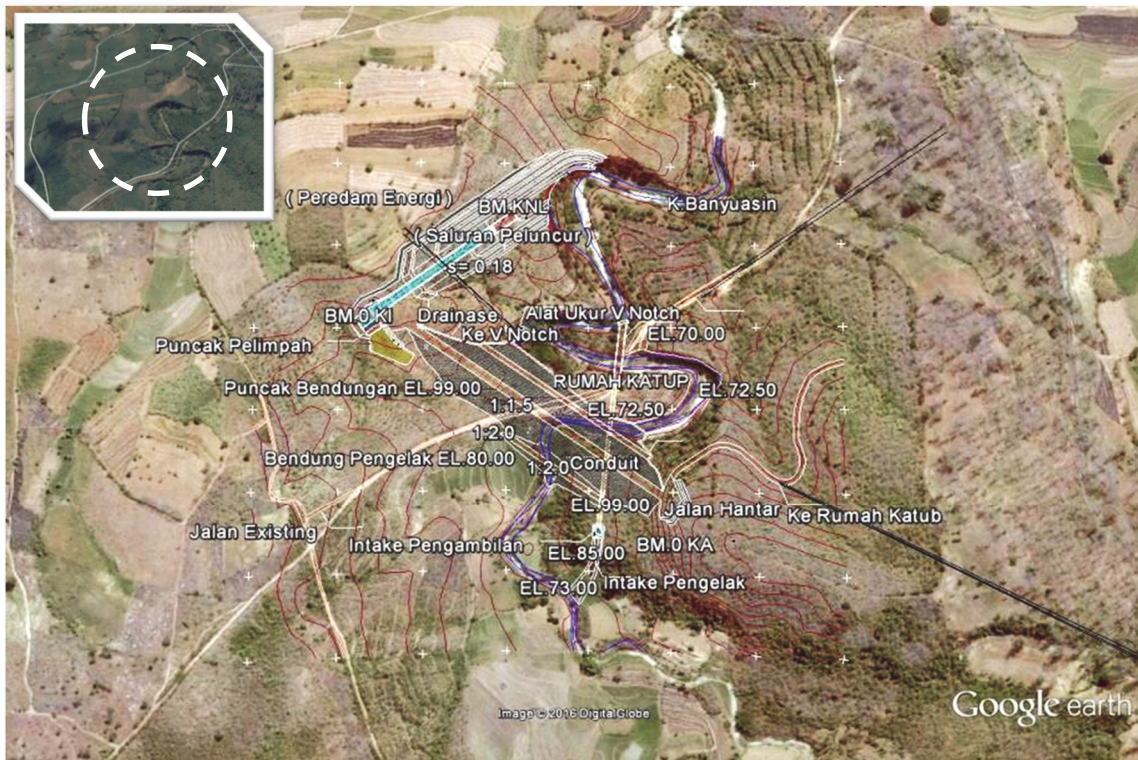
n = nilai koefisien Manning;

m = bernilai 1 dalam jika satuan meter.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Daerah Studi

Sungai Randugunting secara administrasi melintasi tiga Kabupaten di Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Blora di bagian hulu dan menjadi batas antara Kabupaten Rembang dan Pati di bagian hilirnya. Di bagian hulu, sungai ini juga dikenal dengan nama Sungai Klampok/Banyuasin. Bendungan Randugunting direncanakan terletak di Kabupaten Blora dan Rembang, dengan lokasi rencana as bendung di Kabupaten Blora, Propinsi Jawa Tengah yang berada di daerah hulu Sungai Randugunting, sedangkan ruas sungainya berada di Sungai Banyuasin, Desa Kalinanas, Kecamatan Japah, Kabupaten Blora dengan posisi koordinat UTM X=528547,400 dan Y=9240387,400 mempunyai luas DAS sebesar 17,981 km².



Gambar 3.1 Sketsa Lokasi Bendungan Randugunting Kabupaten Blora

Sumber: Anonim, 2016

3.2 Data perencanaan prototipe

Data Teknis perencanaan prototipe model fisik Bendungan Randugunting secara ringkas adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Tabulasi Kondisi Hidrologis Pelimpah Bendungan Randugunting

No	Keterangan	Satuan	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₁₀₀₀	Q _{PMF}	
1	Tipe Pelimpah		Pelimpah Samping					
2	Elevasi Ambang	m	94,2					
3	Lebar Ambang	m	20,00					
4	Tipe Ambang		Ogee					
5	Debit Inflow	m ³ /det	80,42	82,34	82,75	86,10	205,03	
6	Debit Outflow	m ³ /det	20,46	21,14	21,16	23,03	67,06	
7	Elevasi MAW Maks.	m	94,87	94,88	94,88	94,91	93,60	
8	Tinggi Air di atas Ambang	m	0,60	0,61	0,61	0,65	1,33	
9	Kecepatan Masuk	m ³ /det	0,24	0,15	0,25	0,24	0,71	

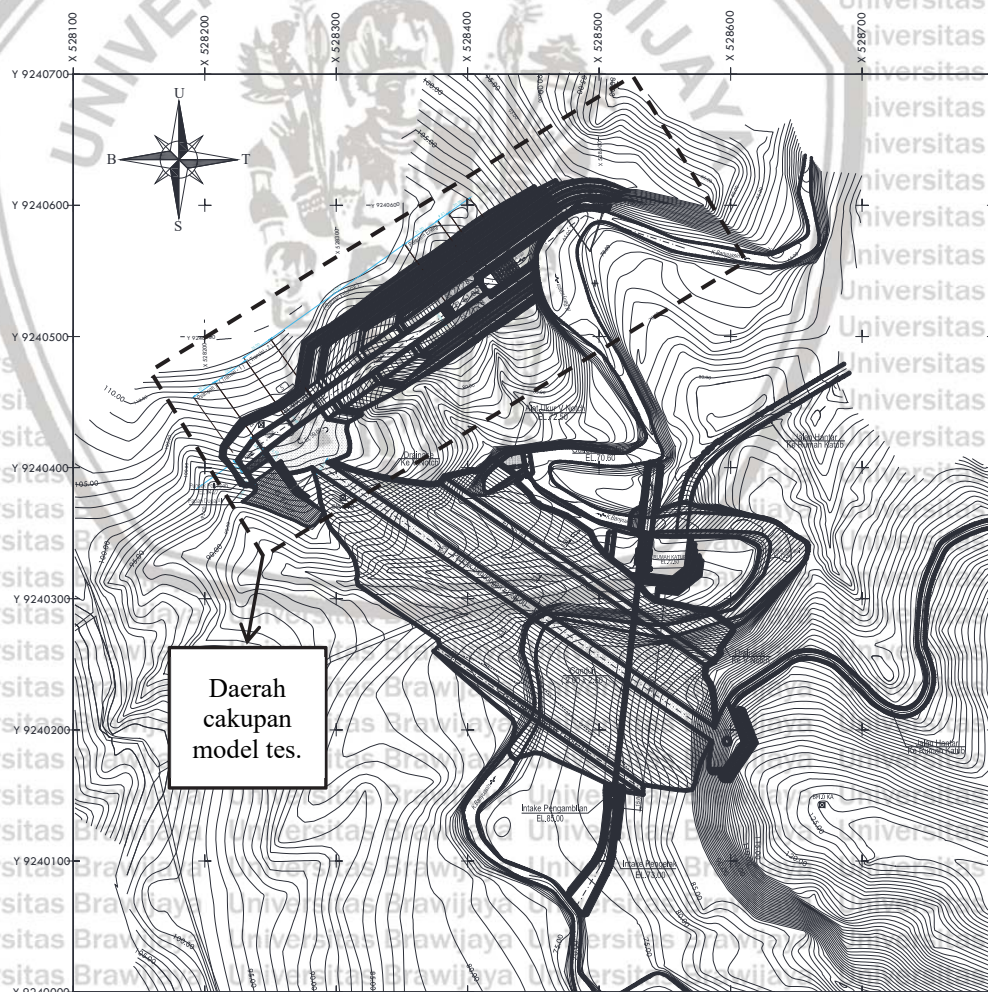
Sumber: Anonim, 2016

Tabel 3.2 Data Teknis Bendungan Randugunting

No	Keterangan	Satuan	Nilai
Pelimpah			
1	Elevasi puncak pelimpah	m	94,27
2	Lebar pelimpah	m	20,00
3	Tipe puncak pelimpah		Ogee
4	Elevasi lantai hulu		91,27
5	Kemiringan hilir		0,80
Saluran Samping			
1	Panjang saluran samping	m	20,00
2	Elevasi hulu	m	89,97
3	Elevasi hilir	m	87,50
4	Lebar hulu	m	12,00
5	Lebar hilir	m	15,00
6	Kemiringan dasar		0,12
7	Kemiringan dinding luar		0,80
Saluran Transisi 1			
1	Elevasi hilir	m	87,50
2	Elevasi hulu	m	87,53
3	Kemiringan dasar		0,00
4	Panjang	m	28,57
5	Kemiringan lereng kiri/kanan		0,7-0
6	Lebar hulu	m	15,00
7	Lebar hilir	m	10,00
Saluran...			

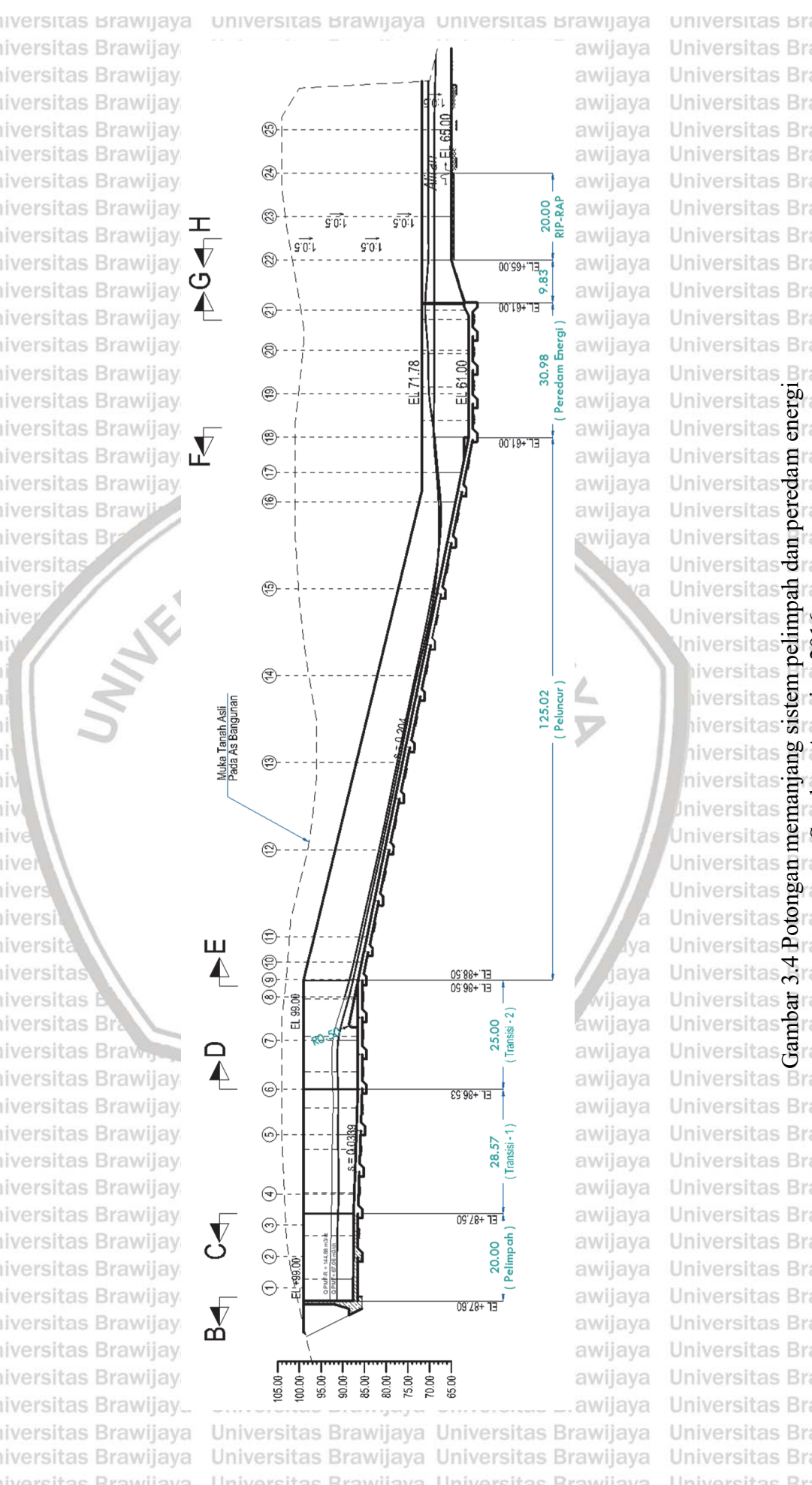
No	Keterangan	Satuan	Nilai
Saluran Transisi 2			
1	Elevasi hilir	m	86,50
2	Elevasi hulu	m	86,53
3	Kemiringan dasar		0,001
4	Panjang	m	25,00
5	Kemiringan lereng kiri/kanan		0,00
6	Lebar hulu	m	10,00
7	Lebar hilir	m	10,00
Saluran Peluncur			
1	Elevasi hulu	m	86,50
2	Elevasi hilir	m	64,00
3	Kemiringan dasar		0,18
4	Panjang	m	125,00
5	Kemiringan lereng kiri/kanan		0,00
6	Lebar hulu	m	10,00
7	Lebar hilir	m	10,00

Sumber: Anonim, 2016



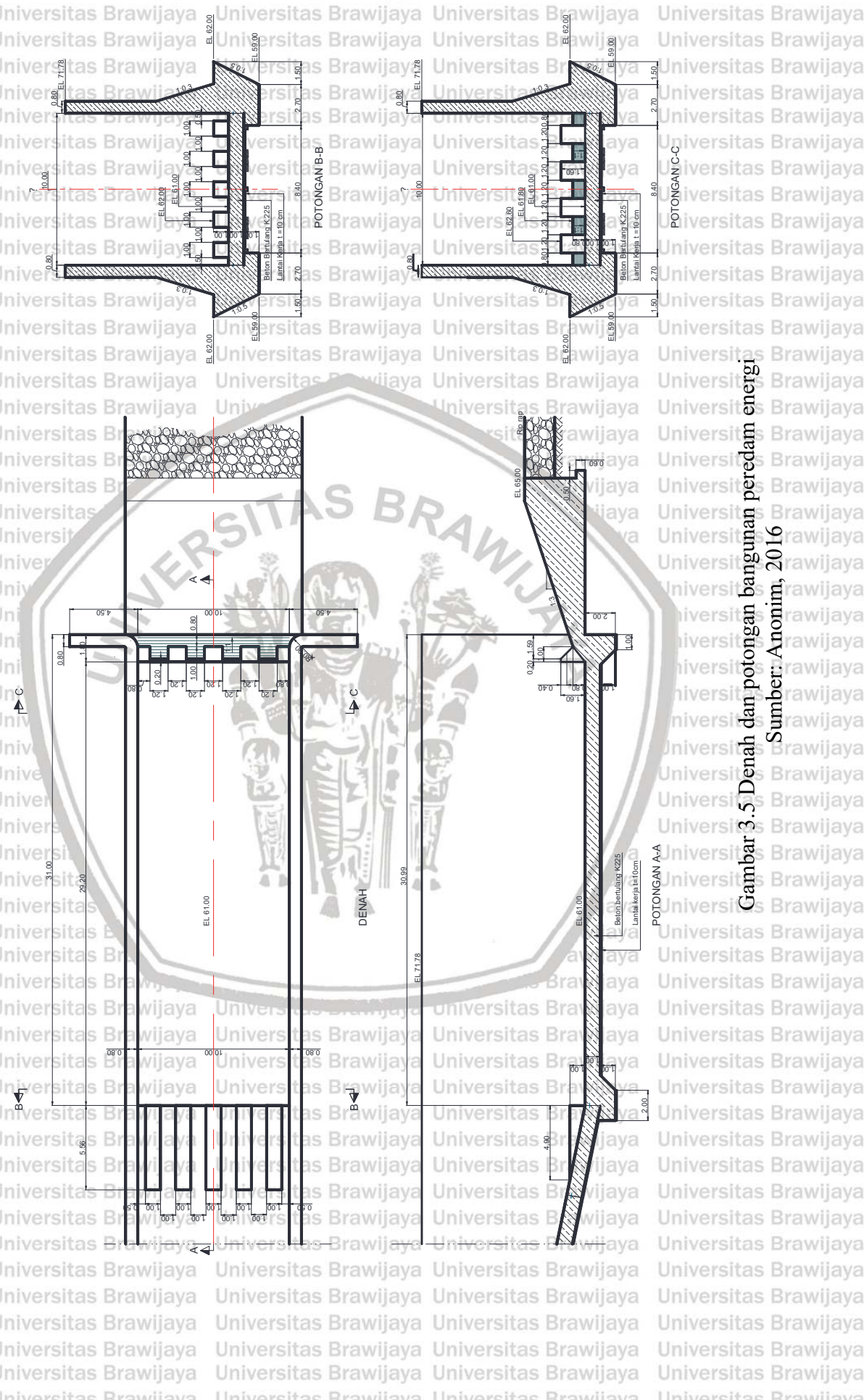
Gambar 3.2 Gambar teknis Bendungan dan model tes

Sumber: Anonim, 2016

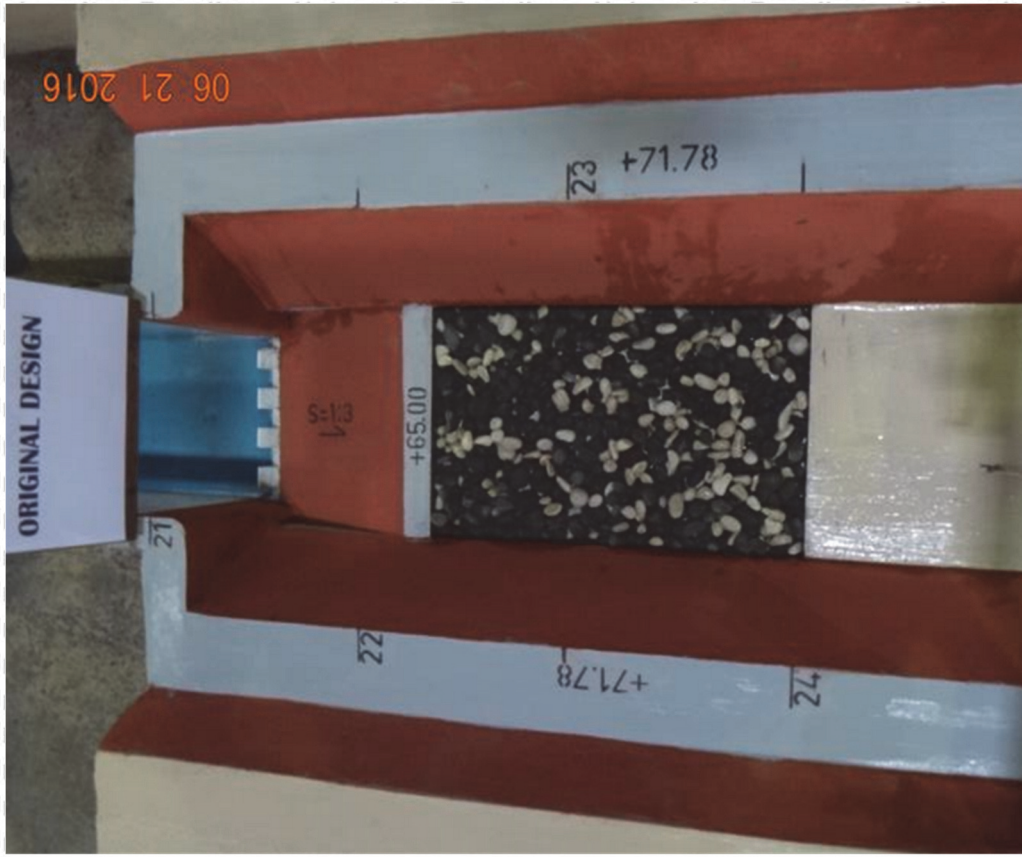


Gambar 3.4 Potongan memanjang sistem pelimpah dan peredam energi

Sumber: Anonim, 2016



Gambar 3.5 Denah dan potongan bangunan peredam energi
Sumber: Anonim, 2016



Gambar 3.6 Bangunan model fisik peredam energi Bendungan Randugunting
Sumber: Anonim, 2016

3.3 Fasilitas Pengujian

Data-data yang diperlukan untuk penelitian ini diperoleh dari uji model fisik Bendungan Randugunting yang dilakukan di Laboratorium Hidrolika Terapan Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dengan alat-alat sebagai berikut:

1. Empat unit pompa listrik, dengan rincian kapasitas debit: satu unit dengan kapasitas debit 50 l/detik, satu unit berkapasitas debit 40 l/detik serta dua unit pompa listrik dengan kapasitas masing masing pompa debit 15 l/detik.
2. Tandon air atas 20m³ dan bawah tanah (*ground reservoir*) berkapasitas 100 m³.
3. Sistem sirkulasi air pada unit pompa–tandon air dan sistem model tes.
4. Peralatan material cetakan untuk pekerjaan kayu dan akrilik serta konstruksi pemasangan batu untuk membentuk model fisik sebangun dengan prototipenya.
5. Instrumentasi pengukuran di laboratorium untuk tinggi muka air menggunakan meteran taraf (*point gauge*), pengukur debit di tandon air (*Rechbox*), pengukuran kecepatan memakai tabung pitot dan *small current meter*; sedangkan untuk pengukuran tekanan menggunakan *pizometer*.
6. Instrumen pengukur tinggi/leveling untuk mengukur elevasi yang tepat di model fisik berupa *waterpas* dan *theodolit*.
7. Model bangunan pelimpah, terdiri dari : peredam energi, saluran peluncur dan saluran transisi, dengan skala *undistorted* 1:40.
8. Besar dan dimensi bangunan sesuai dengan hasil *Original Design*, *Modified Design*, dan *Final Design* Model Fisik Bendungan Randugunting.

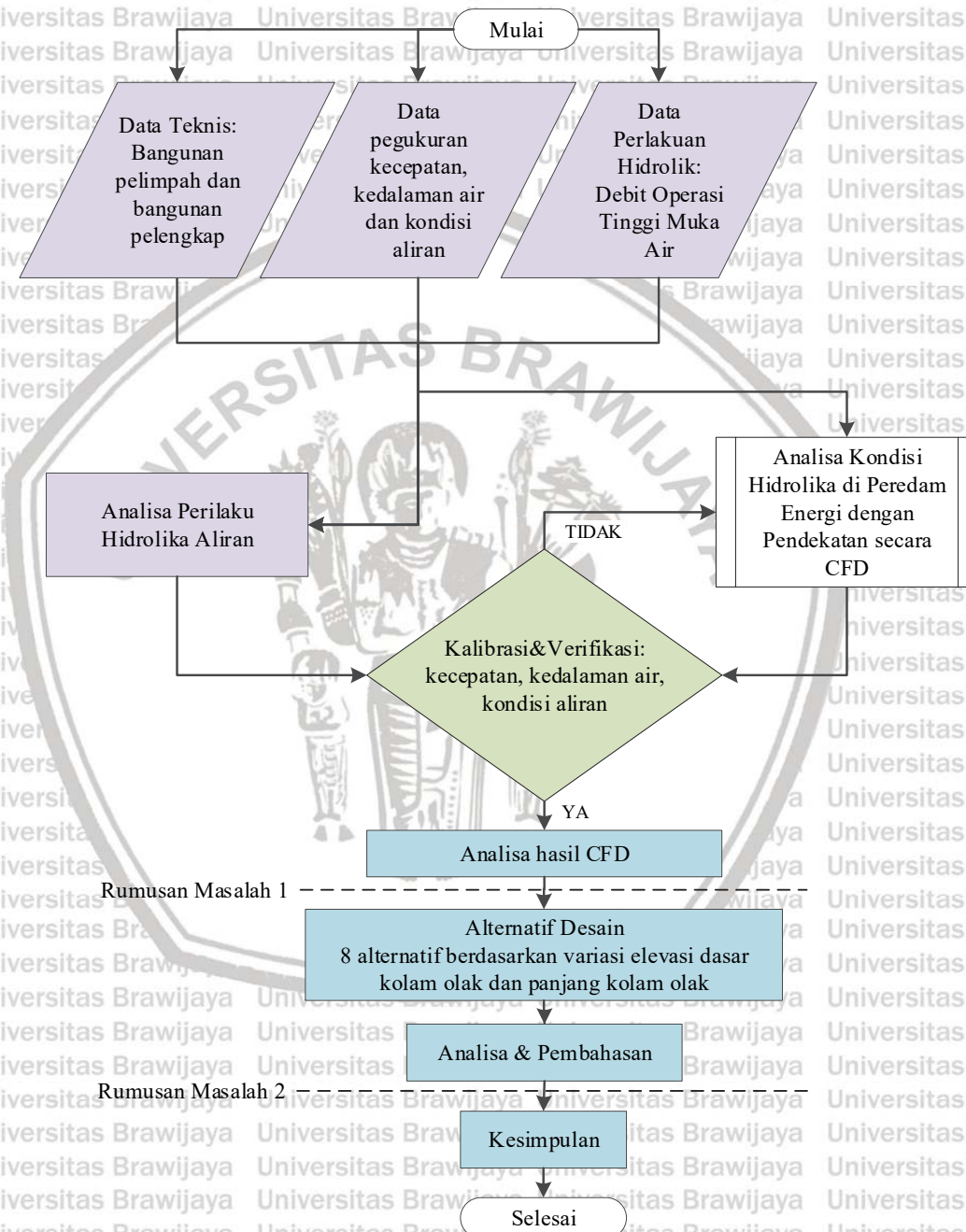
3.4 Konstruksi Model

Beberapa bagian dari prototipe Bendungan Randugunting dilihat pada Gambar 3.6, yang dimodelkan dengan menggunakan jenis dan skala sebagaimana tersebut di atas antara lain sebagai berikut :

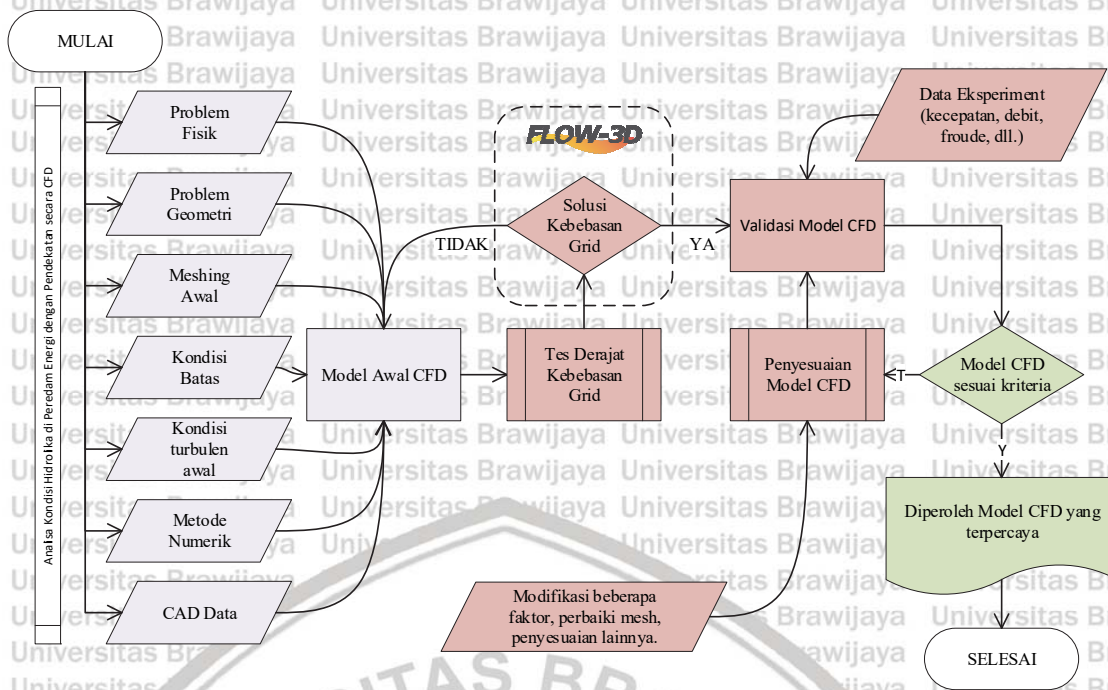
1. Bagian bendungan utama terbuat dari pasangan batu bata dengan *finishing* plaster semen serta di cat;
2. Bangunan pelimpah, dasar saluran transisi dan saluran peluncur serta peredam energi (*stilling basin*) terbuat dari akrilik berangka kayu jati dengan *finishing* cat untuk mendekati keadaan sesungguhnya di lapangan;
3. Dinding pada saluran transisi dan saluran peluncur serta peredam energi terbuat dari bahan akrilik agar dapat diamati keadaan alirannya.

3.5 Tahapan dan Rancangan Pengujian

Dalam proses pengujian model data yang akan diukur antara lain tinggi muka air, kecepatan aliran, dan kondisi aliran. Muka air yang terjadi dikarenakan adanya aliran dengan debit tertentu diukur memakai meteran taraf (*point gauge*), kecepatannya diukur memakai tabung pitot, sedangkan kondisi aliran dilihat dari bilangan Froude dan pengamatan visual.



Gambar 3.7 Diagram Alir Pengerjaan Tesis



Gambar 3.8 Diagram alir proses analisa menggunakan CFD

Data-data teknis debit operasi yang akan diujikan tersaji dalam (Tabel 3.1). Hasil pengujian fisik Seri 1/*final design* untuk Q_{100} didapatkan besaran nilai: $D_1 = 0,28$ m; $D_2 = 6,17$ m; bilangan Froude di $D_1 = 6,25$. Dari data tersebut, dihitung panjang L_j empiris dari beberapa peneliti terdahulu menggunakan persamaan di Tabel 2.1, **Error! Reference source not found.** sebagai berikut:

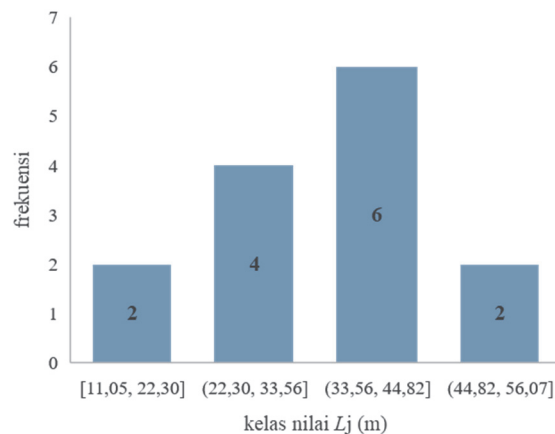
Tabel 3.3 Variasi panjang loncatan hidrolis (L_j) dari peneliti terdahulu.

No.	Peneliti	L_j (m)
1	Riegel dan Beebe (1917)	29,45
2	Safranez (1927)	32,08
3	Woycieki (1934)	40,63
4	Smetana (1934)	35,34
5	Aravin (1935)	31,81
6	Kinney (1935)	35,46
7	Page (1935)	34,55
8	Chertoussov (1935)	11,05
9	Ivanchenko (1935)	31,69
10	Wu (1949)	43,93
11	Hager dkk. (1992)	14,43
12	Marques dkk. (1997)	50,07
13	Simões (2008)	39,55
14	Simões dkk. (2012)	56,07

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Empat belas variasi panjang loncatan hidrolis tersebut dikelompokkan kedalam beberapa kelas menggunakan *Struge's Rule*: $1 + \frac{\log_{10}(14)}{\log_{10}(2)} = 1 + 3.7 \approx 4$ kelas.

Agar bisa diketahui letak sebaran nilai dominan, maka digambarkan histogramnya sebagai berikut:



Gambar 3.9 Histogram nilai L_j dari peneliti terdahulu
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Melihat histogram tersebut—dalam Gambar 3.9—frekuensi terbesar nilai L_j terletak di antara 33,56 m – 44,82 m. Dalam model fisik telah ditetapkan dengan standar USBR II dengan panjang L_j sebesar 31 m, oleh karena itu panjang kolam olakan 31 m mewakili nilai untuk variasi 22,30 m – 33,56 m. Sedangkan untuk mewakili nilai varian terpanjang ditentukan sebesar 53 m karena pertimbangan faktor lokasi bangunan peredam energi yang terbatas. Sehingga penelitian ini akan menggunakan variasi L_j dengan nilai (31 m, 39 m, 53 m). Variasi elevasi dari dasar kolam olakan diambil sebesar (+61 m, +63 m, +65 m), dengan pertimbangan bahwa model fisik yang diuji mempunyai dasar kolam olakan yang telah diturunkan 4 m dari desain standar USBR II. Oleh karena itu efek dari perubahan elevasi ini akan dipelajari dengan cara menaikkan elevasi dasar kolam olakan secara bertahap 2 m menjadi kolam olakan datar standar USBR II. Perlakuan model dan notasinya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 3.4 Variasi perlakuan model.

No.	Perlakuan Model	Notasi	Gambar Teknis
1.	Seri 1/final design dalam uji fisik di laboratorium. Elevasi dasar kolam olakan +61m, Panjang kolam olakan 31m.	E_1-L_1	

No.	Perlakuan Model	Notasi	Gambar Teknis
2.	Elevasi dasar kolam olakan +61m, Panjang kolam olakan 39m.	E ₁ -L ₂	
3.	Elevasi dasar kolam olakan +61m, Panjang kolam olakan 53m.	E ₁ -L ₃	
4.	Elevasi dasar kolam olakan +63m, Panjang kolam olakan 31m.	E ₂ -L ₁	
5.	Elevasi dasar kolam olakan +63m, Panjang kolam olakan 39m.	E ₂ -L ₂	
6.	Elevasi dasar kolam olakan +63m, Panjang kolam olakan 53m.	E ₂ -L ₃	

No.	Perlakuan Model	Notasi	Gambar Teknis
7.	Elevasi dasar kolam olakan +65m, Panjang kolam olakan 31m.	E ₃ -L ₁	
8.	Elevasi dasar kolam olakan +65m, Panjang kolam olakan 39m.	E ₃ -L ₂	
9.	Elevasi dasar kolam olakan +65m, Panjang kolam olakan 53m.	E ₃ -L ₃	

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Arti dari notasi huruf E adalah variasi elevasi dasar kolam olak sedang variasi panjang kolam olak dinotasikan dengan huruf L. Notasi E₁, E₂ dan E₃ mempunyai maksud bahwa model mempunyai variasi elevasi dasar kolam olakan sebesar (+61 m, +63 m dan +65 m), sedangkan notasi L₁, L₂ dan L₃ berarti bahwa variasi panjang kolam olakan di dalam model adalah (31 m, 39 m dan 53 m).

3.6 Kinerja model fisik

Uji model fisik yang telah dilakukan pada bangunan peredam energi dengan elevasi dasar kolam olakan +65 m dan panjang kolam olakan 31 m (E₁-L₁), secara visual diperoleh hasil seperti pada Tabel 3.5. Jika ditinjau dari debit Q₁₀₀ nilai yang didapat D₁= 0,25 m; D₂= 2,04 m; kecepatan rerata di V₁= 10,16 m/dt; V₂= 0,87 m/dt serta Persamaan (2.12) maka efisiensi dari kehilangan energi spesifiknya:

$$E_1 = D_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 0,25 + \frac{10,16^2}{2 \times 9,80665} = 5,513 \text{ m,}$$

$$E_2 = D_2 + \frac{V_2^2}{2g} = 2,04 + \frac{0,87^2}{2 \times 9,80665} = 2,079 \text{ m};$$


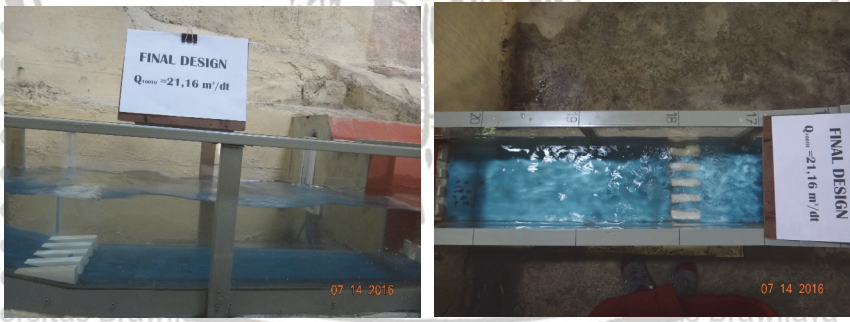
$$E_L = E_1 - E_2 = 5,513 - 2,079 = 3,434 \text{ m};$$

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{(E_1 - E_2)}{E_1} \times 100\% = \frac{3,434}{5,513} \times 100\% = 62,30 \%$$

Klasifikasi kondisi aliran di bagian hilir bangunan peredam energi didefinisikan oleh nilai bilangan Froude di hitung dengan Persamaan (2.1), sebagai berikut:

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot D_2}} = \frac{0,87}{\sqrt{9,80665 \times 2,04}} = 0,19$$

Tabel 3.5 Performa kolam olakan pada uji model fisik dengan debit Q_{100} .

No.	Performa kolam olakan (E1-L1)	Keterangan
1.		Locatan tipe D, seluruh putaran air akibat dari loncatan hidrolis berada di bagian aliran miring.
2.		Aliran yang relatif stabil di sepanjang kolam olakan.

Sumber: Anonim, 2016

Nilai bilangan Froude (F) < 1 mempunyai artinya model mempunyai aliran subkritis hilir peredam energi untuk debit rancangan Q_{100} . Hal ini diperkuat secara pengamatan visual dalam model fisik (Tabel 3.5) aliran yang terjadi di sepanjang kolam olakan relatif stabil.

Dengan cara yang sama, perhitungan untuk debit Q_{1000} dan Q_{PMF} disajikan dalam Tabel 3.6 sebagai berikut:

Tabel 3.6 Efisiensi kehilangan energi di kolam olak dengan debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} .

No.	Debit Kala Ulang	Q m/dt	D_1 m	D_2 m	V_1 m/dt	V_2 m/dt	$E_1 = D_1 + \frac{V_1^2}{2g}$ m	$E_2 = D_2 + \frac{V_2^2}{2g}$ m	$E_L = E_1 - E_2$ m	$\frac{E_L}{E_1}$ %	F
1	Q_{100}	21,16	0,25	2,04	10,16	0,87	5,513	2,079	3,434	62,30	0,19
2	Q_{1000}	23,03	0,44	2,77	12,59	0,87	8,522	2,809	5,713	67,04	0,17
3	Q_{PMF}	67,06	0,73	3,87	16,34	1,74	14,343	4,024	10,319	71,94	0,28

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

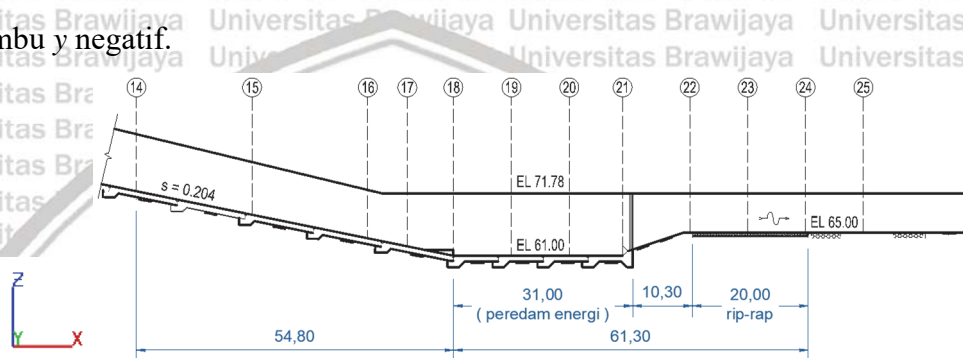
Hasil perhitungan efisiensi kehilangan energi pada Tabel 3.6 menunjukkan bahwa model fisik bangunan peredam energi mempunyai kemampuan yang baik dalam meredam energi untuk semua perlakuan variasi debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} . Perilaku aliran di bagian hilir bangunan peredam energi dengan semua perlakuan variasi debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} , mempunyai aliran subkritis sesuai yang diharapkan dalam proses desain. Pengambilan data pengukuran model fisik di lokasi yang sesuai dengan potongan dengan rentang jarak 10 m sampai dengan 20 m mengakibatkan keterbatasan. Data pengukuran tepat di awal terjadinya loncatan hidrolis atau pengukuran dibagian hilirnya kemungkinan besar tidak terbaca karena lokasi awal loncatan hidrolis dan akhirnya belum bisa diketahui saat proses pembuatan model fisik dan penentuan titik pengukuran.

Oleh karena itu pemodelan numerik dilakukan agar dapat memudahkan proses pembacaan data yang lebih rinci karena rentang jarak pengambilan data diputuskan saat tahap *Post-Processor*. Hasil pembacaan dari pemodelan numerik diharapkan tidak mempunyai perbedaan yang signifikan dengan model fisik. Terutama pada daerah bangkitan di bagian hulu model numerik, sehingga model fisik dan numerik dapat dikatakan mempunyai kecenderungan pola (*trend*) hasil yang serupa.

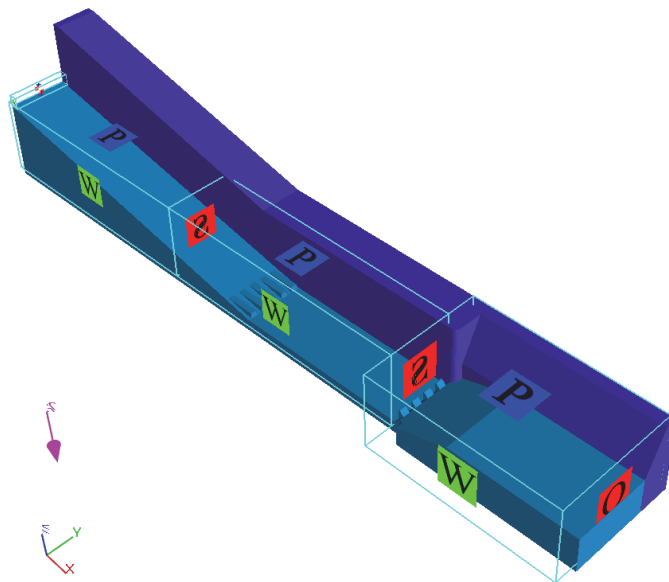
BAB IV HASIL ANALISIS & PEMBAHASAN

4.1 Model numerik

Model numerik yang akan dibuat sebagai verifikasi model numerik dan model fisik dalam penelitian ini adalah antara potongan 14 sampai dengan potongan 25 bangunan pelimpah. Dalam Gambar 4.1, telah dijelaskan bahwa perlakuan model ini termasuk dalam notasi E₁-L₁ dimana model ini adalah desain final dari model fisik. Asumsi arah positif sumbu *x*, *y* dan *z* seperti tertuang dalam Gambar 4.1 dengan titik pandang gambar berasal dari sumbu *y* negatif.



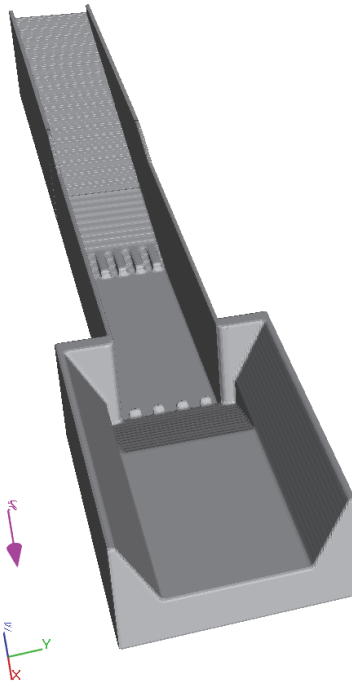
Gambar 4.1 Potongan memanjang model desain final bangunan peredam energi
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.2 Model numerik FLOW-3D seri E₁-L₁ dan kondisi batasnya
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Model pertama dibuat berdasarkan dimensi dan ukuran Seri E₁-L₁ dan disajikan dalam Gambar 4.2. Dapat dijelaskan bahwa saluran masuk (*inlet*) berada pada nilai *x* minimum atau potongan 14 dan saluran keluar (*outlet*) berada pada posisi nilai *x* maksimum atau

potongan 24 yang ditandai dengan notasi O. Kondisi batas model pada sumbu z maximum adalah tekanan udara ditandai dengan notasi huruf P, sedang notasi huruf W menandakan kondisi batas dinding. Arah gravitasi diasumsikan searah dengan sumbu z negatif.



Gambar 4.3 Hasil *mesh* FAVOR model numerik Seri E₁-L₁
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Pembuatan mesh dengan ukuran *cell* (0,25×0,25×0,25) m memanfaatkan fasilitas FAVOR dari perangkat lunak FLOW-3D memberikan detail model numerik, yang bisa merepresentasikan bangunan peredam energi secara baik karena tidak ada celah kosong dari geometri yang dibuat.

4.2 Penyesuaian parameter di model numerik.

Beberapa parameter perlu disesuaikan dari nilai standarnya untuk membuat suatu model numerik agar mendekati model fisik, di dalam perangkat lunak FLOW-3D Parameter tersebut antara lain: nilai kekasaran permukaan (*surface roughness*), vektor kecepatan, tekanan air dan tekanan udara. Nilai parameter tersebut merupakan kondisi batas dan kondisi awal ($t=0$) atas model numerik yang nantinya dilakukan simulasi.

4.2.1 Nilai kekasaran permukaan

Bahan yang digunakan untuk bangunan peredam energi adalah beton. Jika nilai koefisien Manning (n) beton adalah 0,013 maka nilai kekasaran permukaan ekuivalen

(*surface roughness*) yang akan digunakan dalam perangkat lunak FLOW-3D adalah sesuai dengan Persamaan (2.16):

$$k_s = \left(0,013 \frac{1^{\frac{1}{6}}}{0,0389} \right)^6 = 0,001393 \text{ m}$$

4.2.2 Vektor kecepatan

Saat kondisi awal simulasi, dikarenakan nilai kecepatan aliran di saluran peluncur yang didapatkan di laboratorium arah alirannya membentuk sudut kemiringan maka hal tersebut dianggap sebagai vektor resultan. Masukan dalam perangkat lunak FLOW-3D vektor kecepatan kondisi awal ($t=0$) dibuat berdasarkan vektor horizontal (V_u) dan vektor vertikal (V_w) yang masing masing besarnya sesuai dengan nilai kemiringan ($s=0,204$ atau $\alpha=11,530^\circ$) di bagian saluran peluncur. Nilai bacaan kecepatan (V) resultan dalam data di potongan 14 untuk Q_{100} adalah sebesar 10,36 m/dt, maka masing masing vektor kecepatan dihitung sebagai berikut:

$$V_u = 10,36 \times \cos(11,530^\circ) = 6,586 \text{ m/dt;}$$

$$V_w = 10,36 \times \sin(11,530^\circ) = 7,997 \text{ m/dt.}$$

4.2.3 Tekanan air dan udara

Data dari pembacaan tinggi air di potongan 14 di dapatkan sebesar 0,12 m. Jika berat jenis air adalah $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ dan percepatan gravitasi $g = 9,8 \text{ m/dt}^2$ maka tekanan hidrostatis yang terjadi di potongan 14 adalah sebesar:

$$P = \rho \times g \times H = 1.000 \times 9,8 \times 0,12 = 1.176 \text{ Pa.}$$

Sedangkan nilai tekanan udara diasumsikan sebesar 1 atm atau sebesar 101.325 P

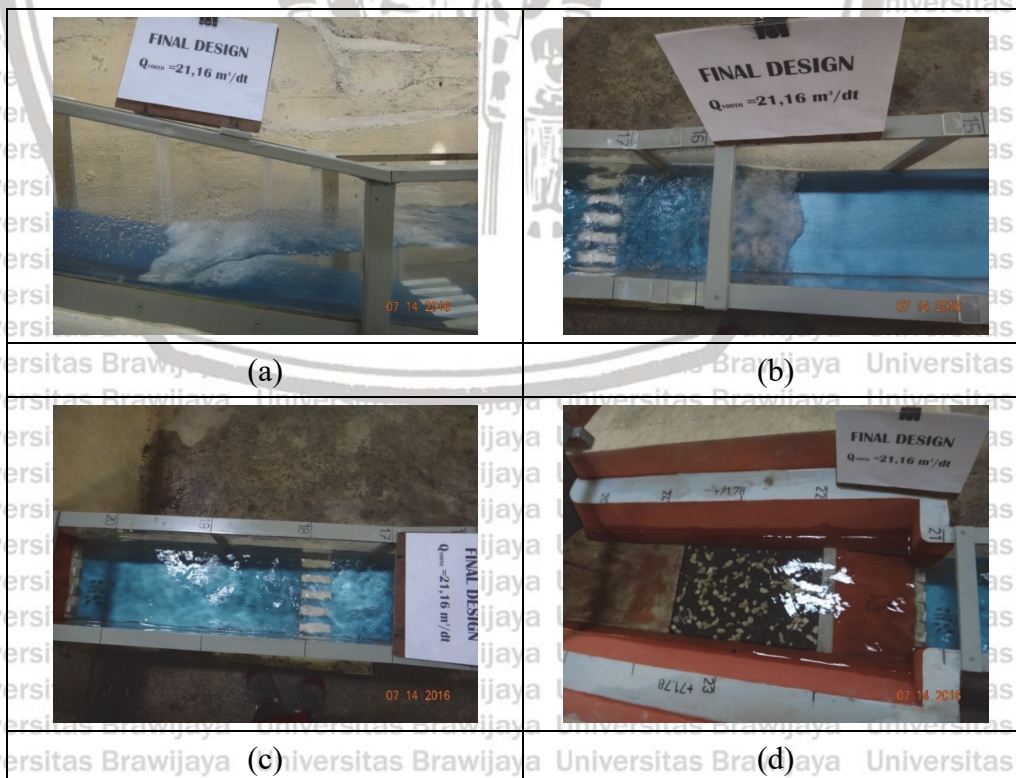
4.3 Verifikasi

Verifikasi yang dilakukan dimaksudkan untuk melakukan pengujian kesesuaian parameter model fisik dengan model numerik. Tolak ukur kesesuaian hasil verifikasi antar model didasarkan pada perbandingan beberapa parameter hasil yang diperoleh dari simulasi model numerik yaitu nilai kecepatan (V), kedalaman air (H) dan bilangan Froude (F). Data yang dipakai sebagai acuan dalam penelitian ini adalah data primer dari hasil analisa dan pengukuran pada model fisik bangunan pelimpah samping Bendungan Randugunting yang dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika Terapan Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Tabel 4.1 Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{100}

Keterangan	No. Sec.	$V_{prototype}$	H_{AIR}	Froude	Jenis Aliran
		m/dt	m		
PELIMPAH	III				
	II	0,87	3,83	0,14	subkritis
	I	0,87	3,81	0,14	subkritis
	0	3,05	0,63	1,23	superkritis
	A	9,12	2,53	1,83	superkritis
SALURAN SAMPING	1	1,29	2,11	0,28	subkritis
	2	0,87	2,11	0,19	subkritis
	3	0,87	2,22	0,19	subkritis
SALURAN TRANSISI	4	1,41	2,32	0,30	subkritis
	5	1,29	2,86	0,24	subkritis
	6	1,41	3,20	0,25	subkritis
SALURAN TRANSISI	7	1,11	3,25	0,20	subkritis
	8	6,12	0,50	2,76	superkritis
	9	7,16	0,47	3,32	superkritis
PELUNCUR	10	7,28	0,55	3,12	superkritis
	11	8,07	0,48	3,72	superkritis
	12	9,25	0,28	5,58	superkritis
	13	9,82	0,30	5,72	superkritis
	14	10,36	0,28	6,25	superkritis
	15	10,16	0,25	6,45	superkritis
	16	1,94	3,19	0,35	subkritis
	17	0,87	4,68	0,13	subkritis
18	0,87	6,14	0,11	subkritis	
STILLING BASIN	19	0,87	6,17	0,11	subkritis
	20	0,87	6,17	0,11	subkritis
	21	0,87	6,17	0,11	subkritis
ESCAPE CHANNEL	22	0,87	2,04	0,19	subkritis
	23	0,87	2,08	0,19	subkritis
	24	0,87	2,04	0,19	subkritis
	25	0,87	2,07	0,19	subkritis
	26	0,87	2,11	0,19	subkritis
	27	0,87	2,07	0,19	subkritis
	28	0,87	2,02	0,20	subkritis
	29	1,23	1,94	0,28	subkritis
BACKWATER			1,99		

Sumber: Anonim, 2016



Gambar 4.4 Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{100}

Sumber: Anonim, 2016

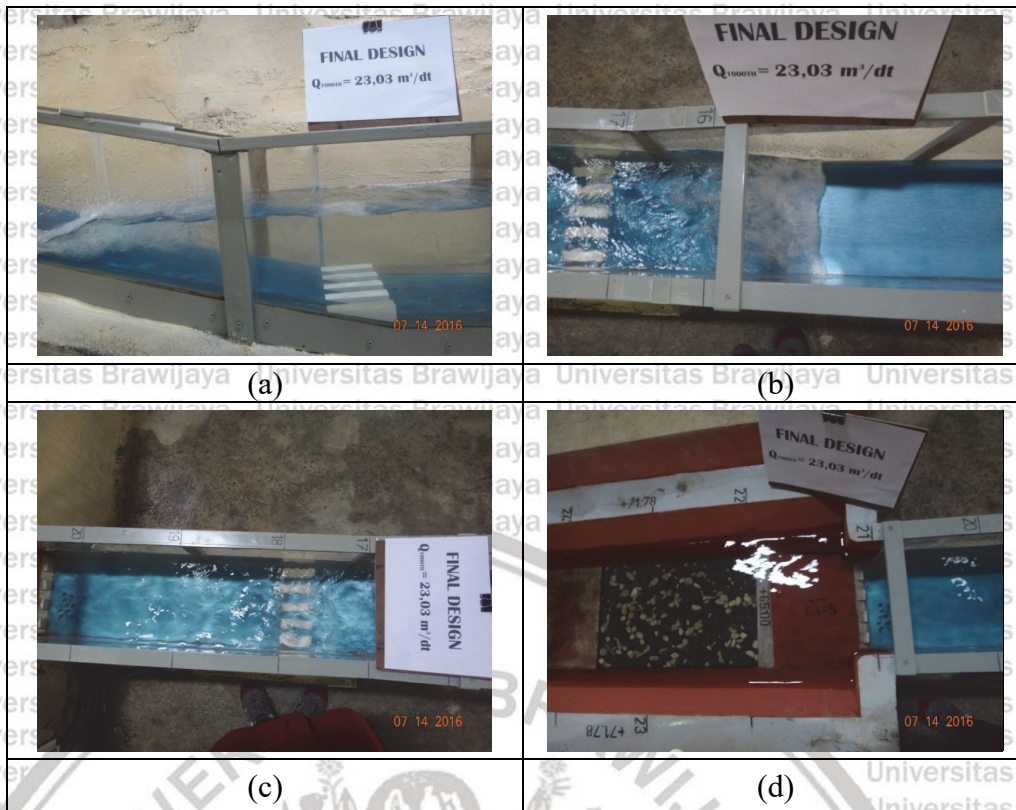
Hasil pengukuran dari model fisik dengan debit Q_{100} dapat dijelaskan dari Tabel 4.1 bahwa aliran superkritis terjadi di potongan 15 sedang untuk potongan selanjutnya semua terjadi aliran subkritis. Dari pengamatan visual model fisik dengan debit Q_{100} disajikan dalam Gambar 4.4 (a) dan (b) awal locatan hidrolis terjadi di bidang miring saluran peluncur dengan akhir loncatan yang ditandai dengan buih berada seluruhnya di bidang miring termasuk klasifikasi loncatan tipe D. Gambar 4.4 (c) dan (d) menunjukkan aliran yang relatif stabil di kolam olakan dan saluran *escape channel*.

Tabel 4.2 Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{1000}

Keterangan	No. Sec.	$V_{prototype}$	H_{AIR}	Froude	Jenis Aliran
		m/dt	m		
PELIMPAH	III				
	II	0,87	4,08	0,14	subkritis
	I	1,13	4,09	0,18	subkritis
	0	5,25	0,64	2,09	superkritis
	A	9,43	2,73	1,82	superkritis
SALURAN SAMPING	1	3,53	2,42	0,73	subkritis
	2	3,85	2,34	0,80	subkritis
	3	4,31	2,41	0,88	subkritis
SALURAN TRANSISI	4	1,61	2,60	0,32	subkritis
	5	2,13	3,08	0,39	subkritis
	6	3,13	3,45	0,54	subkritis
SALURAN TRANSISI	7	3,22	3,49	0,55	subkritis
	8	6,35	0,70	2,42	superkritis
	9	7,34	0,66	2,89	superkritis
PELUNCUR	10	7,63	0,63	3,06	superkritis
	11	9,02	0,66	3,55	superkritis
	12	10,69	0,50	4,83	superkritis
	13	12,07	0,46	5,68	superkritis
	14	12,59	0,44	6,06	superkritis
	15	12,72	0,48	5,86	superkritis
PELUNCUR	16	1,70	3,89	0,28	subkritis
	17	1,11	5,24	0,15	subkritis
	18	1,23	6,74	0,15	subkritis
	19	0,87	6,78	0,11	subkritis
	20	0,87	6,80	0,11	subkritis
	21	0,87	6,80	0,11	subkritis
STILLING BASIN	22	0,87	2,77	0,17	subkritis
	23	0,87	2,67	0,17	subkritis
ESCAPE CHANNEL	24	0,87	2,59	0,17	subkritis
	25	0,87	2,59	0,17	subkritis
	26	0,87	2,67	0,17	subkritis
	27	0,87	2,67	0,17	subkritis
	28	1,74	2,67	0,34	subkritis
	29	2,00	2,59	0,40	subkritis
BACKWATER			2,63		

Sumber: Anonim, 2016

Hasil pengukuran dari model fisik dengan debit Q_{1000} dapat dijelaskan dari Tabel 4.2 diatas bahwa aliran superkritis terjadi di potongan 15 sedang untuk potongan selanjutnya semua terjadi aliran subkritis. Gambar 4.5 (a) dan (b) menunjukkan visualisasi locatan hidrolis yang terjadi di bidang miring saluran peluncur dengan akhir loncatan yang ditandai dengan buih berada seluruhnya di bidang miring akibat debit Q_{1000} sehingga termasuk klasifikasi loncatan tipe D. Sedang di Gambar 4.4 (c) dan (d) menunjukkan aliran yang relatif stabil di kolam olakan dan saluran *escape channel*.



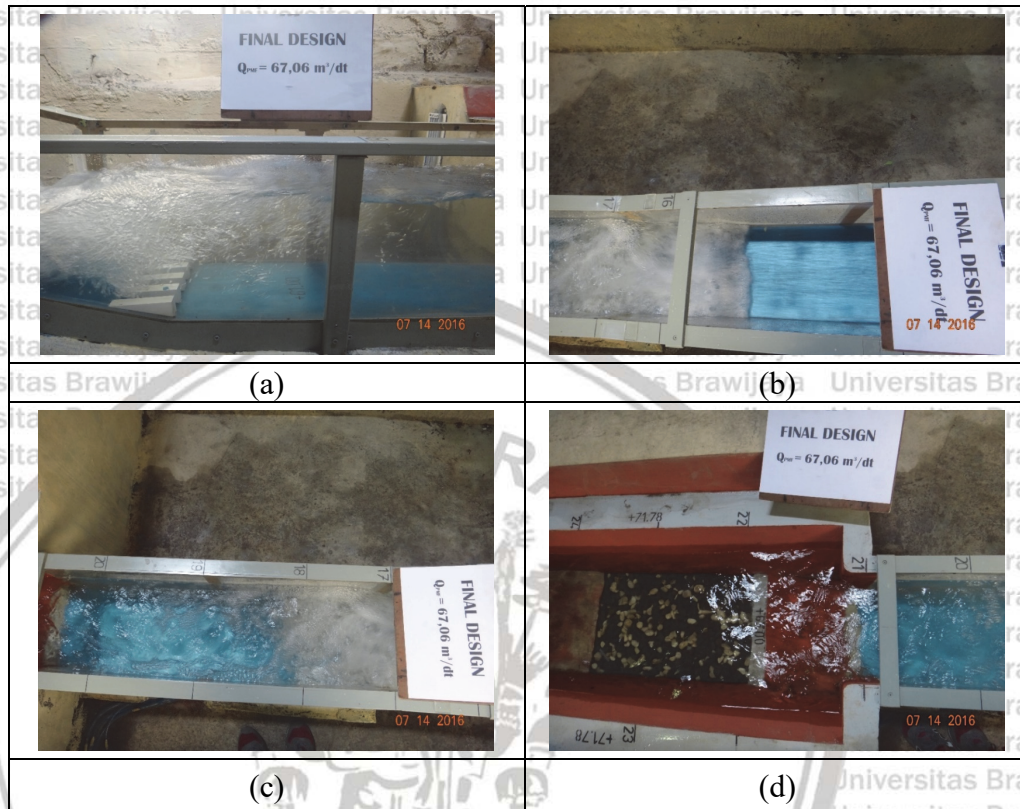
Gambar 4.5 Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{1000}
Sumber: Anonim, 2016

Tabel 4.3 Data pengukuran kecepatan dan ketinggian air desain final di pelimpah dengan Q_{PMF}

Keterangan	No. Sec.	$V_{\text{prototipe}}$	H_{AIR}	Froude	Jenis Aliran
		m/dt	m		
PELIMPAH	III				
	II	0,87	5,19	0,12	subkritis
	I	0,87	5,16	0,12	subkritis
	0	4,57	1,31	1,27	superkritis
	A	9,63	3,03	1,77	superkritis
SALURAN SAMPING	1	1,11	3,75	0,18	subkritis
	2	1,23	3,72	0,20	subkritis
	3	1,73	3,69	0,29	subkritis
SALURAN TRANSISI	4	1,94	3,59	0,33	subkritis
	5	1,58	4,22	0,25	subkritis
SALURAN TRANSISI	6	1,80	4,53	0,27	subkritis
	7	1,94	4,53	0,29	subkritis
	8	7,18	1,30	2,01	superkritis
	9	8,10	1,15	2,41	superkritis
	10	8,97	1,09	2,75	superkritis
PELUNCUR	11	10,84	1,06	3,36	superkritis
	12	13,05	0,79	4,70	superkritis
	13	15,39	0,75	5,66	superkritis
	14	16,34	0,73	6,12	superkritis
	15	16,62	0,71	6,31	superkritis
	16	9,54	3,92	1,54	superkritis
	17	11,09	5,77	1,47	superkritis
STILLING BASIN	18	2,06	8,02	0,23	subkritis
	19	1,66	7,96	0,19	subkritis
	20	1,50	7,93	0,17	subkritis
ESCAPE CHANNEL	21	1,74	7,99	0,20	subkritis
	22	1,74	3,87	0,28	subkritis
	23	1,50	3,91	0,24	subkritis
	24	1,50	3,91	0,24	subkritis
	25	1,50	3,91	0,24	subkritis
	26	1,50	3,87	0,24	subkritis
	27	1,50	3,83	0,25	subkritis
	28	1,74	3,87	0,28	subkritis
	29	2,30	3,51	0,39	subkritis
BACKWATER			3,75		subkritis

Sumber: Anonim, 2016

Hasil pengukuran dari model fisik dengan debit Q_{PMF} dapat dijelaskan dari Tabel 4.3 bahwa aliran superkritis terjadi di potongan 15 sampai dengan 17 sedang untuk potongan selanjutnya semua terjadi aliran subkritis. Ini menandakan bahwa peningkatan debit aliran menggeser posisi awal loncatan hidrolik ke arah hilir.



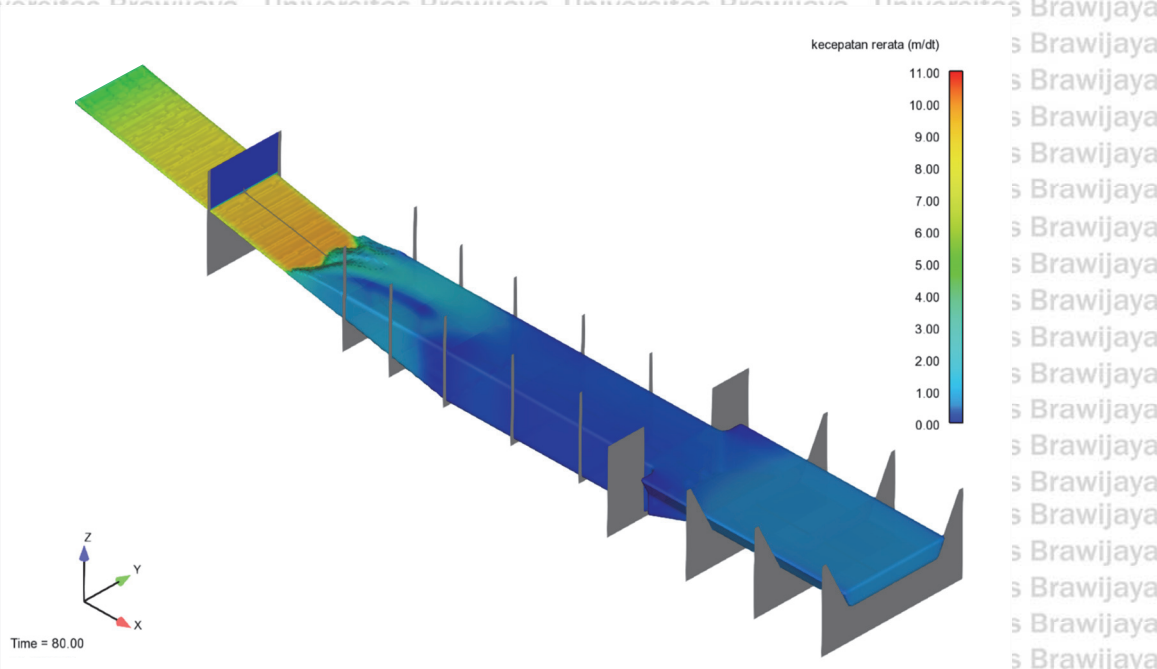
Gambar 4.6 Kondisi aliran di area peredam energi pada aliran debit Q_{PMF}

Pengamatan visual model fisik dengan debit Q_{PMF} disajikan dalam Gambar 4.6 (a) dan (b) awal locatan hidrolik terjadi di bidang miring saluran peluncur walaupun telah bergeser lebih ke arah hilir dibandingkan saat aliran debit Q_{100} atau Q_{1000} namun belum sampai pada awal tekukan lantai bangunan peredam energi. Akhir loncatan hidrolik yang ditandai dengan buih berada dalam kolam olakan sehingga termasuk klasifikasi loncatan tipe B. Gambar 4.4 (c) dan (d) menunjukkan aliran yang relatif stabil di kolam olakan dan saluran *escape channel*.

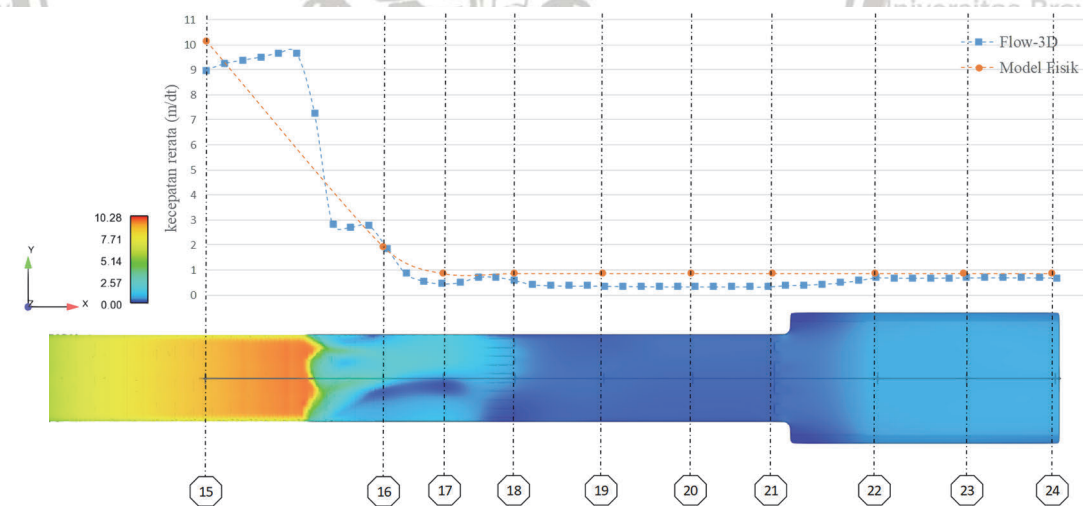
4.3.1 Hasil analisa numerik tentang kecepatan

1. Seri E₁-L₁ pada debit Q₁₀₀

Hasil analisa dari model numerik perangkat lunak Flow-3D ditampilkan dalam bentuk kontur kecepatan seperti dalam Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Kecepatan aliran pada seri E₁-L₁ pada Q₁₀₀
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.8 Grafik profil kecepatan rerata di tengah penampang pada Q₁₀₀
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dalam Gambar 4.8 digambarkan grafik profil kecepatan antara perhitungan model numerik dengan model fisik sehingga didapatkan gambaran performa model numerik dibandingkan dengan model fisik. Hasil bacaan dimulai dari potongan 15 dikarenakan pada potongan 14 merupakan data bangkitan untuk simulasi model numerik ini. Melihat

pola dari profil kecepatan tersebut maka posisi terjadinya awal loncatan hidrolis terjadi diantara potongan 15 dan 16. Hasil ini sesuai dengan apa yang terjadi di model fisik seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.4 (b).

Sedangkan Tabel 4.4 mencoba membandingkan secara langsung nilai yang didapat dari data uji model fisik dengan simulasi model numerik.

Tabel 4.4 Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{100}

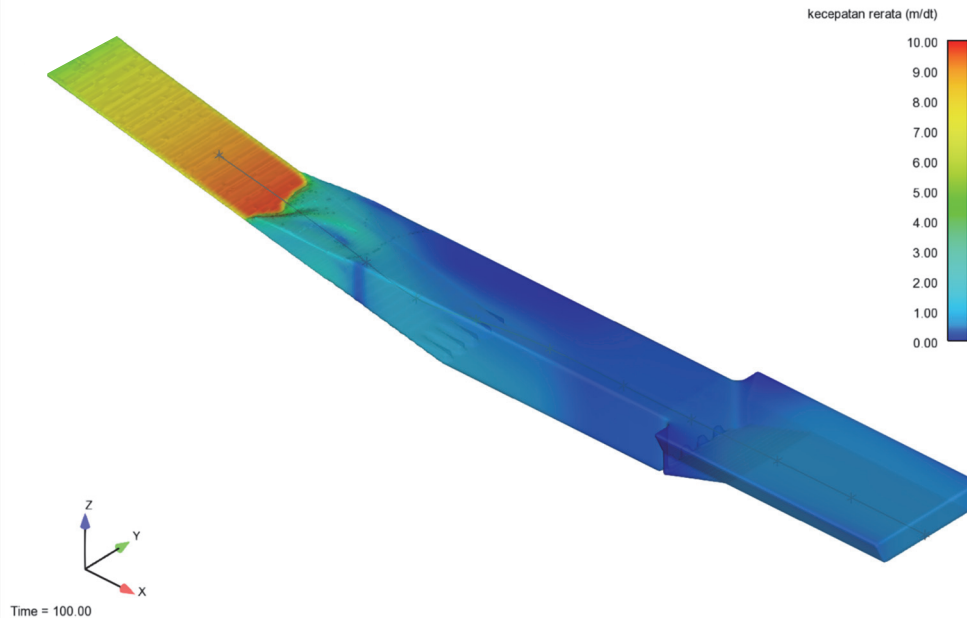
Keterangan	No. Sec.	Kecepatan	
		Model Fisik	Flow-3D
		m/dt	m/dt
PELUNCUR	14	10.36	
	15	10.16	8.98
	16	1.94	1.90
	17	0.87	0.47
	18	0.87	0.55
PEREDAM ENERGI	19	0.87	0.36
	20	0.87	0.34
	21	0.87	0.36
ESCAPE CHANNEL	22	0.87	0.69
	23	0.87	0.70
	24	0.87	0.69

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

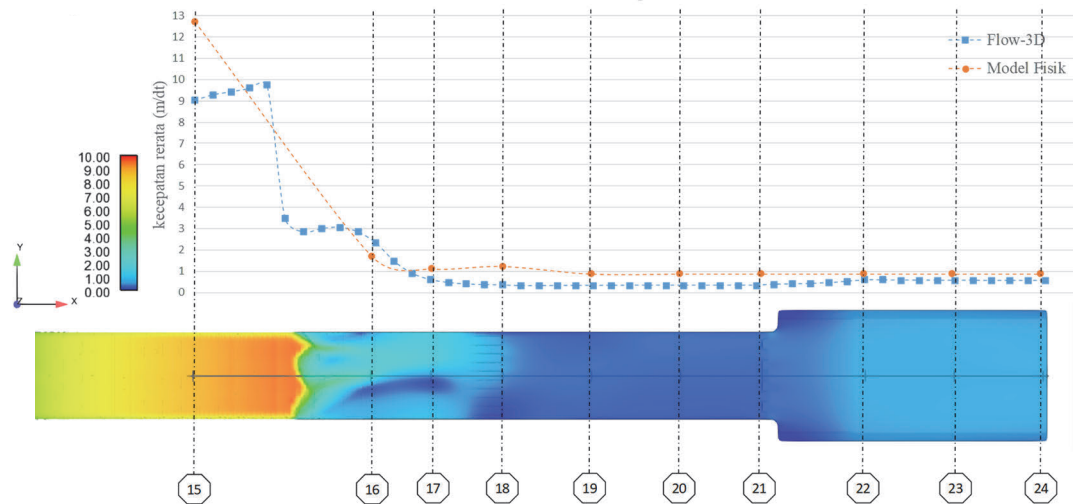
Pembacaan pada potongan 16 mempunyai nilai relatif yang paling mendekati dengan hasil pengukuran di laboratorium. Sedangkan hasil pembacaan di bagian peredam energi mempunyai selisih nilai yang relatif besar. Hal ini bisa dikarenakan bagian tersebut merupakan tempat terjadinya olakan aliran sehingga hasil bacaan yang dilakukan pada model fisik lebih sulit dilakukan dengan ditandainya nilai yang konstan 0,87 m/dt sepanjang saluran peredam energi sampai *escape channel*. Kecenderungan nilai kecepatan model numerik untuk stabil di 0,70 m/dt pada saluran *escape channel* menandakan bahwa *trend* kecepatan kembali meningkat saat meninggalkan kolam olakan dan nilainya mendekati hasil hasil uji model fisik. Efek penurunan dasar elevasi kolam olakan yang mengakibatkan adanya penggenangan dalam kolam olakan dengan maksud untuk meredam kecepatan, dapat ditangkap dengan baik oleh model numerik dengan nilai kecepatan berkisar 0,35 m/dt.

2. Seri E₁-L₁ pada debit Q₁₀₀₀

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat kontur hasil analisa Flow-3D pada debit Q₁₀₀₀ sedangkan profil kecepatan rerata disajikan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.9 Kecepatan aliran pada seri E₁-L₁ pada Q₁₀₀₀
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.10 Grafik profil kecepatan rerata di tengah penampang pada Q₁₀₀₀
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dalam Gambar 4.10 grafik profil kecepatan antara perhitungan model numerik dengan model fisik mempunyai *trend* yang sama. Hasil bacaan potongan 15 mempunyai nilai jauh lebih rendah dengan bacaan hasil model fisik. Perbedaan ini mungkin dikarenakan ada bias dalam pembacaan alat ukur mengingat posisinya di saluran

peluncur model fisik mempunyai kedalaman aliran yang rendah. Selisih debit aliran antara Q_{100} dan Q_{1000} yang kecil memperkuat dugaan tersebut karena fungsi debit adalah berbanding lurus dengan kecepatan. Dilihat di Tabel 4.5 hasil pembacaan kecepatan model di bagian *escape channel* mempunyai nilai yang sama dengan pembacaan pada debit Q_{100} dikarenakan selisih debit yang mengalir kecil.

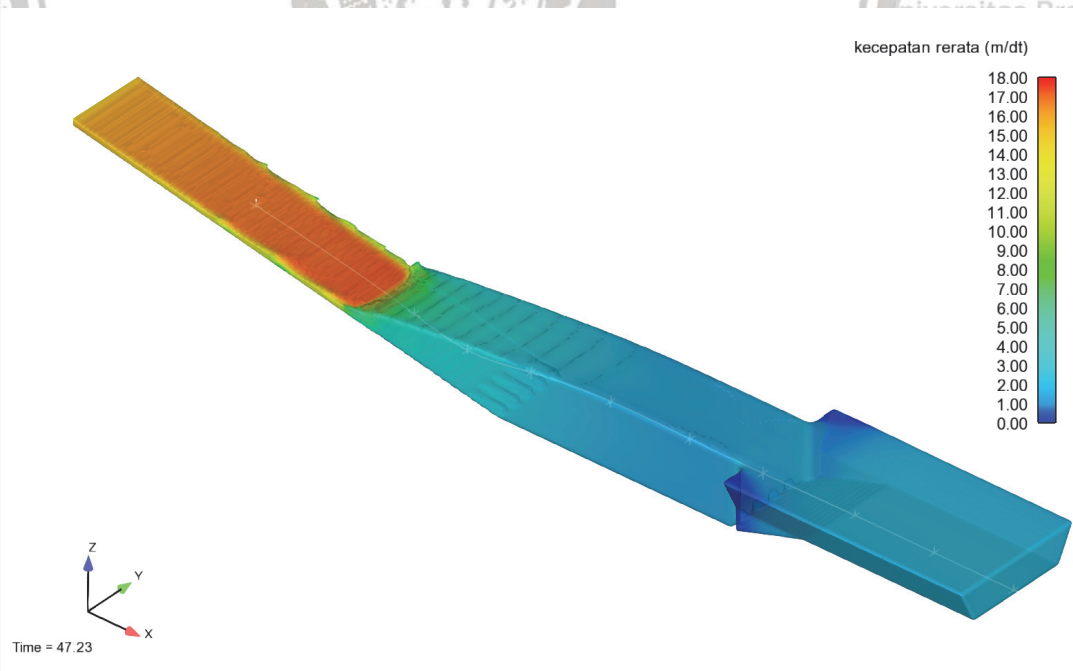
Tabel 4.5 Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{1000}

Keterangan	No. Sec.	Kecepatan	
		Model Fisik	Flow-3D
		m/dt	m/dt
PELUNCUR	14	12.59	
	15	12.72	9.04
	16	1.70	2.35
	17	1.11	0.55
	18	1.23	0.33
PEREDAM ENERGI	19	0.87	0.32
	20	0.87	0.33
	21	0.87	0.36
ESCAPE CHANNEL	22	0.87	0.58
	23	0.87	0.57
	24	0.87	0.56

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

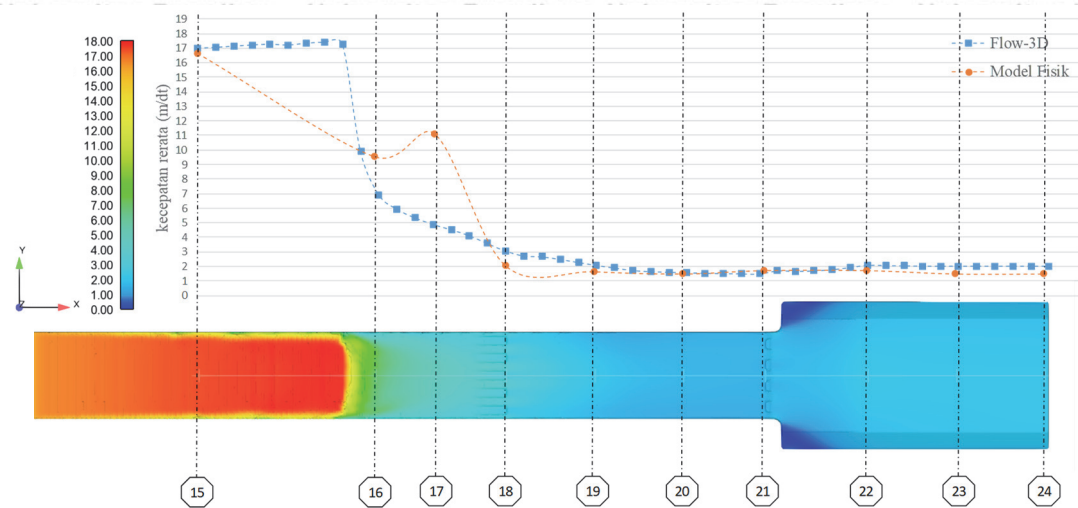
3. Seri E₁-L₁ pada debit Q_{PMF}

Pada debit Q_{PMF} hasil perhitungan model numerik dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan gambaran profil kecepatan dilihat di Gambar 4.12.



Gambar 4.11 Kecepatan aliran pada seri E₁-L₁ pada Q_{PMF}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.12 Grafik profil kecepatan rerata di tengah penampang pada Q_{PMF}
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil bacaan potongan 15 pada Gambar 4.12 mempunyai nilai yang mirip dengan bacaan hasil model fisik dengan selisih sekitar 2,2%. Hasil pembacaan kecepatan pada potongan 16 sampai dengan potongan 19 mempunyai nilai selisih yang besar karena di daerah itu lokasi terjadinya olakan air. Pada bagian *escape channel* hasil pembacaan kecepatan kedua model mempunyai *trend* untuk turun.

Tabel 4.6 Perbandingan kondisi kecepatan aliran pada debit Q_{PMF}

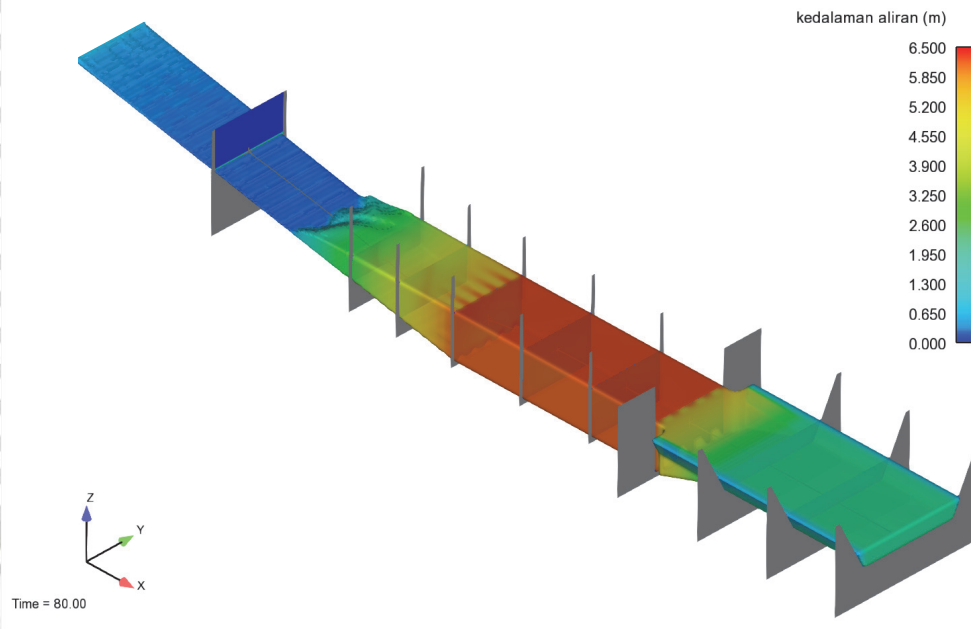
Keterangan	No. Sec.	Kecepatan	
		Model Fisik m/dt	Flow-3D m/dt
PELUNCUR	14	16.34	
	15	16.62	16.98
	16	9.54	7.05
	17	11.09	4.76
	18	2.06	2.97
PEREDAM ENERGI	19	1.66	2.04
	20	1.50	1.57
	21	1.74	1.61
ESCAPE CHANNEL	22	1.74	2.08
	23	1.50	2.02
	24	1.50	2.02

Sumber : Hasil Perhitungan, 2017

4.3.2 Hasil analisa numerik tentang kedalaman aliran

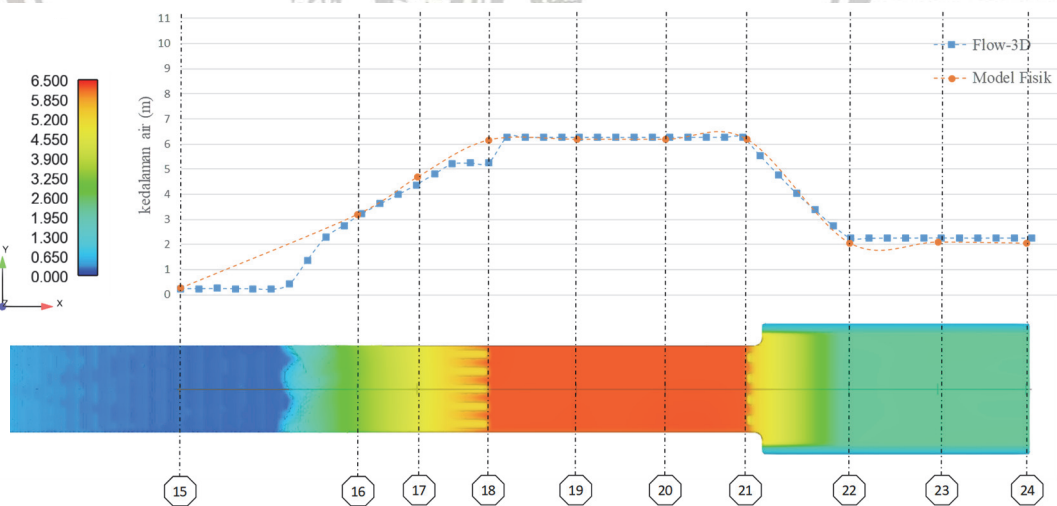
1. Seri E₁-L₁ pada debit Q₁₀₀

Hasil analisa model numerik Flow-3D tentang kedalaman aliran pada debit Q₁₀₀ dilihat pada Gambar 4.13 dan profil kedalaman air nya dalam Gambar 4.14.



Gambar 4.13 Kedalaman aliran pada seri E₁-L₁ pada Q₁₀₀

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.14 Grafik profil kedalaman aliran pada Q₁₀₀

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Secara umum profil kedalaman aliran mendekati sama dengan hasil model fisik.

Pada potongan 18 terlihat seperti ada penurunan kedalaman dikarenakan posisi pengukuran dilakukan tepat mengenai profil gigi pemencar.

Tabulasi perbandingan kedalaman air antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{100} disajikan dalam Tabel 4.7. Selisih semua pembacaan menunjukkan nilai diibawah 10%.

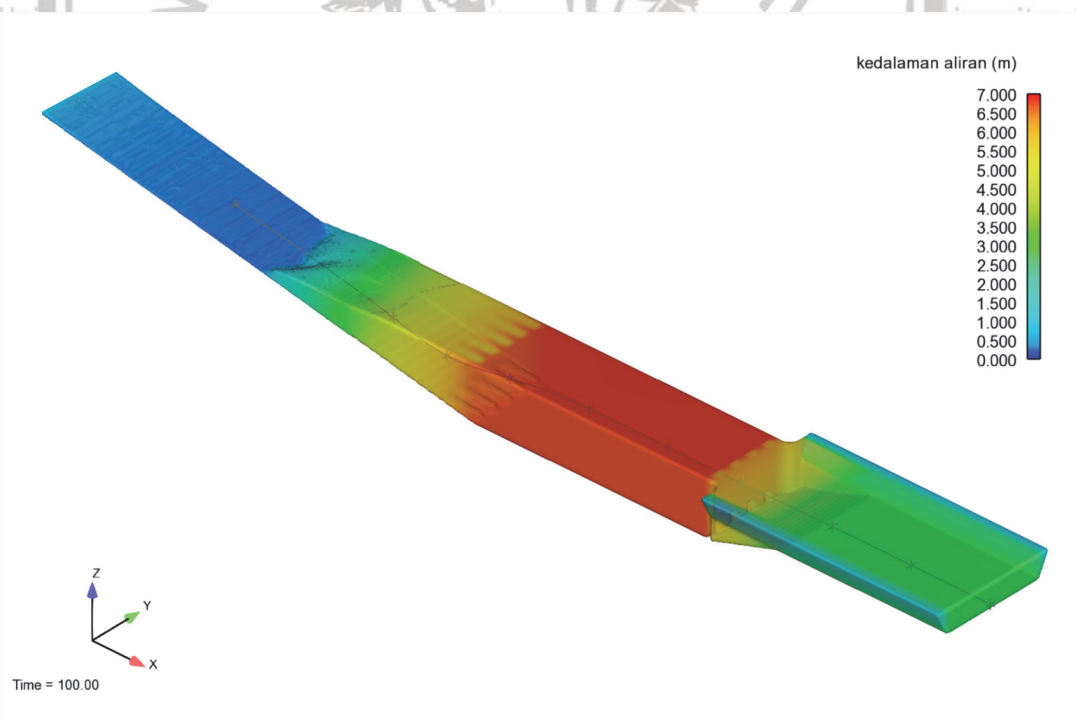
Tabel 4.7 Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{100}

Keterangan	No. Sec.	Kedalam air	
		Model Fisik	Flow-3D
		m	m
PELUNCUR	14	0.28	
	15	0.25	0.24
	16	3.19	3.21
	17	4.68	4.52
	18	6.14	5.54
PEREDAM ENERGI	19	6.17	6.26
	20	6.17	6.26
	21	6.17	5.84
ESCAPE CHANNEL	22	2.04	2.25
	23	2.08	2.26
	24	2.04	2.25

Sumber : Hasil Perhitungan, 2017

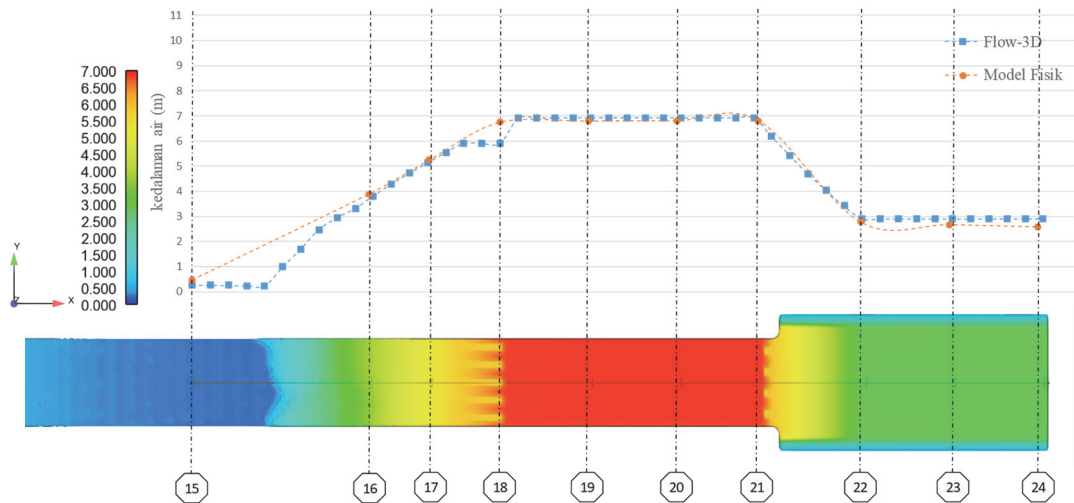
2. Seri E₁-L₁ pada debit Q_{1000}

Sedang untuk debit Q_{1000} kontur kedalaman air hasil perhitungan Flow 3D dilihat pada Gambar 4.15 dan profilnya ada dalam Gambar 4.16.



Gambar 4.15 Kedalaman aliran pada seri E₁-L₁ pada Q_{1000}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.16 Grafik profil kedalaman aliran pada Q_{1000}

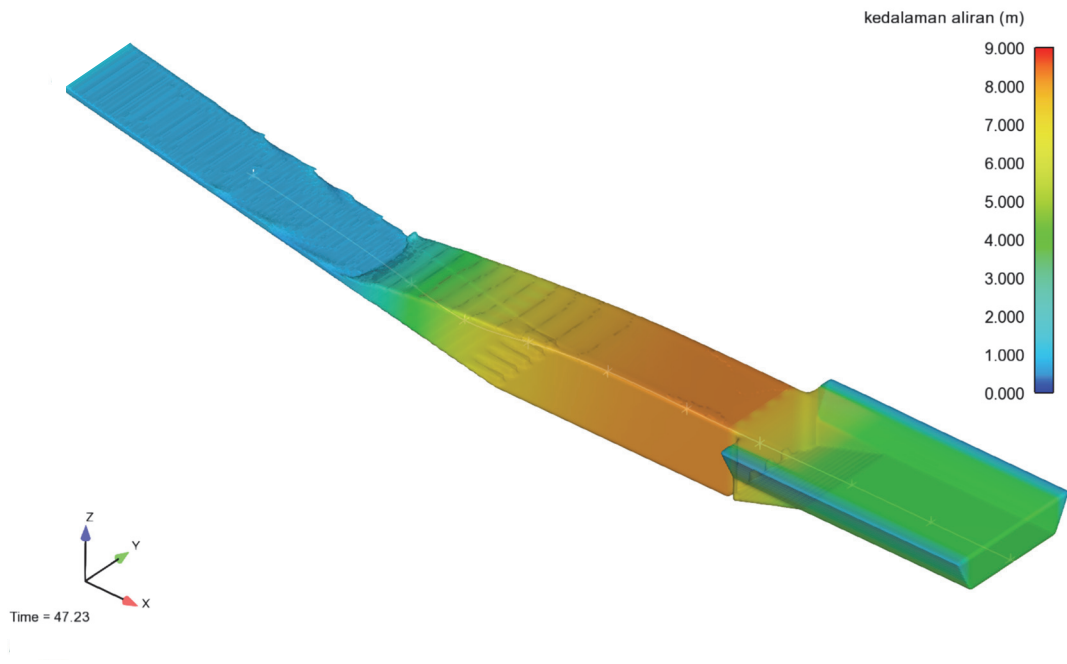
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Secara umum profil kedalaman aliran mendekati sama dengan hasil model fisik dengan selisih kurang dari 10% kecuali pada posisi di potongan 15. Hasil pembacaan kedalaman aliran ini bertolak belakang dengan hasil pembacaan kecepatan, yang secara umum mempunyai selisih relatif besar. Tabulasi perbandingan kedalaman air antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{1000} disajikan dalam Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{1000}

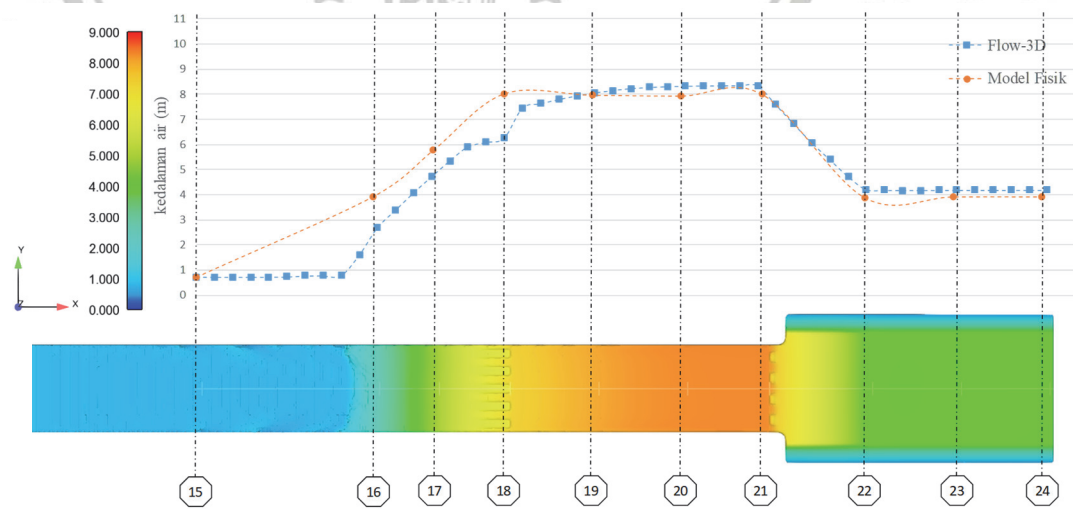
Keterangan	No. Sec.	Kedalam air	
		Model Fisik m	Flow-3D m
PELUNCUR	14	0.44	
	15	0.48	0.26
	16	3.89	3.79
	17	5.24	5.26
	18	6.74	6.18
PEREDAM ENERGI	19	6.78	6.91
	20	6.80	6.91
	21	6.80	6.49
ESCAPE CHANNEL	22	2.77	2.90
	23	2.67	2.90
	24	2.59	2.90

Sumber : Hasil Perhitungan, 2017

3. Seri E₁-L₁ pada debit Q_{PMF}

Gambar 4.17 Kedalaman aliran pada seri E₁-L₁ pada Q_{PMF}
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Kontur kedalaman air hasil perhitungan FLOW-3D untuk debit Q_{PMF} dilihat pada Gambar 4.17 dan profilnya ada dalam Gambar 4.18. Secara garis besar hasilnya mempunyai profil yang sama di bagian yang tidak terjadi loncatan hidrolis atau pusran air. Terjadinya perbedaan hasil ini dimungkinkan terjadi karena teknik pembacaan di aliran yang terjadi pusran biasanya diambil nilai maksimumnya, sedangkan hasil dari model numerik adalah saat waktu simulasi dianggap dalam kondisi *steady*.



Gambar 4.18 Grafik profil kedalaman pada Q_{PMF}
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabulasi perbandingan kedalaman air antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{PMF} disajikan dalam Tabel 4.9. Pada potongan 16 dan 17 terjadi selisih diatas 10% dimungkinkan terjadi karena proses pengambilan data seperti yang dijelaskan diatas. Sedangkan di potongan 18 jika hasil pembacaan kedalaman aliran model numerik ditambahkan satu meter tinggi profil gigi pemecah maka selisihnya menjadi 5,36%.

Tabel 4.9 Perbandingan kondisi kedalaman air pada debit Q_{PMF}

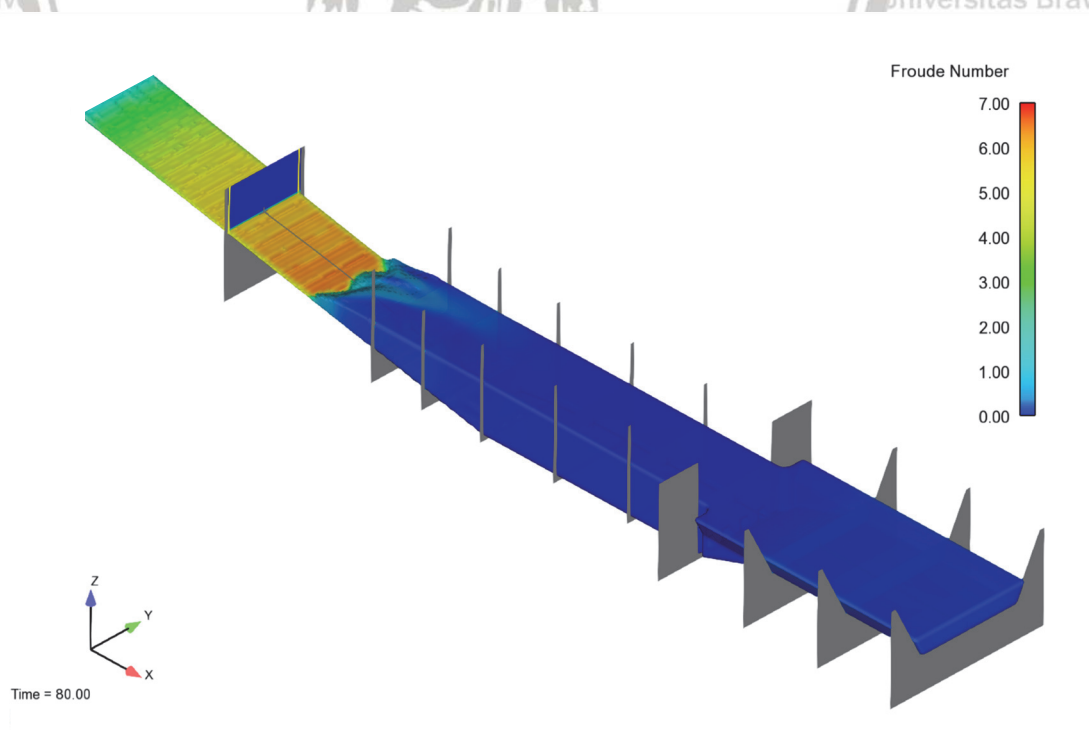
Keterangan	No. Sec.	Kedalam air	
		Model Fisik	Flow-3D
		m	m
PELUNCUR	14	0.73	
	15	0.71	0.73
	16	3.92	2.65
	17	5.77	4.94
	18	8.02	6.59
PEREDAM ENERGI	19	7.96	8.08
	20	7.93	8.32
	21	7.99	7.92
ESCAPE CHANNEL	22	3.87	4.20
	23	3.91	4.18
	24	3.91	4.18

Sumber : Hasil Perhitungan, 2017

4.3.3 Hasil analisa numerik tentang bilangan Froude

1. Seri E₁-L₁ pada debit Q₁₀₀

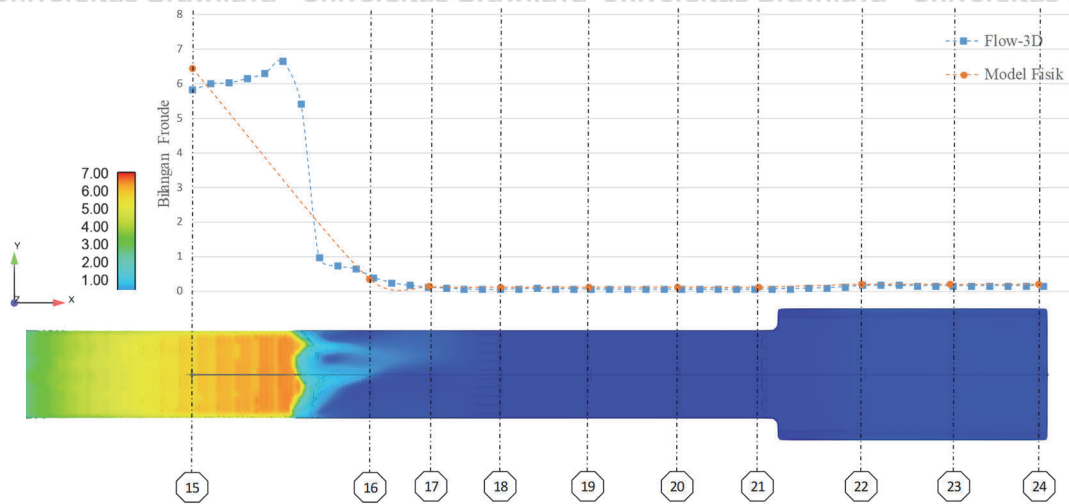
Gambaran kontur nilai bilangan Froude dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Bilangan Froude pada seri E₁-L₁ pada Q₁₀₀

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Profil bilangan Froude dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{100}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabulasi perbandingan bilangan Froude antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{100} disajikan dalam Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{100}

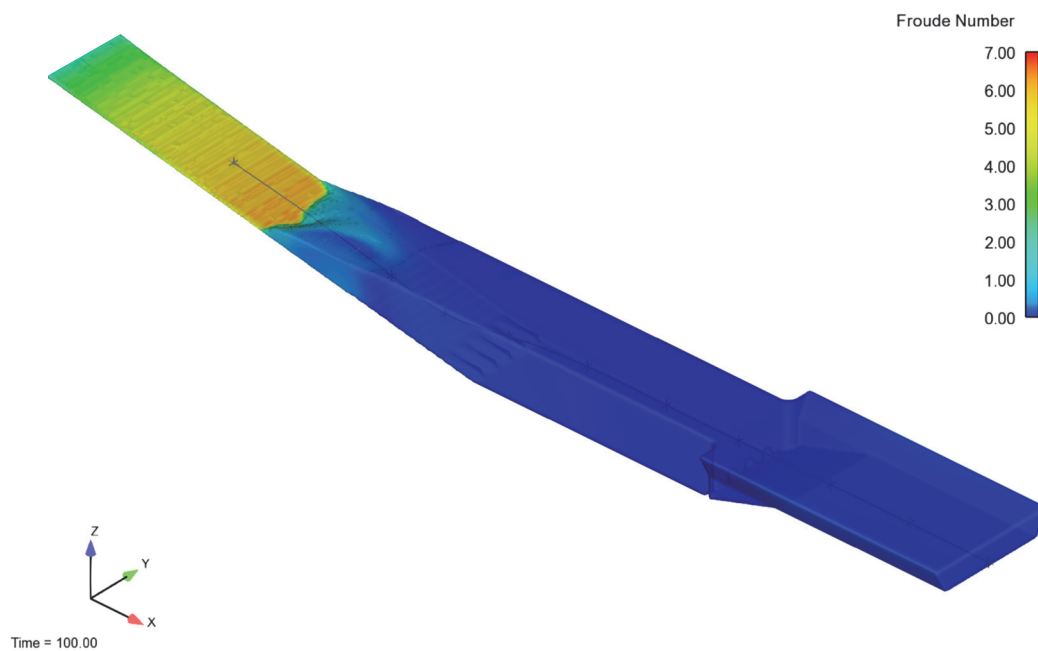
Keterangan	No. Sec.	Bilangan Froude	
		Model Fisik	Flow-3D
PELUNCUR	14	6,249	
	15	6,446	5,819
	16	0,347	0,390
	17	0,128	0,092
	18	0,112	0,045
PEREDAM ENERGI	19	0,112	0,048
	20	0,112	0,044
	21	0,112	0,048
ESCAPE CHANNEL	22	0,194	0,151
	23	0,192	0,148
	24	0,194	0,146

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Pada potongan 15 yang terletak pada saluran peluncur hasil pembacaan bilangan Froude mencerminkan kondisi aliran superkritis. Pada potongan 16 yang letaknya setelah loncatan hidrolik nilai bilangan Froude mencerminkan kondisi sub kritis. Posisi awal loncatan terletak diantara potongan 15 dan 16 maka data perubahan nilai bilangan Froude tidak tersedia untuk model fisik. Data tersebut dapat diperoleh secara lebih rinci dari model numerik dalam Gambar 4.20, terlihat bahwa terjadi penurunan nilai bilangan Froude secara tajam di lokasi terjadinya loncatan hidrolik. Hal ini serupa dengan pola profil kecepatannya karena fungsi bilangan Froude tergantung dengan variabel kecepatan.

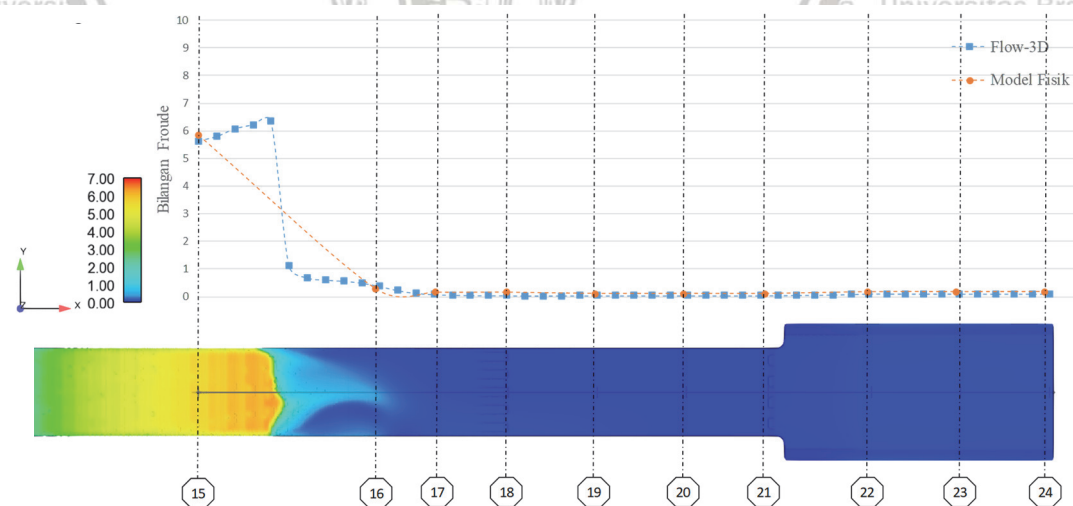
2. Seri E₁-L₁ pada debit Q_{1000}

Sedang untuk debit Q_{1000} kontur bilangan Froude hasil perhitungan Flow 3D dilihat pada Gambar 4.21 dan profilnya ada dalam Gambar 4.22. Dari profil dan kontur tersebut dapat dilihat bahwa setelah potongan 16 nilai bilangan Froude adalah mencerminkan aliran subkritis.



Gambar 4.21 Bilangan Froude pada seri E₁-L₁ pada Q_{1000}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.22 Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{1000}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Detail perbandingan bilangan Froude antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{1000} disajikan dalam Tabel 4.11.

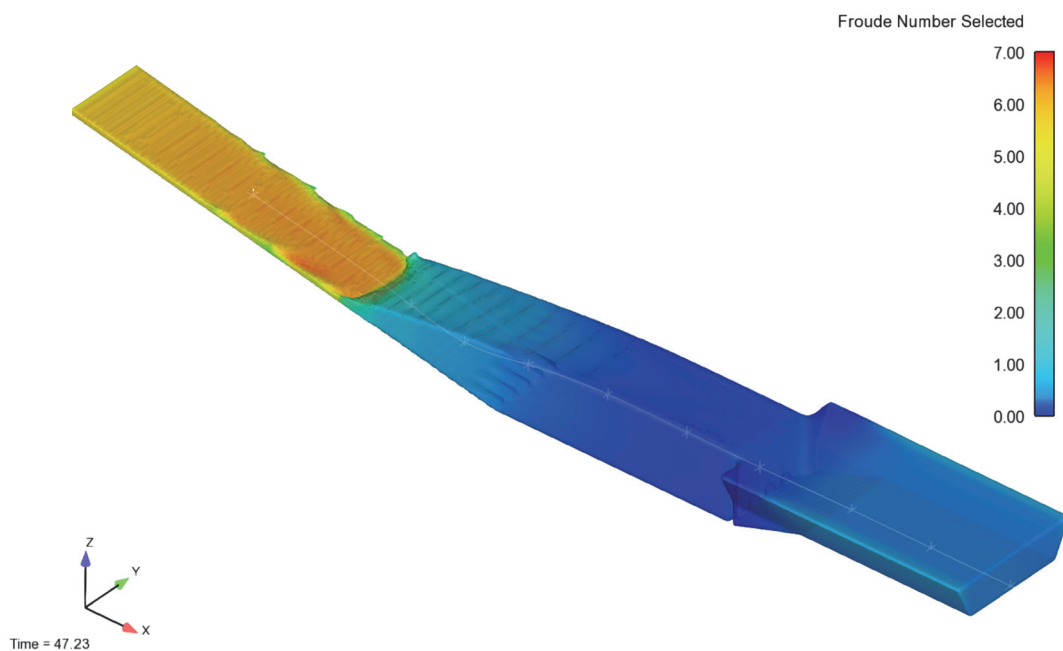
Tabel 4.11 Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{1000}

Keterangan	No. Sec.	Bilangan Froude	
		Model Fisik	Flow-3D
PELUNCUR	14	6.06	
	15	5.86	5.64
	16	0.28	0.39
	17	0.15	0.08
	18	0.15	0.04
PEREDAM ENERGI	19	0.11	0.04
	20	0.11	0.04
	21	0.11	0.05
ESCAPE CHANNEL	22	0.17	0.11
	23	0.17	0.11
	24	0.17	0.11

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Sesuai dengan pola kontur kecepatan dan profil kecepatannya, nilai bilangan Froude mencerminkan aliran subkritis pada saluran *escape channel*.

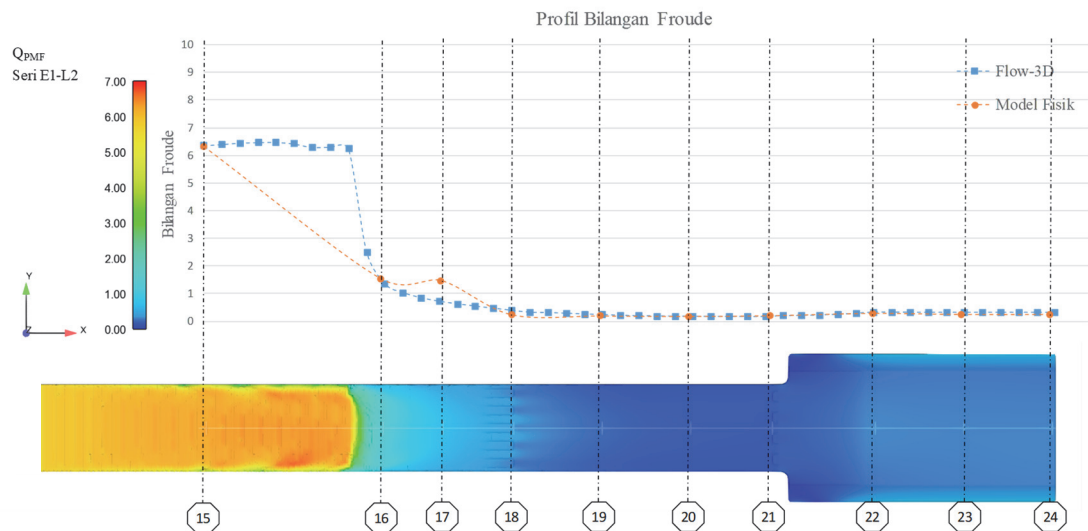
3. Seri E1-L1 pada debit Q_{PMF}



Gambar 4.23 Bilangan Froude pada seri E1-L1 pada Q_{PMF}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Gambaran nilai bilangan Froude dalam bentuk kontur untuk debit Q_{PMF} dapat dilihat pada Gambar 4.23 sedang profilnya memanjangnya dilihat pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik profil bilangan Froude di tengah penampang pada Q_{PMF}

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabulasi perbandingan bilangan Froude antara perhitungan numerik dan data pengamatan model fisik untuk Q_{PMF} disajikan dalam Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perbandingan kondisi bilangan Froude pada debit Q_{PMF}

Keterangan	No. Sec.	Bilangan Froude	
		Model Fisik	Flow-3D
PELUNCUR	14	6,121	
	15	6,311	6,353
	16	1,538	1,395
	17	1,475	0,685
	18	0,233	0,371
PEREDAM ENERGI	19	0,188	0,230
	20	0,170	0,174
	21	0,196	0,183
	22	0,282	0,324
ESCAPE CHANNEL	23	0,243	0,316
	24	0,243	0,316

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Sesuai dengan pola kontur kecepatan dan profil kecepatannya, nilai bilangan Froude mencerminkan aliran subkritis pada saluran *escape channel*. Nilai tersebut lebih tinggi dari dari bagian akhir kolam olakan karena terjadi penurunan luas penampang di saluran *escape channel*.

4.3.4 Rekapitulasi hasil model numerik seri E₁-L₁

Berikut hasil rekapitulasi hasil perhitungan model numerik untuk nilai kecepatan (V), kedalaman air (H) dan bilangan Froude (F).

Tabel 4.13 Rekapitulasi hasil nilai kecepatan perhitungan FLOW-3D untuk seri E₁-L₁

Keterangan	No. Sec.	Model Fisik			Model Numerik FLOW-3D		
		Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}	Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}
		m	m	m	m	m	m
PELUNCUR	15	10,16	12,72	16,62	8,98	9,04	16,98
	16	1,94	1,70	9,54	1,90	2,35	7,05
	17	0,87	1,11	11,09	0,47	0,55	4,76
	18	0,87	1,23	2,06	0,55	0,33	2,97
STILLING BASIN	19	0,87	0,87	1,66	0,36	0,32	2,04
	20	0,87	0,87	1,50	0,34	0,33	1,57
	21	0,87	0,87	1,74	0,36	0,36	1,61
ESCAPE CHANNEL	22	0,87	0,87	1,74	0,69	0,58	2,08
	23	0,87	0,87	1,50	0,70	0,57	2,02
	24	0,87	0,87	1,50	0,69	0,56	2,02

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.14 Rekapitulasi hasil nilai kedalaman air perhitungan FLOW-3D untuk seri E₁-L₁

Keterangan	No. Sec.	Model Fisik			Model Numerik FLOW-3D		
		Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}	Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}
		m	m	m	m	m	m
PELUNCUR	15	0,28	0,48	0,71	0,24	0,26	0,73
	16	0,25	3,89	3,92	3,21	3,79	2,65
	17	3,19	5,24	5,77	4,52	5,26	4,94
	18	4,68	6,74	8,02	5,54	6,18	6,59
STILLING BASIN	19	6,14	6,78	7,96	6,26	6,91	8,08
	20	6,17	6,80	7,93	6,26	6,91	8,32
	21	6,17	6,80	7,99	5,84	6,49	7,92
ESCAPE CHANNEL	22	6,17	2,77	3,87	2,25	2,90	4,20
	23	2,04	2,67	3,91	2,26	2,90	4,18
	24	2,08	2,59	3,91	2,25	2,90	4,18

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Tabel 4.15 Rekapitulasi hasil bilangan Froude perhitungan FLOW-3D untuk seri E₁-L₁

Keterangan	No. Sec.	Model Fisik			Model Numerik FLOW-3D		
		Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}	Debit Q ₁₀₀	Debit Q ₁₀₀₀	Debit Q _{PMF}
		m	m	m	m	m	m
PELUNCUR	15	6,446	5,861	6,311	5,819	5,639	6,353
	16	0,347	0,276	1,538	0,390	0,385	1,395
	17	0,128	0,155	1,475	0,092	0,077	0,685
	18	0,112	0,151	0,233	0,045	0,043	0,371
STILLING BASIN	19	0,112	0,106	0,188	0,048	0,039	0,230
	20	0,112	0,106	0,170	0,044	0,041	0,174
	21	0,112	0,106	0,196	0,048	0,045	0,183
ESCAPE CHANNEL	22	0,194	0,167	0,282	0,151	0,110	0,324
	23	0,192	0,170	0,243	0,148	0,106	0,316
	24	0,194	0,172	0,243	0,146	0,105	0,316

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.3.5 Performa model numerik seri E₁-L₁

Hasil verifikasi dari model numerik dibandingkan dengan model fisik mempunyai kemiripan dan *trend* yang sama. Kedua model diharapkan sekecil mungkin mempunyai selisih hasil, terutama di titik-titik awal dari data yang dipakai sebagai masukan simulasi. Dari data diatas di ketahui bahwa perbedaan yang signifikan terjadi pada data hasil perhitungan

kecepatan dengan debit bangkitan Q_{1000} dengan nilai sekitar 28,93% dan data data berikutnya di sepanjang saluran peluncur tidak ada yang mempunyai selisih kurang dari 10%. Perbedaan hasil dimungkinkan banyak faktor, bisa dikarenakan kemampuan alat yang terbatas di dalam model fisik sehingga perbedaan debit yang sangat kecil antara Q_{100} dan Q_{1000} menghasilkan debit bangkitan dalam batas margin kesalahan. Faktor kesalahan pembacaan dan pencatatan serta data-data hasil proses interpolasi dari model numerik juga bisa berpengaruh. Namun secara keseluruhan performa model numerik dengan kondisi batas dan kondisi awal cukup baik dengan ditandai selisih di titik-titik awal saluran peluncur $<10\%$ untuk variabel V , H dan bilangan Froude, oleh karena itu kondisi awal ini akan dipakai untuk simulasi model numerik seri lainnya.

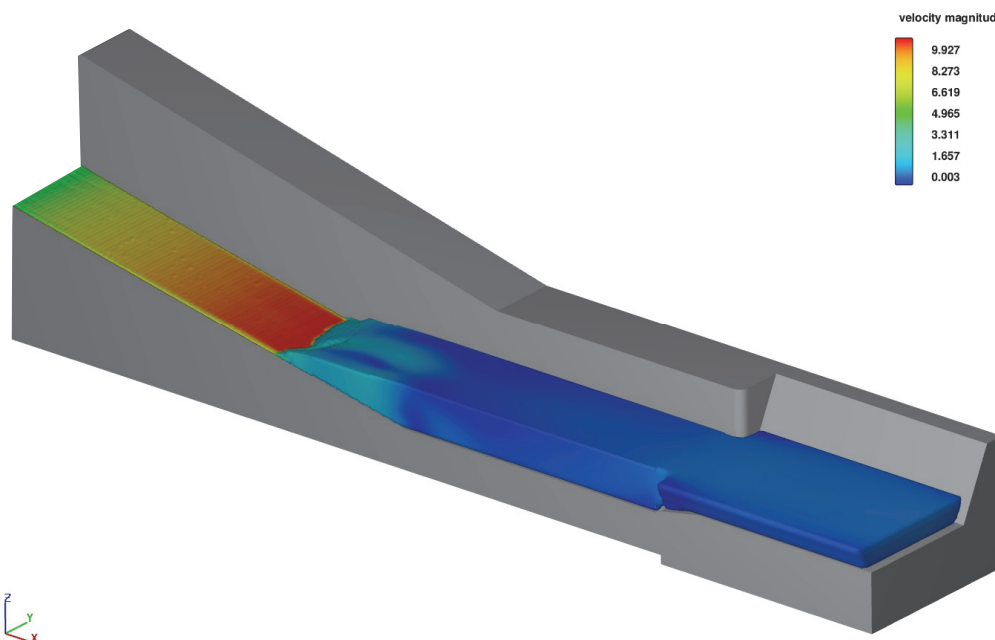
4.4 Hasil Analisa Model Numerik

4.4.1 Analisa Kecepatan

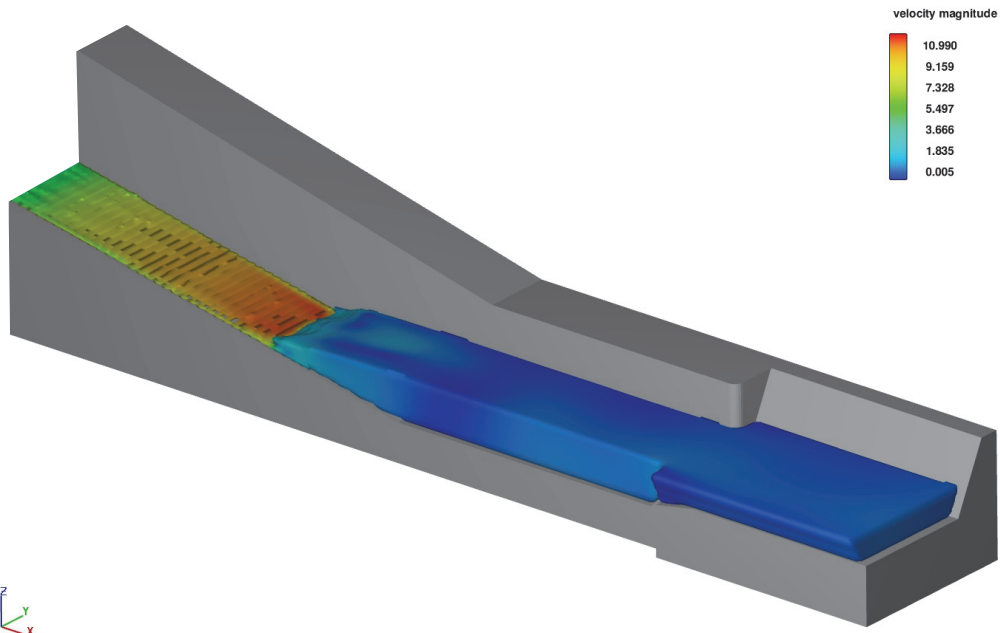
Penyajian hasil analisa kecepatan menurut debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} berikut di kelompokkan berdasarkan panjang kolam olakan.

1. Analisa kecepatan panjang kolam olakan 31m (L_1)

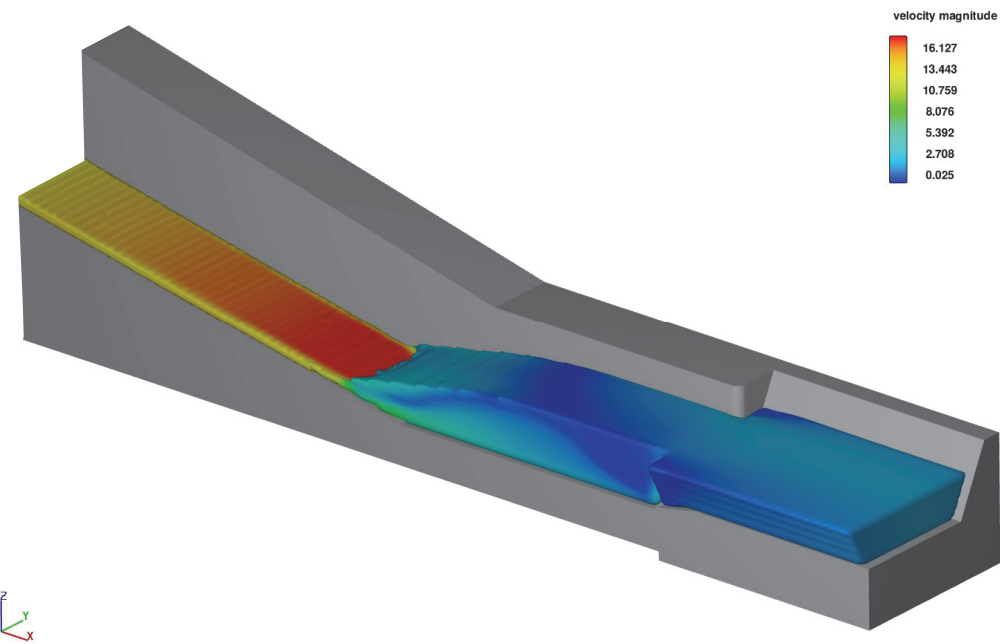
Berikut disajikan hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +63 m (E_2) untuk semua variasi debit.



Gambar 4.25 Profil kecepatan Q_{100} pada E_2-L_1
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



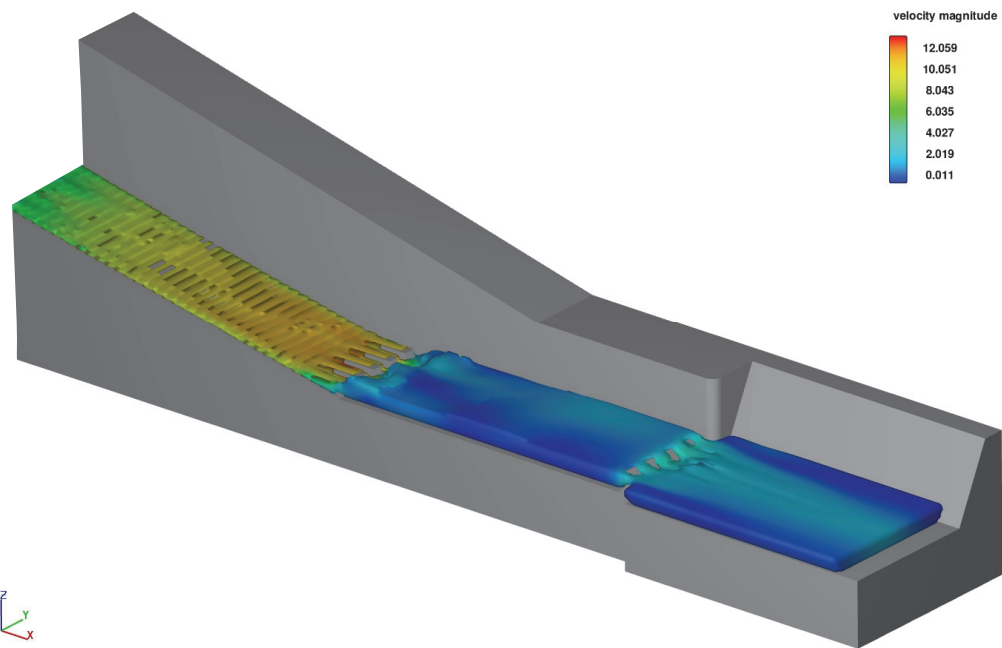
Gambar 4.26 Profil kecepatan Q_{1000} pada E2-L1
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



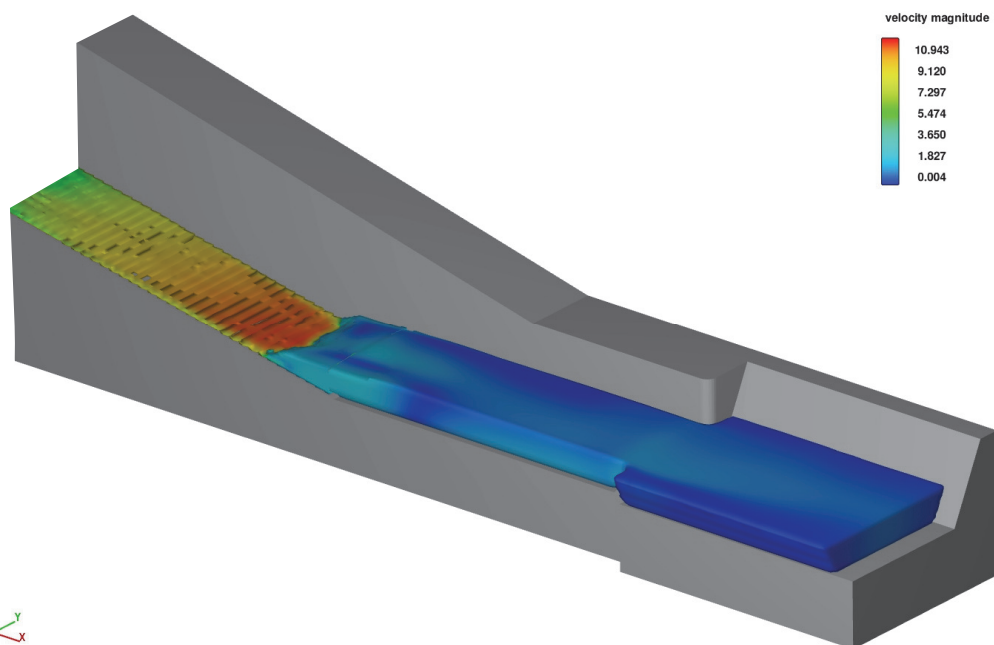
Gambar 4.27 Profil kecepatan Q_{PMF} pada E2-L1
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari Gambar 4.25, Gambar 4.26, Gambar 4.27 dijelaskan bahwa akibat perlakuan peninggian elevasi dasar kolam olakan menjadi +63 m meningkatkan kecepatan aliran di seluruh bagian bangunan peredam energi. Model E2-L1 ini mempunyai performa baik untuk semua perlakuan debit.

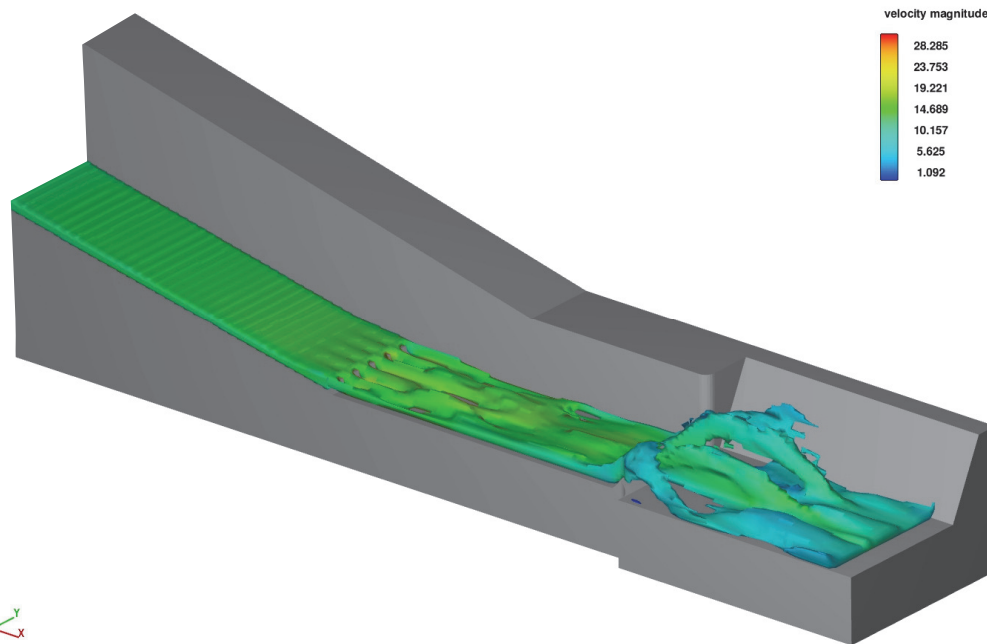
Berikut disajikan hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +65 m untuk semua variasi debit.



Gambar 4.28 Profil kecepatan Q_{100} pada E3-L1
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.29 Profil kecepatan Q_{1000} pada E3-L1.
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.30 Profil kecepatan Q_{PMF} pada E₃-L₁.

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari Gambar 4.28, Gambar 4.29, Gambar 4.30 dijelaskan model E₃-L₁ ini mempunyai performa baik untuk perlakuan debit Q_{100} dan Q_{1000} akan tetapi gagal saat perlakuan debit Q_{PMF} .

Hasil analisa kecepatan model numerik dengan panjang kolam olakan 31 m (L₁) untuk elevasi dasar kolam olakan +61 m (E₁), +63 m (E₂) dan +65 m (E₃) disajikan dalam Tabel 4.16. Dari tabel tersebut dapat dijelaskan bahwa akibat perlakuan peninggian elevasi dasar kolam olakan dari +61 m menjadi +65 m meningkatkan kecepatan aliran di seluruh bagian bangunan peredam energi. Semakin datar dasar kolam olakan dengan saluran *escape channel*, membuat kecepatan aliran di bagian kolam olakan dan saluran *escape channel* semakin tinggi.

Pada model bangunan peredam energi standar USBR II yang terwakili oleh seri E₃-L₁ akibat perlakuan debit Q_{100} , awal loncatan hidrolis terjadi di kolam olakan dikarenakan kurangnya efek penggenangan di kolam olakan. Saat diberikan perlakuan debit Q_{PMF} bangunan peredam energi gagal berfungsi dengan baik karena loncatan hidrolis tidak terbentuk dalam bangunan peredam energi. Seluruh profil kecepatan untuk panjang kolam olakan 31 m disajikan dalam Gambar 4.31.

Tabel 4.16 Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L_i)

X	Y	Z	Jarak	Kecepatan Rerata Elevasi +61m(E1)			Kecepatan Rerata Elevasi +63m(E2)			Kecepatan Rerata Elevasi +65m(E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	8.982	9.039	16.982	8.821	9.375	14.153	9.496	9.564	14.319
23.374	12.000	9.036	2.034	9.235	9.296	17.048	8.998	9.616	14.350	9.734	9.831	14.517
25.376	12.000	8.669	4.069	9.376	9.439	17.131	9.179	9.791	14.530	9.936	10.092	14.683
27.378	12.000	8.298	6.105	9.494	9.586	17.210	9.249	9.964	14.710	9.821	10.176	14.822
29.381	12.000	7.920	8.144	9.651	9.734	17.266	9.385	10.178	14.892	9.950	10.289	14.906
31.386	12.000	7.533	10.186	9.667	3.471	17.207	9.545	10.017	15.071	9.933	3.255	14.695
33.393	12.000	7.134	12.232	7.266	2.839	17.328	3.838	2.768	15.229	10.021	2.323	15.235
35.402	12.000	6.722	14.283	2.813	2.994	17.394	2.465	1.755	15.409	9.743	2.469	15.312
37.415	12.000	6.294	16.340	2.716	3.059	17.295	2.333	1.705	15.545	3.457	2.426	12.680
39.430	12.000	5.848	18.404	2.784	2.847	9.902	2.363	2.033	15.653	1.889	2.389	15.801
41.448	12.000	5.381	20.476	1.864	2.327	6.935	2.260	2.100	9.239	0.474	1.966	17.283
43.471	12.000	4.905	22.554	0.870	1.459	5.931	1.965	1.976	6.798	0.548	1.577	16.398
45.495	12.000	4.478	24.623	0.564	0.889	5.335	1.385	1.652	5.141	0.973	1.344	15.582
47.520	12.000	4.170	26.671	0.457	0.598	4.882	0.793	1.144	4.140	1.400	1.155	15.773
49.545	12.000	4.050	28.699	0.511	0.459	4.529	0.643	0.955	4.174	1.686	1.002	13.711
51.567	12.000	4.177	30.726	0.719	0.387	4.120	0.587	0.800	3.702	1.744	0.894	14.060
53.589	12.000	4.499	32.773	0.724	0.359	3.579	0.573	0.707	3.276	1.551	0.837	14.816
55.612	12.000	4.894	34.834	0.596	0.341	3.063	0.571	0.664	2.911	1.262	0.819	15.157
57.640	12.000	5.249	36.893	0.429	0.308	2.724	0.572	0.628	2.590	1.107	0.834	15.601
59.673	12.000	5.529	38.945	0.385	0.314	2.665	0.572	0.573	2.319	1.057	0.873	15.407
61.710	12.000	5.740	40.993	0.371	0.320	2.487	0.572	0.509	2.189	1.015	0.903	14.950
63.750	12.000	5.890	43.039	0.370	0.322	2.278	0.569	0.456	2.131	1.013	0.901	13.798
65.793	12.000	5.987	45.084	0.363	0.323	2.076	0.562	0.420	2.090	1.737	1.100	12.296
67.838	12.000	6.039	47.130	0.357	0.327	1.898	0.551	0.408	2.071	1.835	0.846	13.648
69.885	12.000	6.055	49.176	0.350	0.333	1.731	0.538	0.421	2.063	1.722	0.842	12.729
71.933	12.000	6.047	51.224	0.341	0.336	1.647	0.520	0.448	2.059	1.910	0.845	12.381
73.981	12.000	6.025	53.272	0.337	0.335	1.607	0.494	0.478	2.063	1.908	0.853	12.324
76.029	12.000	6.001	55.321	0.336	0.335	1.571	0.592	0.606	2.370	1.863	0.853	10.341
78.077	12.000	5.985	57.369	0.336	0.334	1.541	0.643	0.638	2.424	1.820	0.845	10.812
80.124	12.000	5.978	59.416	0.337	0.334	1.515	0.683	0.644	2.455	1.798	0.831	11.689
82.171	12.000	5.979	61.463	0.336	0.335	1.499	0.722	0.639	2.464	1.812	0.805	12.444
84.218	12.000	5.990	63.510	0.334	0.333	1.488	0.700	0.590	2.364	1.848	0.772	12.543
86.265	12.000	6.010	65.557	0.388	0.379	1.698	0.689	0.560	2.297	1.885	0.747	12.265
88.312	12.000	6.036	67.604	0.406	0.391	1.672	0.683	0.544	2.255	1.893	0.736	11.946
90.359	12.000	6.066	69.651	0.441	0.414	1.703	0.679	0.540	2.232			
92.406	12.000	6.097	71.699	0.495	0.451	1.779	0.677	0.550	2.221			
94.453	12.000	6.125	73.746	0.586	0.514	1.925	0.679	0.574	2.216			
96.501	12.000	6.146	75.793	0.697	0.586	2.088	0.682	0.620	2.216			
98.548	12.000	6.159	77.841	0.689	0.578	2.063	0.684	0.661	2.220			
100.595	12.000	6.162	79.888	0.687	0.574	2.044	0.685	0.692	2.228			
102.642	12.000	6.161	81.935	0.689	0.571	2.031						
104.689	12.000	6.156	83.982	0.693	0.569	2.026						
106.737	12.000	6.151	86.030	0.697	0.567	2.024						
108.784	12.000	6.147	88.077	0.700	0.564	2.024						
110.831	12.000	6.146	90.124	0.702	0.562	2.024						
112.879	12.000	6.146	92.172	0.699	0.562	2.024						
114.926	12.000	6.148	94.219	0.697	0.562	2.024						
116.973	12.000	6.150	96.266	0.694	0.560	2.025						

Keterangan :

= Saluran Peluncur

= Peredam Energi

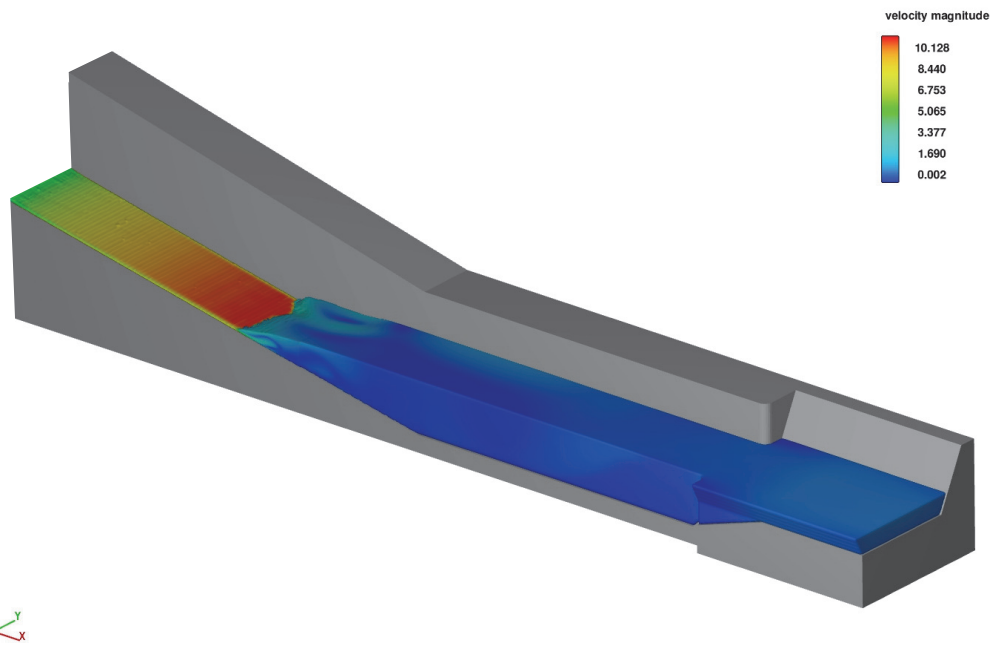
= Escape Channel



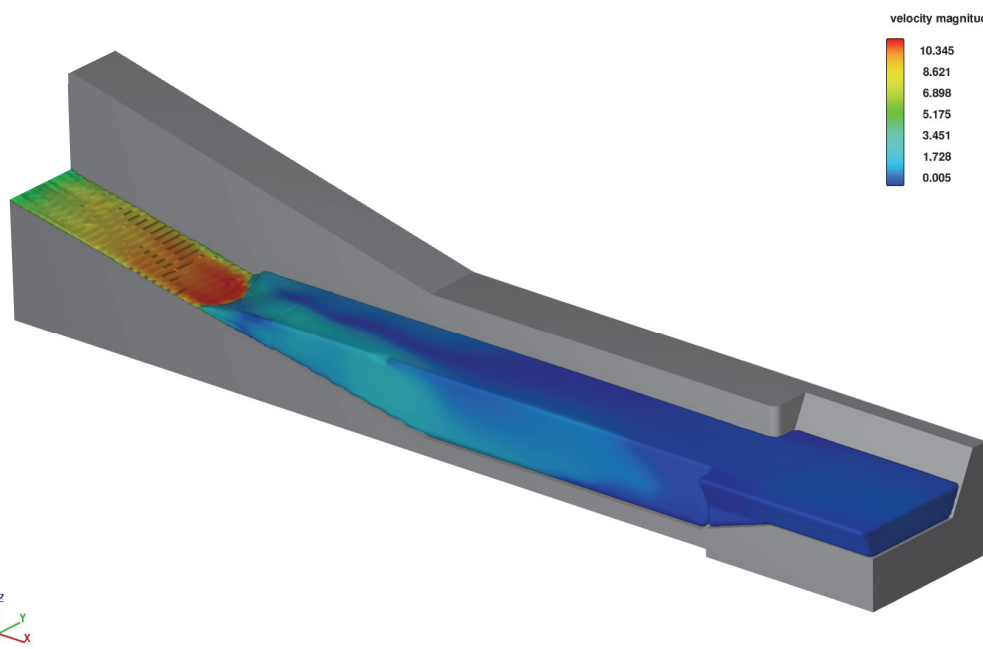
Gambar 4.3.1 Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 31m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

2. Analisa Kecepatan panjang kolam olakan 39 m (L_2)

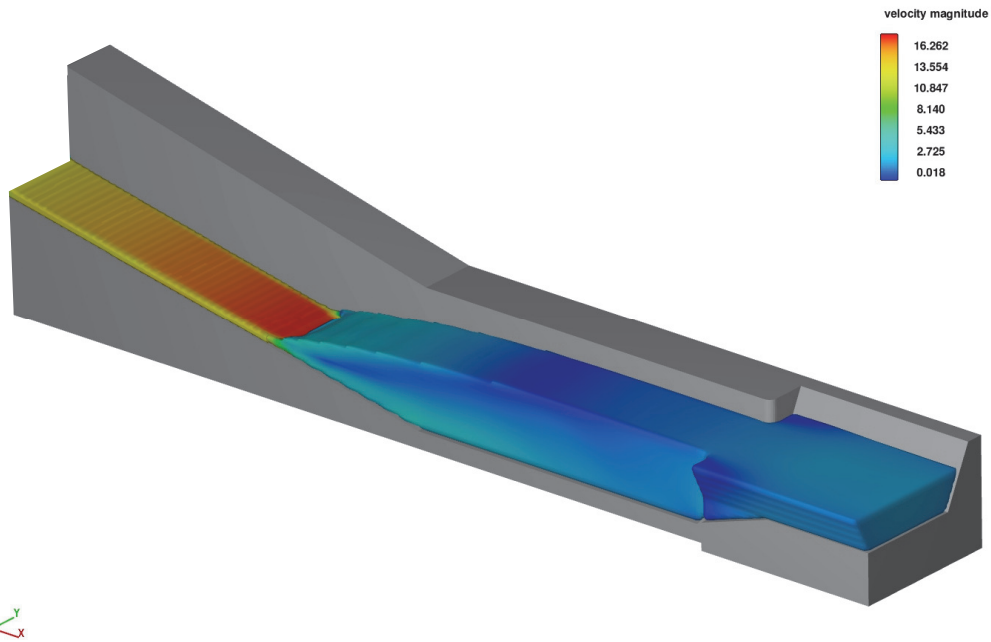
Berikut disajikan hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +61 m (E_1) untuk semua variasi debit.



Gambar 4.32 Profil kecepatan Q_{100} pada E_1 - L_2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

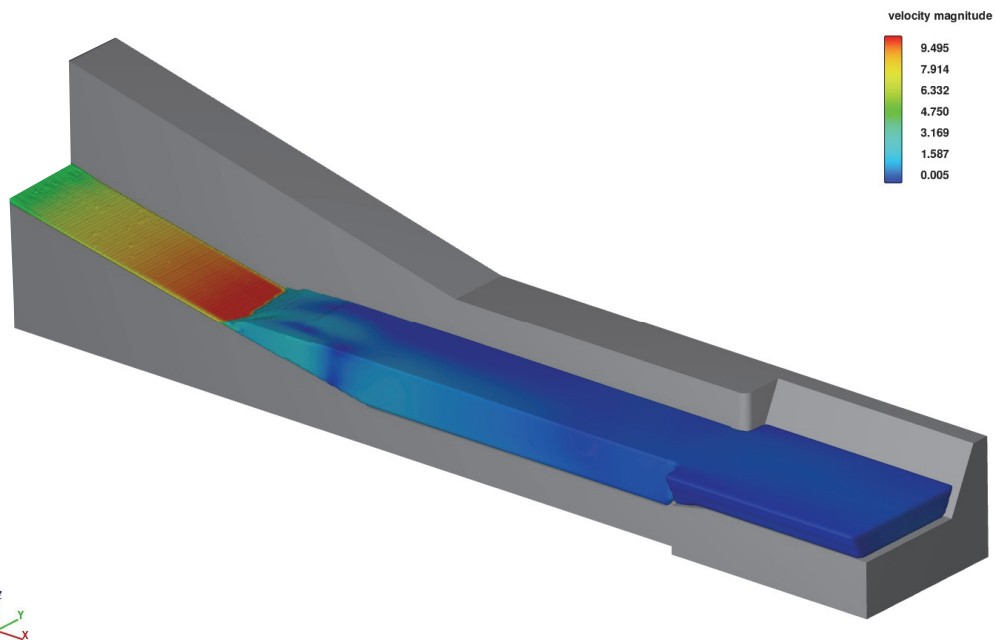


Gambar 4.33 Profil kecepatan Q_{1000} pada E_1 - L_2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

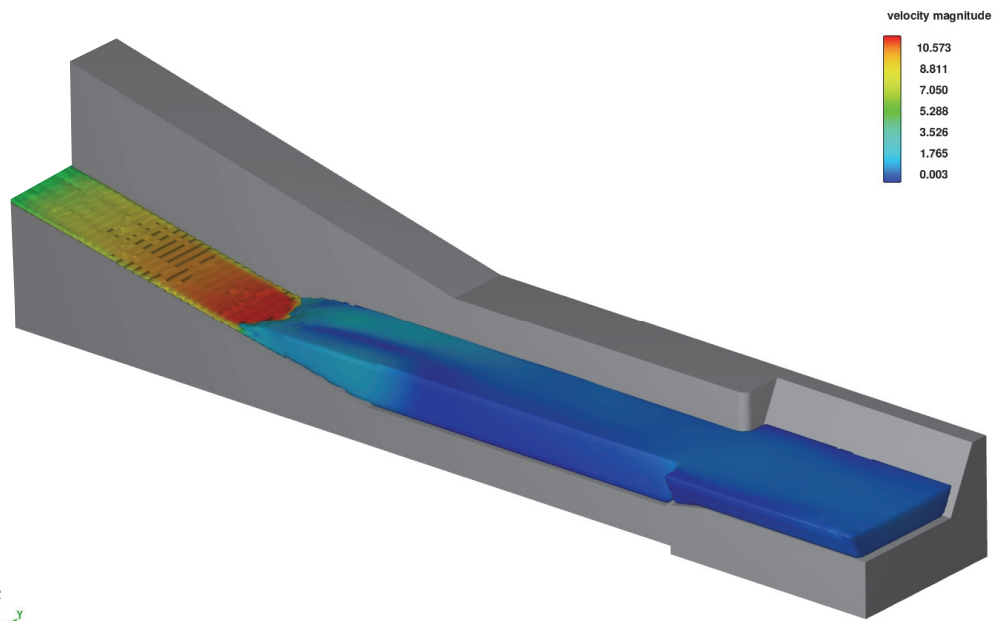


Gambar 4.34 Profil kecepatan Q_{PMF} pada E1-L2
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

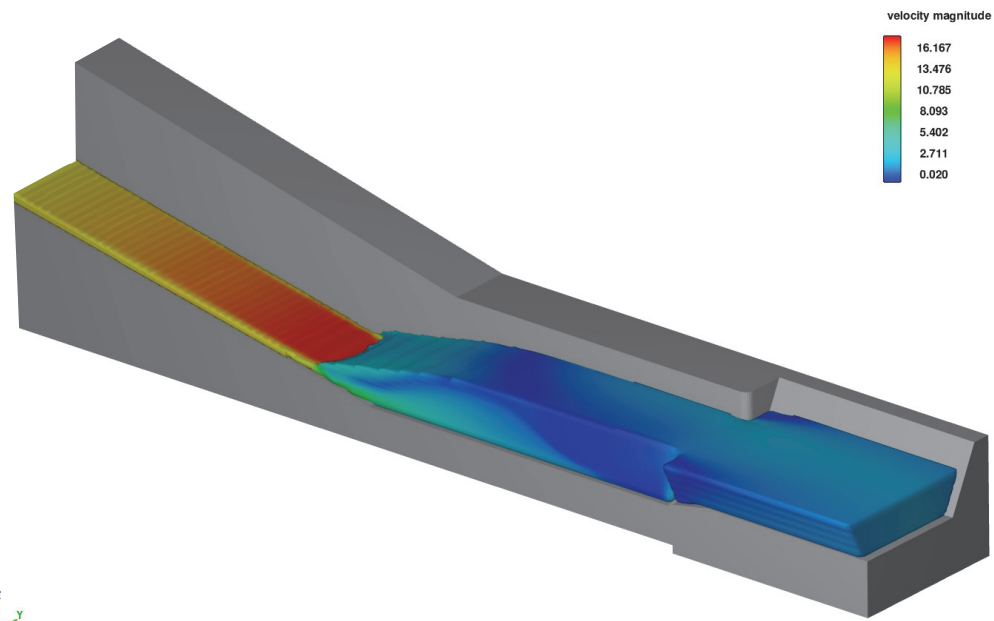
Hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +63 m (E2) untuk semua variasi debit disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 4.35 Profil kecepatan Q_{100} pada E2-L2
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

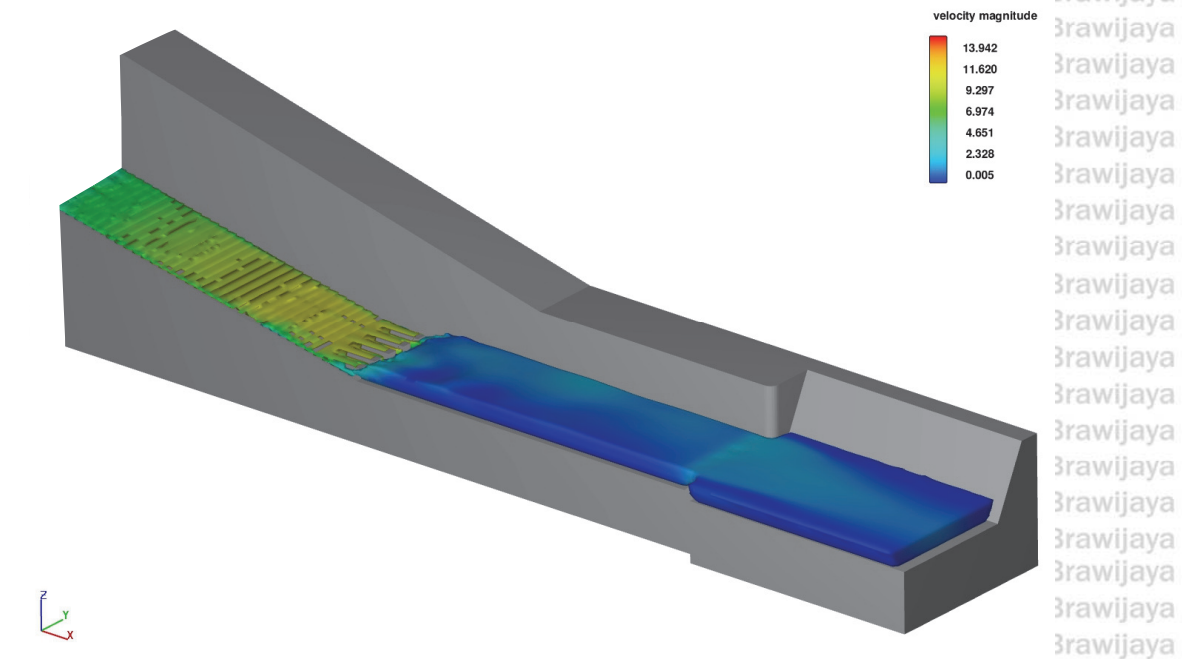


Gambar 4.36 Profil kecepatan Q1000 pada E2-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

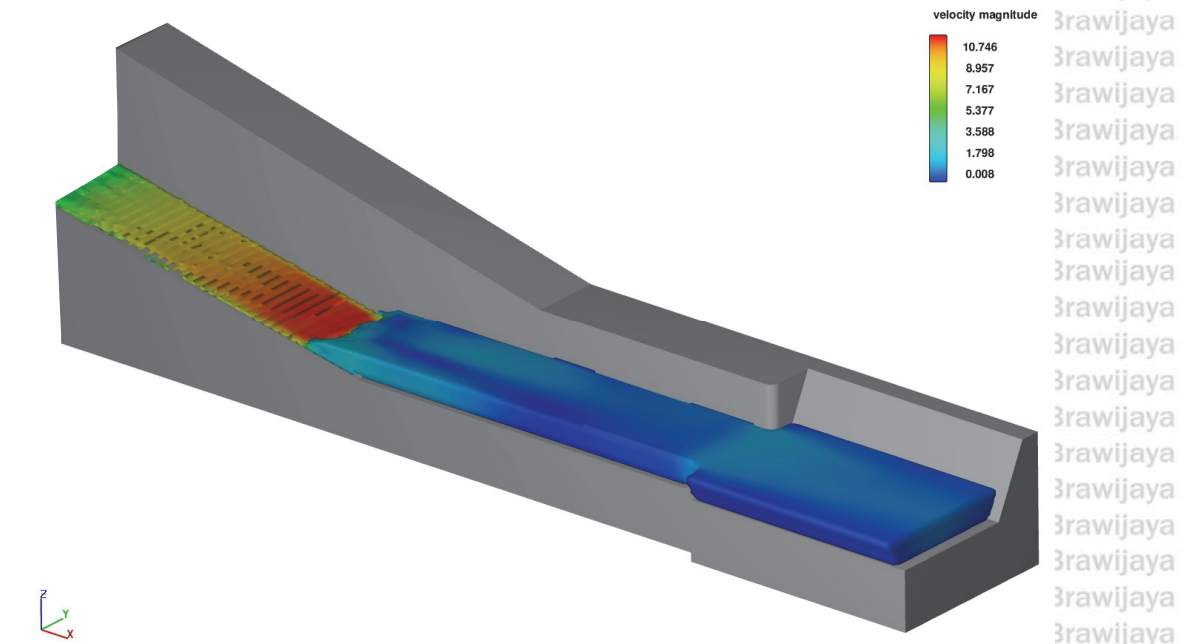


Gambar 4.37 Profil kecepatan QPMF pada E2-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

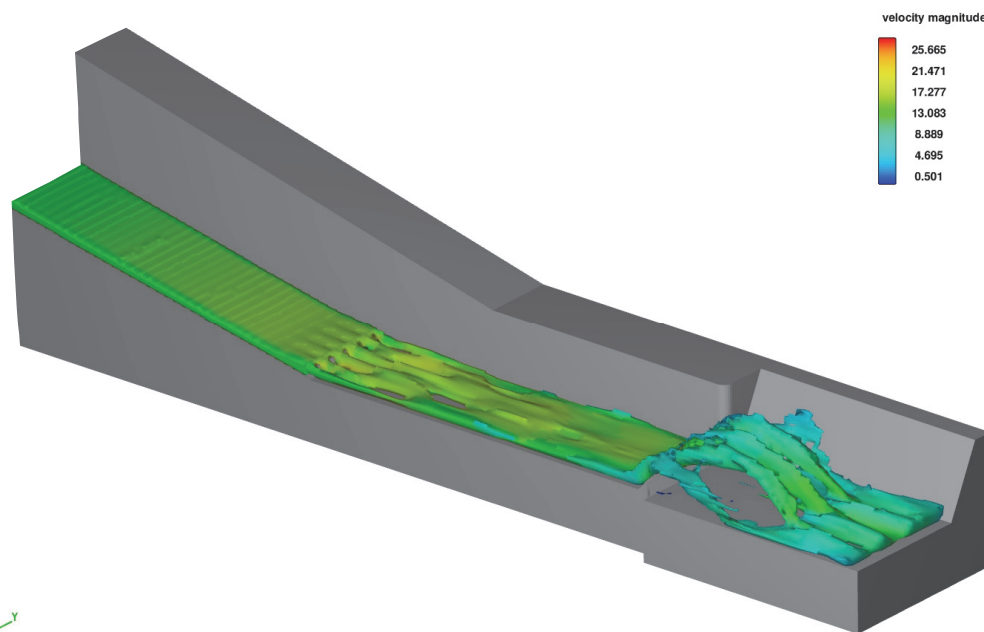
Hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +65 m (E_3) untuk semua variasi debit disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 4.38 Profil kecepatan Q_{100} pada E_3-L_2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.39 Profil kecepatan Q_{1000} pada E_3-L_2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.40 Profil kecepatan QPMF pada E₃-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Sama seperti model seri (L₁) bahwa hasil analisa kecepatan model numerik dengan panjang kolam olakan 39 m (L₂) untuk elevasi dasar kolam olakan +61 m (E₁), +63 m (E₂) dan +65 m (E₃) disajikan dalam Gambar 4.32 sampai dengan Gambar 4.40 dan Tabel 4.17. Dari tabel tersebut dapat dijelaskan bahwa akibat perlakuan peninggian elevasi dasar kolam olakan dari +61 m, +63 m dan terakhir +65 m meningkatkan kecepatan aliran di seluruh bagian bangunan peredam energi. Semakin datar dasar kolam olakan dengan saluran *escape channel*, membuat kecepatan aliran di bagian kolam olakan dan saluran *escape channel* semakin tinggi.

Pada model bangunan peredam energi standar USBR II yang terwakili oleh seri E₃-L₂ akibat perlakuan debit Q₁₀₀, awal loncatan hidrolis terjadi di kolam olakan dikarenakan kurangnya efek penggenangan di kolam olakan. Saat diberikan perlakuan debit Q_{PMF} bangunan peredam energi gagal berfungsi dengan baik karena loncatan hidrolis tidak terbentuk dalam bangunan peredam energi.

Seluruh profil kecepatan untuk panjang kolam olakan 39 m yang disajikan dalam grafik dapat dilihat di Gambar 4.41.

Tabel 4.17 Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L₂)

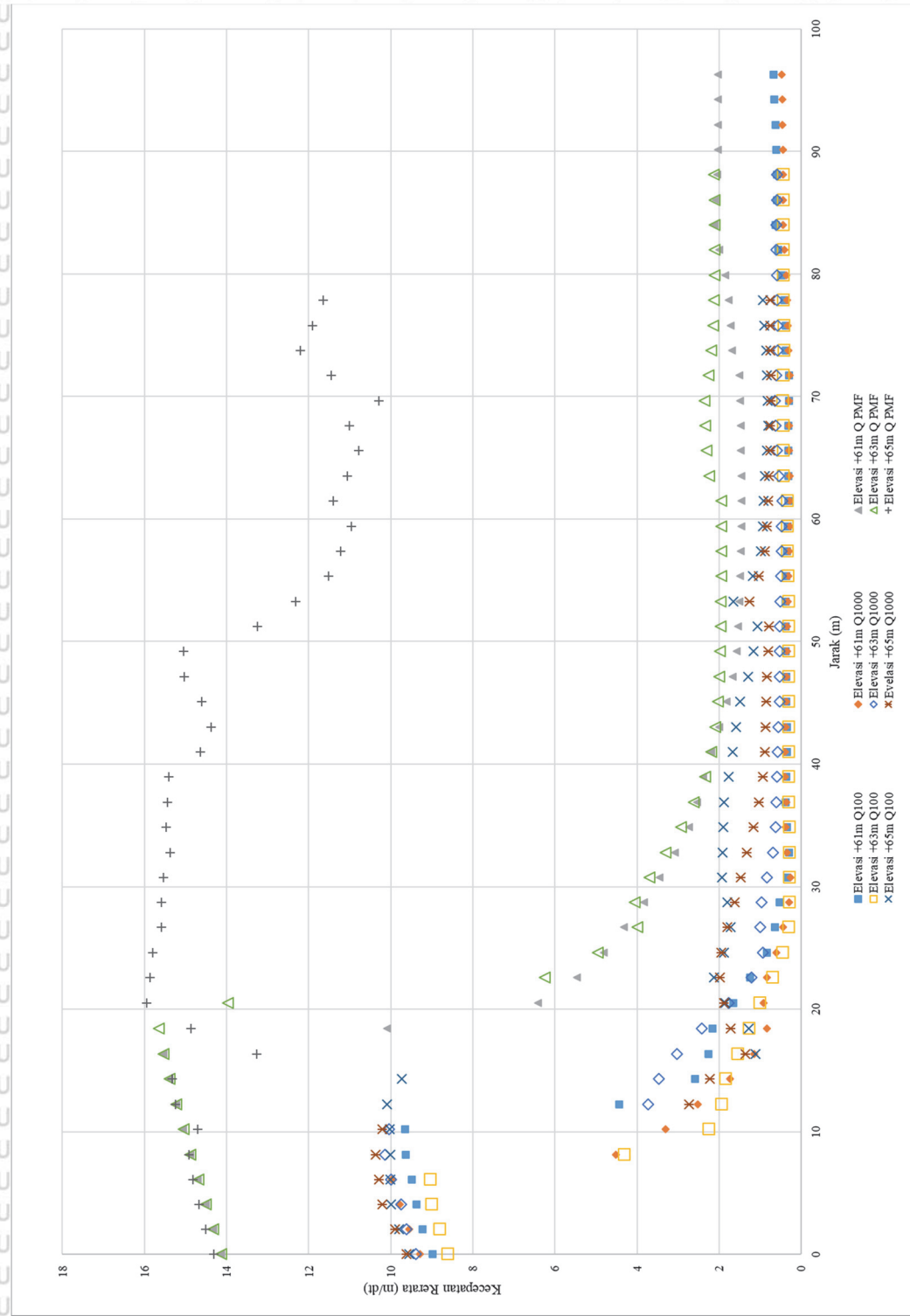
X	Y	Z	Jarak	Kecepatan Rerata Elevasi +61m (E1)			Kecepatan Rerata Elevasi +63m (E2)			Kecepatan Rerata Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	8.975	9.298	14.137	8.620	9.391	14.131	9.558	9.620	14.314
23.374	12.000	9.036	2.034	9.231	9.546	14.333	8.818	9.611	14.328	9.806	9.904	14.513
25.376	12.000	8.669	4.069	9.373	9.789	14.515	9.014	9.752	14.510	9.999	10.214	14.679
27.378	12.000	8.298	6.105	9.492	9.978	14.696	9.051	9.994	14.691	10.012	10.293	14.820
29.381	12.000	7.920	8.144	9.632	4.523	14.880	4.318	10.142	14.876	10.009	10.372	14.907
31.386	12.000	7.533	10.186	9.658	3.299	15.058	2.265	10.046	15.054	10.025	10.208	14.694
33.393	12.000	7.134	12.232	4.430	2.518	15.233	1.946	3.731	15.224	10.088	2.732	15.233
35.402	12.000	6.722	14.283	2.583	1.736	15.389	1.852	3.475	15.395	9.725	2.230	15.308
37.415	12.000	6.294	16.340	2.255	1.143	15.542	1.556	3.031	15.532	1.108	1.365	14.410
39.430	12.000	5.848	18.404	2.159	0.839	10.097	1.280	2.421	15.660	1.273	1.721	15.359
41.448	12.000	5.381	20.476	1.648	0.921	6.406	1.011	1.777	13.964	1.846	1.887	15.331
43.471	12.000	4.905	22.554	1.250	0.834	5.466	0.700	1.216	6.245	2.132	1.989	15.287
45.495	12.000	4.478	24.623	0.832	0.610	4.810	0.462	0.928	4.956	1.886	1.942	15.357
47.520	12.000	4.170	26.671	0.642	0.451	4.321	0.315	1.000	3.993	1.720	1.801	15.602
49.545	12.000	4.050	28.699	0.525	0.296	3.822	0.299	0.974	4.063	1.795	1.627	15.620
51.567	12.000	4.177	30.726	0.345	0.265	3.452	0.299	0.841	3.693	1.930	1.471	15.742
53.589	12.000	4.499	32.773	0.305	0.348	3.080	0.302	0.697	3.300	1.913	1.322	15.452
55.612	12.000	4.894	34.834	0.342	0.382	2.727	0.305	0.624	2.939	1.893	1.173	15.441
57.640	12.000	5.249	36.893	0.373	0.370	2.542	0.311	0.606	2.614	1.889	1.035	15.335
59.673	12.000	5.529	38.945	0.365	0.389	2.393	0.317	0.600	2.337	1.774	0.939	15.303
61.710	12.000	5.740	40.993	0.344	0.390	2.201	0.318	0.579	2.188	1.665	0.889	14.927
63.750	12.000	5.890	43.039	0.350	0.379	1.998	0.318	0.552	2.100	1.595	0.869	14.325
65.793	12.000	5.987	45.084	0.359	0.369	1.817	0.319	0.532	2.039	1.484	0.859	14.229
67.838	12.000	6.039	47.130	0.366	0.358	1.668	0.319	0.522	2.001	1.300	0.835	14.063
69.885	12.000	6.055	49.176	0.374	0.340	1.577	0.317	0.523	1.982	1.160	0.804	10.476
71.933	12.000	6.047	51.224	0.380	0.342	1.533	0.313	0.523	1.970	1.061	0.793	8.421
73.981	12.000	6.025	53.272	0.376	0.333	1.506	0.323	0.511	1.959	1.663	1.262	8.328
76.029	12.000	6.001	55.321	0.362	0.316	1.486	0.339	0.492	1.952	1.176	1.031	5.825
78.077	12.000	5.985	57.369	0.344	0.298	1.473	0.346	0.477	1.948	0.989	0.889	4.726
80.124	12.000	5.978	59.416	0.325	0.284	1.467	0.348	0.473	1.949	0.937	0.838	3.923
82.171	12.000	5.979	61.463	0.312	0.279	1.464	0.353	0.468	1.957	0.925	0.807	3.361
84.218	12.000	5.990	63.510	0.308	0.285	1.465	0.437	0.544	2.241	0.880	0.782	2.871
86.265	12.000	6.010	65.557	0.308	0.290	1.470	0.443	0.590	2.312	0.832	0.761	2.503
88.312	12.000	6.036	67.604	0.308	0.295	1.478	0.452	0.620	2.346	0.810	0.750	2.508
90.359	12.000	6.066	69.651	0.306	0.294	1.495	0.462	0.637	2.354	0.817	0.746	2.282
92.406	12.000	6.097	71.699	0.304	0.288	1.509	0.443	0.601	2.257	0.830	0.748	2.214
94.453	12.000	6.125	73.746	0.373	0.316	1.689	0.436	0.580	2.191	0.857	0.756	2.281
96.501	12.000	6.146	75.793	0.388	0.330	1.725	0.437	0.575	2.143	0.900	0.761	2.362
98.548	12.000	6.159	77.841	0.418	0.350	1.772	0.438	0.588	2.123	0.942	0.757	2.462
100.595	12.000	6.162	79.888	0.472	0.366	1.851	0.440	0.600	2.114			
102.642	12.000	6.161	81.935	0.554	0.408	1.993	0.443	0.606	2.111			
104.689	12.000	6.156	83.982	0.620	0.452	2.119	0.448	0.606	2.112			
106.737	12.000	6.151	86.030	0.594	0.447	2.078	0.452	0.599	2.117			
108.784	12.000	6.147	88.077	0.591	0.444	2.050	0.454	0.591	2.124			
110.831	12.000	6.146	90.124	0.604	0.447	2.035						
112.879	12.000	6.146	92.172	0.632	0.455	2.028						
114.926	12.000	6.148	94.219	0.660	0.466	2.026						
116.973	12.000	6.150	96.266	0.680	0.471	2.025						

Keterangan :

= Saluran Peluncur

= Peredam Energi

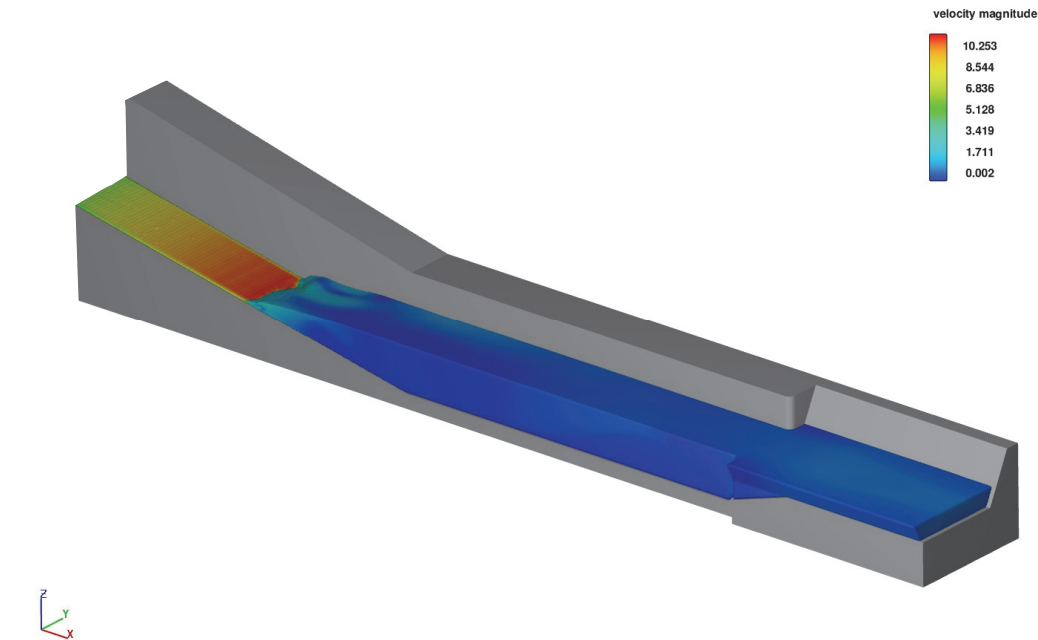
= Escape Channel



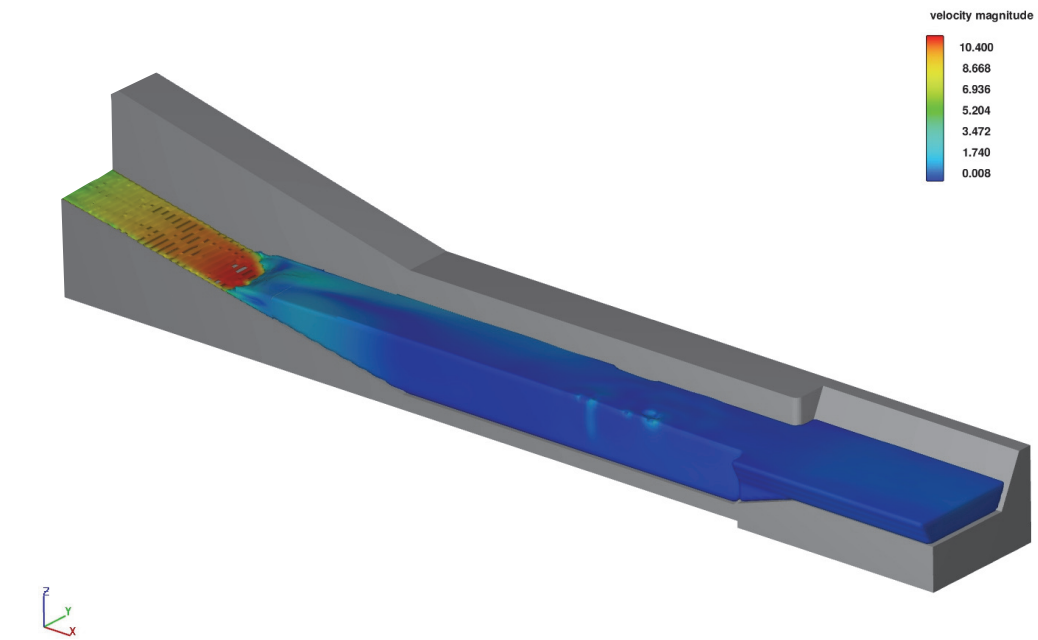
Gambar 4.41 Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 39m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017.

3. Analisa Kecepatan panjang kolam olakan 53 m (L_3)

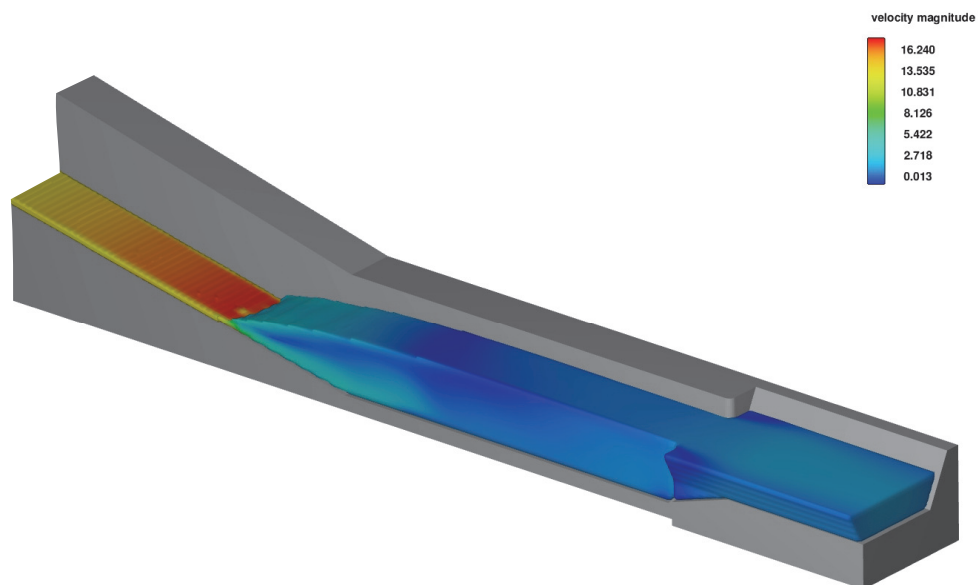
Berikut disajikan hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +61 m (E_1) untuk semua variasi debit.



Gambar 4.42 Profil kecepatan Q_{100} pada E_1-L_3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



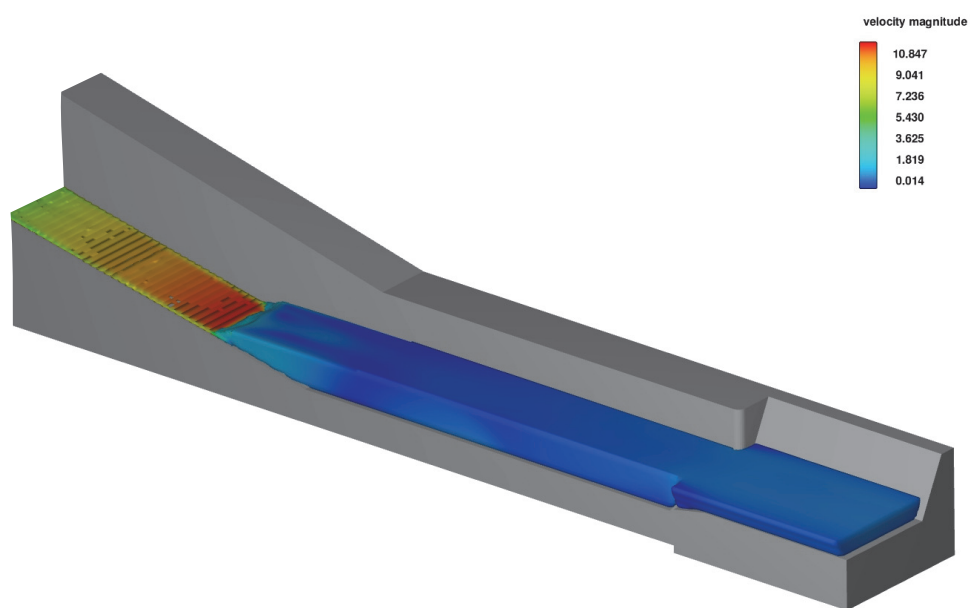
Gambar 4.43 Profil kecepatan Q_{1000} pada E_1-L_3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.44 Profil kecepatan QPMF pada E₁-L₃

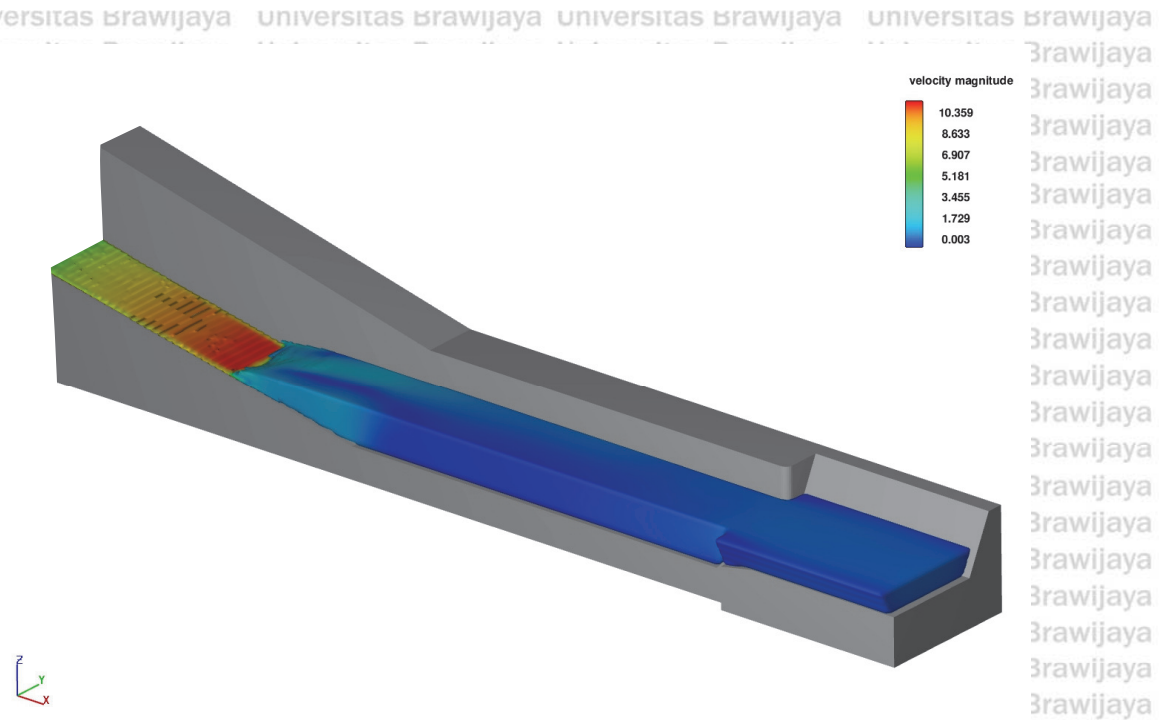
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +63 m (E₂) untuk semua variasi debit disajikan dalam gambar berikut:

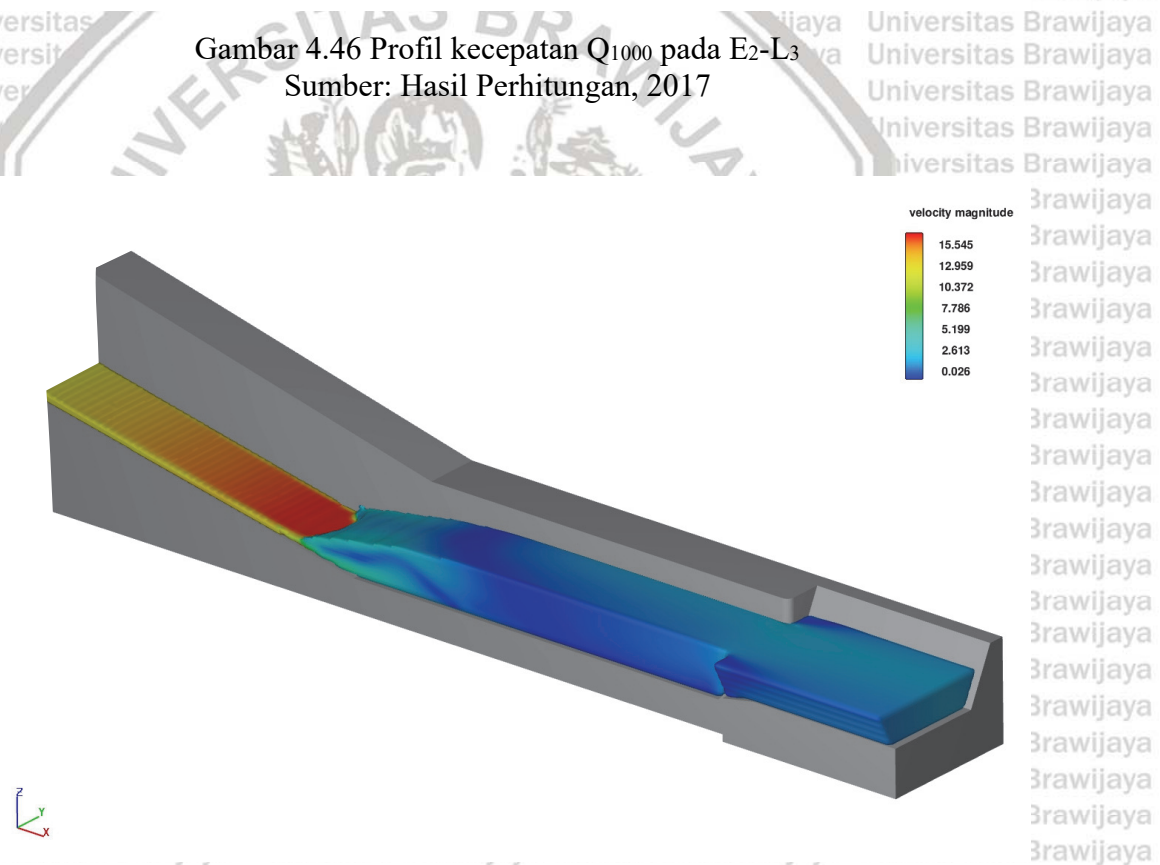


Gambar 4.45 Profil kecepatan Q₁₀₀ pada E₂-L₃

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

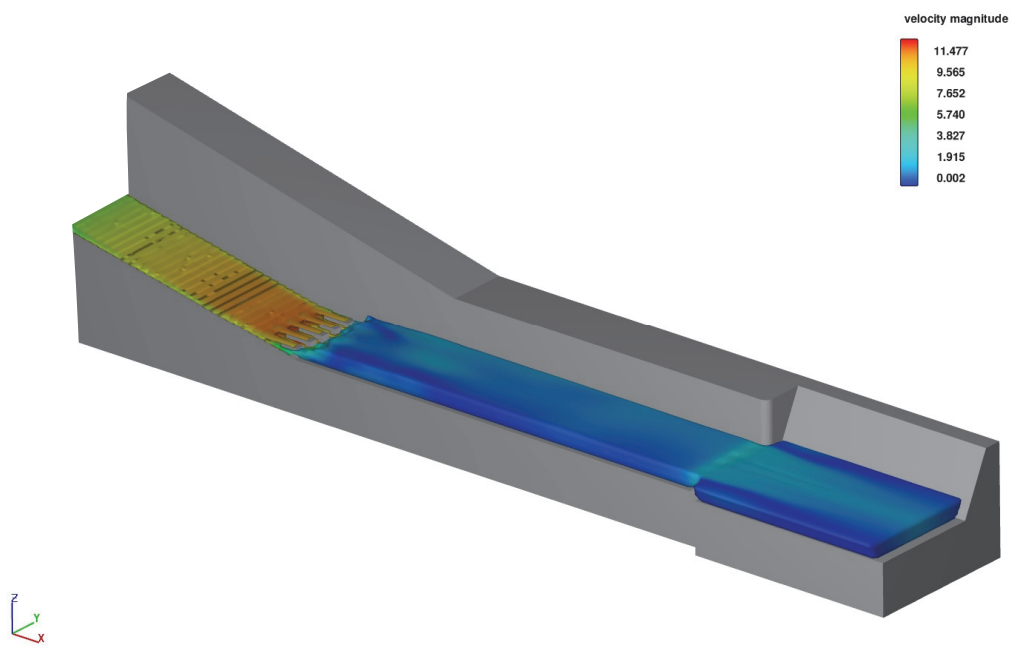


Gambar 4.46 Profil kecepatan Q_{1000} pada E2-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

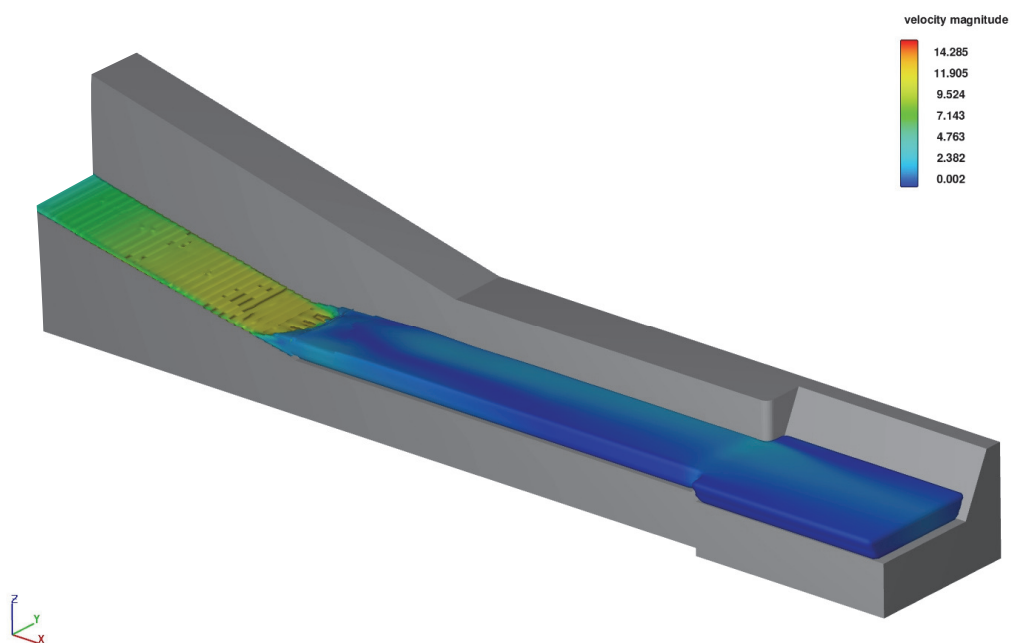


Gambar 4.47 Profil kecepatan Q_{PMF} pada E2-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

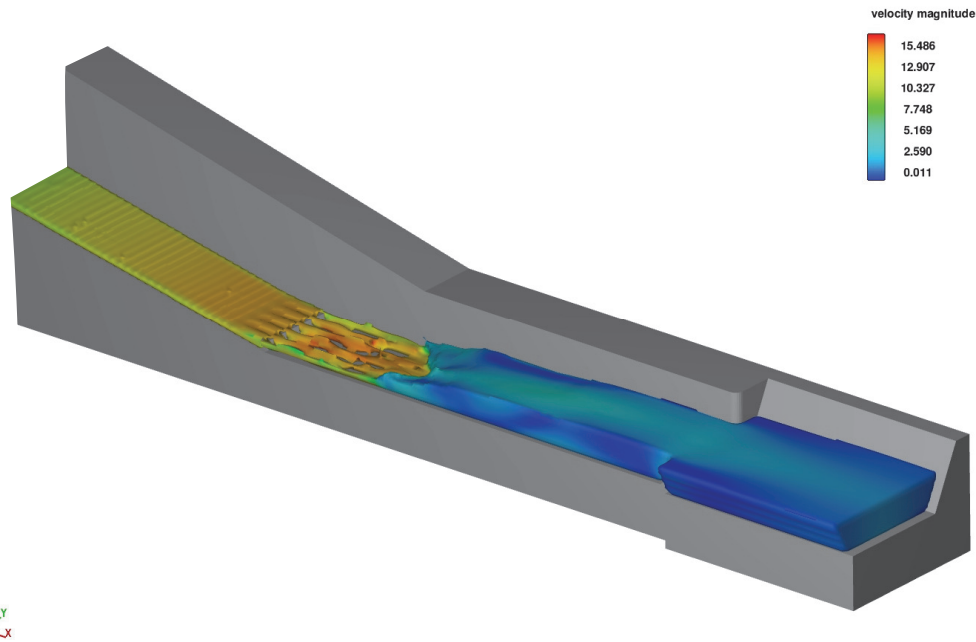
Hasil nilai kecepatan untuk elevasi dasar kolam olakan +65 m (E_3) untuk semua variasi debit disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 4.48 Profil kecepatan Q_{100} pada E_3 - L_3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.49 Profil kecepatan Q_{1000} pada E_3 - L_3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.50 Profil kecepatan Q_{PMF} pada E₃-L₃
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Hasil analisa kecepatan model numerik dengan panjang kolam olakan 53 m (L₃) untuk elevasi dasar kolam olakan +61 m (E₁), +63 m (E₂) dan +65 m (E₃) disajikan dalam Gambar 4.42 sampai dengan Gambar 4.50 dan Tabel 4.18. Dari tabel tersebut dapat dijelaskan bahwa akibat perlakuan peninggian elevasi dasar kolam olakan dari +61 m, +63 m dan terakhir +65 m meningkatkan kecepatan aliran di seluruh bagian bangunan peredam energi.

Pada model bangunan peredam energi standar USBR II yang terwakili oleh seri E₃-L₃ berfungsi dengan baik untuk semua perlakuan debit. Seluruh profil kecepatan untuk panjang kolam olakan 53 m yang disajikan dalam grafik di Gambar 4.51.

Tabel 4.18 Rekapitulasi hasil nilai kecepatan untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolom olakan 53 m (L₃)

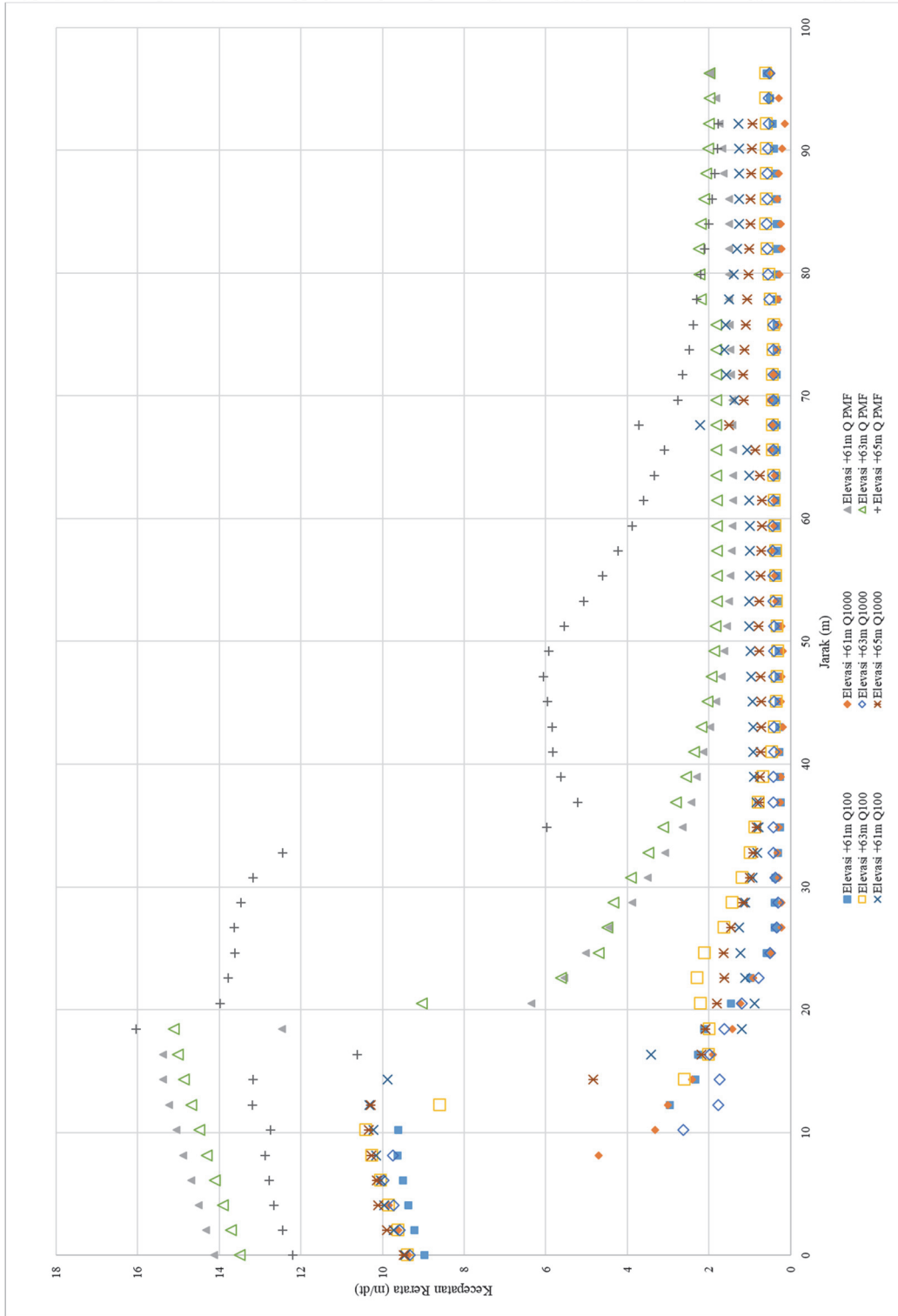
X	Y	Z	Jarak	Kecepatan Rerata Elevasi +61m(E1)			Kecepatan Rerata Elevasi +63m(E2)			Kecepatan Rerata Elevasi +65m(E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
				m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det	m/det
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	8.967	9.370	14.133	9.400	9.326	13.494	9.453	9.477	12.204
23.374	12.000	9.036	2.034	9.225	9.609	14.330	9.631	9.575	13.707	9.722	9.886	12.450
25.376	12.000	8.669	4.069	9.371	9.850	14.512	9.864	9.724	13.911	9.966	10.106	12.660
27.378	12.000	8.298	6.105	9.495	10.088	14.692	10.051	9.970	14.110	10.038	10.146	12.775
29.381	12.000	7.920	8.144	9.633	4.705	14.877	10.266	9.746	14.300	10.165	10.272	12.876
31.386	12.000	7.533	10.186	9.622	3.320	15.056	10.427	2.630	14.493	10.225	10.336	12.738
33.393	12.000	7.134	12.232	2.955	3.012	15.228	8.610	1.776	14.681	10.322	10.296	13.183
35.402	12.000	6.722	14.283	2.333	2.409	15.373	2.616	1.735	14.863	9.883	4.834	13.171
37.415	12.000	6.294	16.340	2.273	1.902	15.384	2.019	1.996	15.012	3.413	2.193	10.615
39.430	12.000	5.848	18.404	2.114	1.433	12.469	1.997	1.631	15.119	1.190	2.088	16.040
41.448	12.000	5.381	20.476	1.454	1.223	6.352	2.213	1.201	9.036	0.891	1.810	13.976
43.471	12.000	4.905	22.554	0.985	0.911	5.545	2.296	0.779	5.623	1.122	1.631	13.778
45.495	12.000	4.478	24.623	0.583	0.472	5.017	2.128	0.505	4.703	1.227	1.634	13.612
47.520	12.000	4.170	26.671	0.390	0.218	4.435	1.634	0.343	4.497	1.256	1.465	13.627
49.545	12.000	4.050	28.699	0.394	0.230	3.890	1.443	0.311	4.348	1.118	1.168	13.468
51.567	12.000	4.177	30.726	0.367	0.292	3.511	1.190	0.378	3.921	0.930	1.004	13.177
53.589	12.000	4.499	32.773	0.302	0.321	3.072	0.993	0.423	3.492	0.822	0.911	12.446
55.612	12.000	4.894	34.834	0.265	0.292	2.647	0.876	0.424	3.119	0.793	0.829	5.976
57.640	12.000	5.249	36.893	0.236	0.257	2.433	0.801	0.421	2.804	0.838	0.767	5.218
59.673	12.000	5.529	38.945	0.251	0.240	2.300	0.686	0.417	2.558	0.895	0.749	5.633
61.710	12.000	5.740	40.993	0.267	0.296	2.144	0.467	0.413	2.362	0.917	0.728	5.830
63.750	12.000	5.890	43.039	0.279	0.187	1.976	0.404	0.408	2.190	0.921	0.717	5.841
65.793	12.000	5.987	45.084	0.287	0.246	1.818	0.366	0.399	2.041	0.938	0.718	5.953
67.838	12.000	6.039	47.130	0.292	0.221	1.690	0.338	0.401	1.935	0.964	0.742	6.057
69.885	12.000	6.055	49.176	0.289	0.192	1.628	0.333	0.412	1.868	0.990	0.772	5.921
71.933	12.000	6.047	51.224	0.293	0.217	1.564	0.340	0.413	1.832	1.012	0.793	5.552
73.981	12.000	6.025	53.272	0.309	0.351	1.515	0.358	0.420	1.811	1.014	0.777	5.066
76.029	12.000	6.001	55.321	0.323	0.385	1.476	0.370	0.430	1.801	1.007	0.743	4.603
78.077	12.000	5.985	57.369	0.330	0.481	1.447	0.376	0.435	1.799	1.002	0.713	4.221
80.124	12.000	5.978	59.416	0.333	0.411	1.428	0.386	0.435	1.806	1.003	0.698	3.890
82.171	12.000	5.979	61.463	0.336	0.391	1.416	0.404	0.431	1.814	1.008	0.710	3.605
84.218	12.000	5.990	63.510	0.340	0.394	1.412	0.426	0.428	1.821	1.020	0.749	3.341
86.265	12.000	6.010	65.557	0.345	0.495	1.416	0.449	0.424	1.826	1.068	0.874	3.089
88.312	12.000	6.036	67.604	0.349	0.453	1.424	0.461	0.421	1.829	2.220	1.505	3.711
90.359	12.000	6.066	69.651	0.349	0.500	1.436	0.460	0.420	1.829	1.378	1.143	2.767
92.406	12.000	6.097	71.699	0.347	0.416	1.458	0.449	0.422	1.825	1.575	1.168	2.650
94.453	12.000	6.125	73.746	0.344	0.323	1.478	0.437	0.424	1.825	1.633	1.132	2.475
96.501	12.000	6.146	75.793	0.341	0.292	1.495	0.420	0.425	1.826	1.598	1.096	2.390
98.548	12.000	6.159	77.841	0.340	0.300	1.504	0.508	0.518	2.201	1.507	1.064	2.299
100.595	12.000	6.162	79.888	0.339	0.277	1.506	0.543	0.549	2.231	1.392	1.035	2.201
102.642	12.000	6.161	81.935	0.337	0.224	1.509	0.589	0.579	2.248	1.306	1.010	2.100
104.689	12.000	6.156	83.982	0.335	0.235	1.514	0.615	0.588	2.208	1.266	0.991	2.007
106.737	12.000	6.151	86.030	0.333	0.332	1.510	0.611	0.575	2.119	1.256	0.976	1.924
108.784	12.000	6.147	88.077	0.395	0.289	1.648	0.612	0.566	2.062	1.259	0.963	1.853
110.831	12.000	6.146	90.124	0.411	0.215	1.677	0.609	0.557	2.029	1.267	0.950	1.798
112.879	12.000	6.146	92.172	0.445	0.136	1.738	0.608	0.545	2.008	1.276	0.941	1.766
114.926	12.000	6.148	94.219	0.503	0.285	1.826	0.614	0.533	1.994			
116.973	12.000	6.150	96.266	0.594	0.471	1.972	0.619	0.528	1.984			

Keterangan :

 = Saluran Peluncur = Peredam Energi = Escape Channel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017





Gambar 4.51 Profil Kecepatan Pada Panjang Kolam Olakan 53m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.4.2 Analisa Kedalaman Aliran

Penyajian hasil analisa kedalam aliran menurut debit Q_{100} , Q_{1000} dan Q_{PMF} berikut di kelompokkan berdasarkan panjang kolam olakan.

1. Analisa kedalaman aliran panjang kolam olakan 31 m (L_1).

Tabel 4.19 Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L_1)

X	Y	Z	Jarak	Kedalaman Aliran Elevasi +61m (E1)			Kedalaman Aliran Elevasi +63m (E2)			Kedalaman Aliran Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q_{100} (21.16 m ³ /det)	Debit Q_{1000} (23.03 m ³ /det)	Debit Q_{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q_{100} (21.16 m ³ /det)	Debit Q_{1000} (23.03 m ³ /det)	Debit Q_{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q_{100} (21.16 m ³ /det)	Debit Q_{1000} (23.03 m ³ /det)	Debit Q_{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	0.244	0.262	0.729	0.224	0.262	0.919	0.235	0.237	0.883
23.374	12.000	9.036	2.034	0.242	0.263	0.725	0.221	0.244	0.907	0.244	0.246	0.872
25.376	12.000	8.669	4.069	0.247	0.247	0.720	0.225	0.283	0.892	0.255	0.257	0.857
27.378	12.000	8.298	6.105	0.243	0.243	0.723	0.217	0.238	0.879	0.267	0.269	0.868
29.381	12.000	7.920	8.144	0.240	0.239	0.726	0.225	0.236	0.869	0.201	0.279	0.877
31.386	12.000	7.533	10.186	0.215	0.975	0.734	0.213	0.234	0.859	0.195	1.083	0.889
33.393	12.000	7.134	12.232	0.413	1.699	0.774	0.764	1.439	0.852	0.191	1.563	0.732
35.402	12.000	6.722	14.283	1.365	2.463	0.779	1.591	2.053	0.853	0.136	1.712	0.576
37.415	12.000	6.294	16.340	2.282	2.942	0.784	2.209	2.609	0.837	1.000	2.804	1.004
39.430	12.000	5.848	18.404	2.754	3.307	1.590	2.739	3.145	0.827	1.798	2.804	0.505
41.448	12.000	5.381	20.476	3.225	3.807	2.689	3.188	3.625	1.978	1.507	2.887	0.502
43.471	12.000	4.905	22.554	3.613	4.287	3.394	3.250	3.714	2.282	1.570	2.955	0.501
45.495	12.000	4.478	24.623	3.986	4.717	4.091	3.284	3.751	2.795	1.656	2.965	1.000
47.520	12.000	4.170	26.671	4.376	5.124	4.727	4.297	4.753	4.247	1.724	2.958	1.107
49.545	12.000	4.050	28.699	4.797	5.530	5.345	4.304	4.733	4.657	1.775	2.937	0.673
51.567	12.000	4.177	30.726	5.199	5.890	5.902	4.311	4.711	5.059	1.826	2.928	0.555
53.589	12.000	4.499	32.773	5.237	5.893	6.088	4.315	4.705	5.335	1.864	2.937	0.861
55.612	12.000	4.894	34.834	5.258	5.897	6.257	4.318	4.716	5.574	1.854	2.953	0.731
57.640	12.000	5.249	36.893	6.263	6.900	7.448	4.320	4.729	5.754	1.828	2.969	1.000
59.673	12.000	5.529	38.945	6.260	6.903	7.626	4.322	4.736	5.882	1.833	2.978	0.679
61.710	12.000	5.740	40.993	6.260	6.905	7.795	4.324	4.731	5.971	1.837	2.976	1.062
63.750	12.000	5.890	43.039	6.261	6.907	7.937	4.325	4.719	6.022	1.838	2.976	1.500
65.793	12.000	5.987	45.084	6.263	6.909	8.058	4.326	4.710	6.060	1.677	2.841	1.887
67.838	12.000	6.039	47.130	6.262	6.910	8.151	4.326	4.709	6.083	1.501	2.935	1.743
69.885	12.000	6.055	49.176	6.261	6.910	8.229	4.325	4.716	6.102	1.636	2.934	2.643
71.933	12.000	6.047	51.224	6.260	6.909	8.275	4.325	4.726	6.120	1.610	2.940	1.041
73.981	12.000	6.025	53.272	6.262	6.908	8.305	4.323	4.735	6.145	1.611	2.947	0.653
76.029	12.000	6.001	55.321	6.264	6.908	8.323	3.640	4.053	5.477	1.603	2.955	0.926
78.077	12.000	5.985	57.369	6.266	6.908	8.334	2.958	3.364	4.791	1.619	2.963	1.068
80.124	12.000	5.978	59.416	6.266	6.908	8.340	2.578	2.969	4.397	1.619	2.967	2.388
82.171	12.000	5.979	61.463	6.265	6.909	8.343	2.308	2.682	4.114	1.623	2.963	1.574
84.218	12.000	5.990	63.510	6.262	6.910	8.340	2.310	2.667	4.105	1.595	2.959	1.317
86.265	12.000	6.010	65.557	5.520	6.171	7.591	2.312	2.658	4.110	1.582	2.960	1.220
88.312	12.000	6.036	67.604	4.764	5.416	6.821	2.313	2.655	4.119	1.577	2.971	1.228
90.359	12.000	6.066	69.651	4.029	4.681	6.066	2.313	2.658	4.124			
92.406	12.000	6.097	71.699	3.384	4.035	5.400	2.311	2.667	4.127			
94.453	12.000	6.125	73.746	2.756	3.408	4.733	2.309	2.682	4.129			
96.501	12.000	6.146	75.793	2.247	2.899	4.209	2.308	2.705	4.130			
98.548	12.000	6.159	77.841	2.248	2.897	4.179	2.308	2.724	4.131			
100.595	12.000	6.162	79.888	2.256	2.896	4.173	2.309	2.740	4.131			
102.642	12.000	6.161	81.935	2.256	2.896	4.177						
104.689	12.000	6.156	83.982	2.258	2.896	4.178						
106.737	12.000	6.151	86.030	2.258	2.896	4.179						
108.784	12.000	6.147	88.077	2.256	2.896	4.180						
110.831	12.000	6.146	90.124	2.254	2.897	4.180						
112.879	12.000	6.146	92.172	2.256	2.897	4.181						
114.926	12.000	6.148	94.219	2.256	2.897	4.183						
116.973	12.000	6.150	96.266	2.252	2.898	4.183						

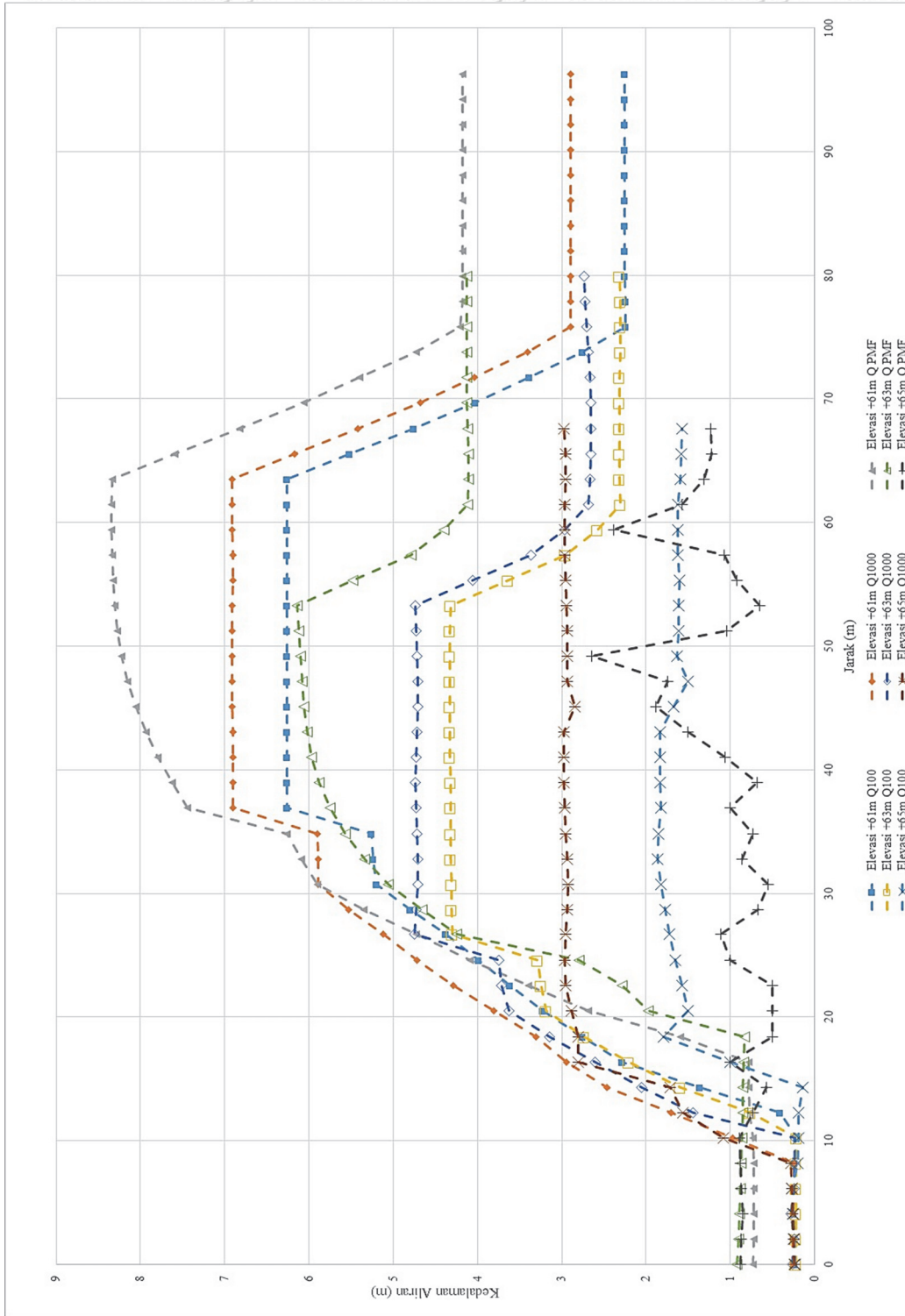
Keterangan :

= Saluran Peluncur

= Peredam Energi

= Escape Channel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.52 Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolum Olakan 31m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Perubahan akibat elevasi dari kolam dasar olakan membuat kedalaman aliran di hilir menurun. Sedangkan perubahan panjang kolam olakan mempengaruhi panjang kedalaman aliran di kolam olakan itu sendiri. Pada model standar USBR II (seri E₃-L₁) kedalaman aliran meningkat sesaat setelah loncatan hidrolik terjadi kemudian cenderung stabil disepanjang kolam olakan kecuali jika peredam energi gagal berfungsi akibat perlakuan debit Q_{PMF} .

2. Analisa kedalaman aliran panjang kolam olakan 39m (L₂).

Berikut disajikan hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m.

Tabel 4.20 Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L₂)

X	Y	Z	Jarak	Kedalaman Aliran Elevasi +61m (E1)			Kedalaman Aliran Elevasi +63m (E2)			Kedalaman Aliran Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21,373	12,000	9,400	0,000	0,244	0,273	0,917	0,225	0,253	0,918	0,233	0,248	0,882
23,374	12,000	9,036	2,034	0,239	0,253	0,904	0,209	0,245	0,904	0,243	0,254	0,869
25,376	12,000	8,669	4,069	0,244	0,241	0,890	0,216	0,362	0,891	0,255	0,266	0,855
27,378	12,000	8,298	6,105	0,240	0,213	0,877	0,201	0,230	0,878	0,267	0,281	0,867
29,381	12,000	7,920	8,144	0,236	1,134	0,867	0,581	0,234	0,868	0,201	0,285	0,877
31,386	12,000	7,533	10,186	0,219	2,091	0,858	1,453	0,239	0,858	0,189	0,295	0,888
33,393	12,000	7,134	12,232	0,591	2,744	0,856	1,982	1,429	0,856	0,177	1,117	0,728
35,402	12,000	6,722	14,283	1,529	3,187	0,861	2,557	2,401	0,857	0,128	1,349	0,575
37,415	12,000	6,294	16,340	2,153	3,550	0,842	3,075	2,928	0,833	1,088	2,537	0,797
39,430	12,000	5,848	18,404	2,617	3,882	1,959	3,495	3,286	0,828	1,965	2,620	0,589
41,448	12,000	5,381	20,476	3,113	4,324	2,819	3,919	3,673	1,454	1,904	2,635	0,663
43,471	12,000	4,905	22,554	3,567	4,802	3,634	3,949	3,719	2,415	1,850	2,606	1,362
45,495	12,000	4,478	24,623	4,023	5,227	4,366	3,956	3,702	2,847	1,925	2,613	1,409
47,520	12,000	4,170	26,671	4,451	5,606	5,017	4,961	4,725	4,312	1,967	2,655	1,182
49,545	12,000	4,050	28,699	4,852	6,079	5,799	4,966	4,783	4,720	2,012	2,703	1,039
51,567	12,000	4,177	30,726	5,186	6,399	6,322	4,971	4,816	5,107	2,069	2,731	1,003
53,589	12,000	4,499	32,773	5,166	6,414	6,501	4,971	4,831	5,394	2,087	2,737	1,064
55,612	12,000	4,894	34,834	5,168	6,437	6,662	4,969	4,845	5,644	2,076	2,728	1,136
57,640	12,000	5,249	36,893	6,199	7,457	7,802	4,967	4,854	5,826	2,064	2,719	0,962
59,673	12,000	5,529	38,945	6,229	7,472	7,932	4,966	4,851	5,963	2,073	2,718	1,077
61,710	12,000	5,740	40,993	6,244	7,484	8,041	4,964	4,847	6,057	2,082	2,724	0,761
63,750	12,000	5,890	43,039	6,239	7,491	8,153	4,962	4,849	6,123	2,110	2,736	0,807
65,793	12,000	5,987	45,084	6,228	7,502	8,232	4,960	4,849	6,164	2,142	2,758	0,776
67,838	12,000	6,039	47,130	6,222	7,512	8,293	4,958	4,836	6,190	2,119	2,788	0,840
69,885	12,000	6,055	49,176	6,215	7,520	8,336	4,955	4,816	6,207	2,064	2,797	1,000
71,933	12,000	6,047	51,224	6,203	7,527	8,372	4,955	4,802	6,220	2,040	2,793	1,500
73,981	12,000	6,025	53,272	6,197	7,528	8,390	4,958	4,809	6,233	1,570	2,330	2,073
76,029	12,000	6,001	55,321	6,195	7,523	8,401	4,961	4,830	6,244	1,936	2,722	2,822
78,077	12,000	5,985	57,369	6,188	7,519	8,408	4,963	4,848	6,256	1,958	2,711	2,834
80,124	12,000	5,978	59,416	6,182	7,516	8,413	4,967	4,848	6,270	1,968	2,705	4,478
82,171	12,000	5,979	61,463	6,178	7,510	8,416	4,969	4,844	6,284	1,995	2,703	4,342
84,218	12,000	5,990	63,510	6,167	7,503	8,418	4,279	4,166	5,610	2,030	2,704	4,214
86,265	12,000	6,010	65,557	6,158	7,503	8,420	3,597	3,476	4,920	2,036	2,709	3,461
88,312	12,000	6,036	67,604	6,157	7,497	8,421	3,214	3,076	4,528	2,026	2,717	2,578
90,359	12,000	6,066	69,651	6,173	7,486	8,420	2,943	2,793	4,248	2,019	2,728	1,899
92,406	12,000	6,097	71,699	6,185	7,482	8,418	2,940	2,792	4,242	2,024	2,738	1,477
94,453	12,000	6,125	73,746	5,229	6,502	7,439	2,936	2,793	4,247	2,037	2,745	0,724
96,501	12,000	6,146	75,793	4,580	5,853	6,777	2,931	2,812	4,256	2,045	2,741	0,536
98,548	12,000	6,159	77,841	3,934	5,220	6,131	2,929	2,811	4,260	2,037	2,733	0,540
100,595	12,000	6,162	79,888	3,197	4,561	5,478	2,931	2,814	4,264			
102,642	12,000	6,161	81,935	2,543	3,920	4,810	2,932	2,816	4,268			
104,689	12,000	6,156	83,982	2,134	3,485	4,333	2,931	2,814	4,272			
106,737	12,000	6,151	86,030	2,126	3,485	4,306	2,928	2,802	4,274			
108,784	12,000	6,147	88,077	2,117	3,484	4,296	2,926	2,788	4,276			
110,831	12,000	6,146	90,124	2,118	3,483	4,291						
112,879	12,000	6,146	92,172	2,129	3,484	4,285						
114,926	12,000	6,148	94,219	2,145	3,484	4,277						
116,973	12,000	6,150	96,266	2,156	3,480	4,271						

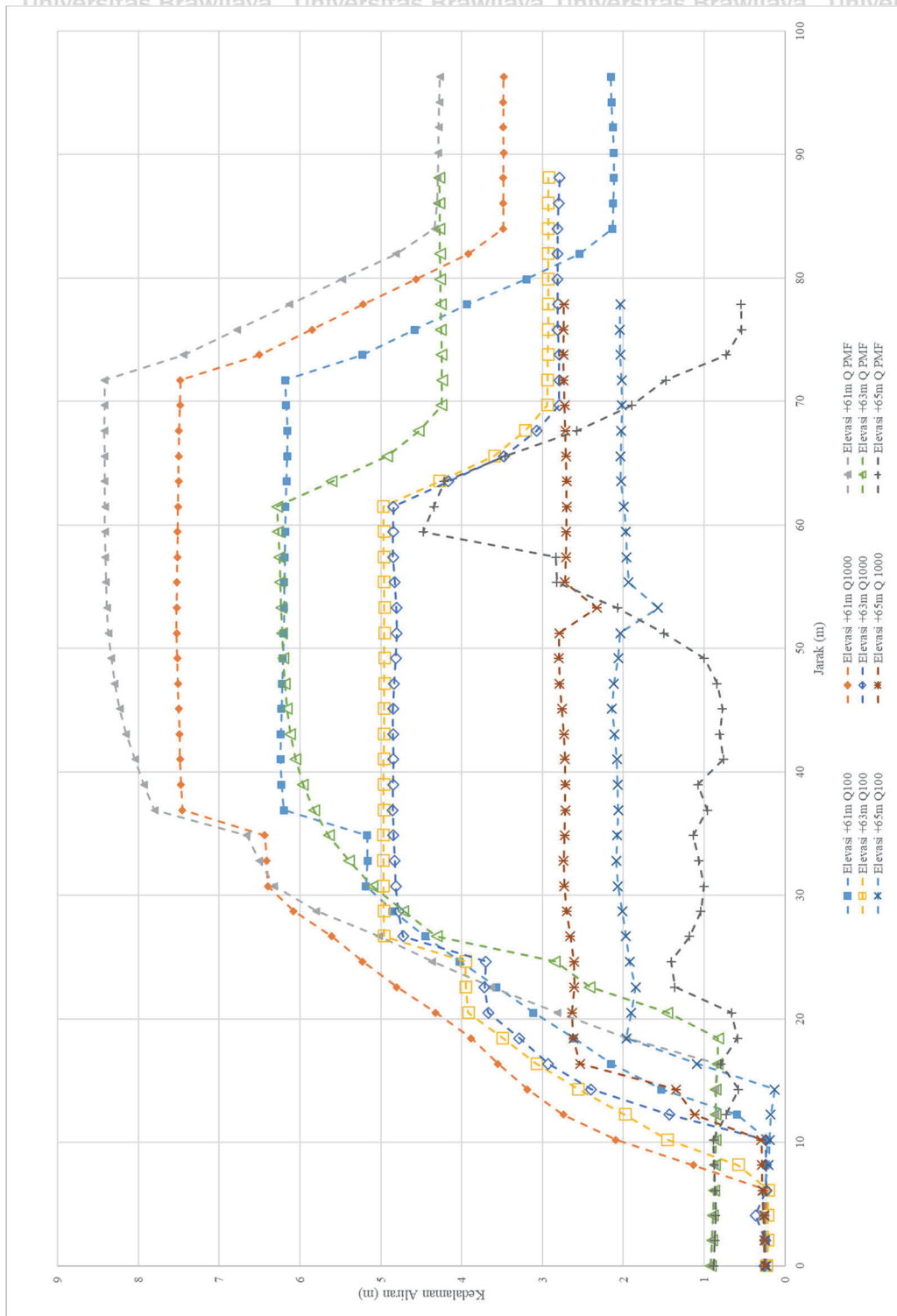
Keterangan :

 = Saluran Peluncur

 = Peredam Energi

 = Escape Chammel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.53 Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolam Olakan 39m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Perubahan akibat elevasi dari kolam dasar olakan membuat kedalaman aliran di hilir menurun. Sedangkan perubahan panjang kolam olakan mempengaruhi panjang kedalaman aliran di kolam olakan itu sendiri. Pada model standar USBR II (seri E₃-L₂) kedalaman aliran meningkat sesaat setelah loncatan hidrolis terjadi kemudian cenderung stabil disepanjang kolam olakan kecuali jika peredam energi gagal berfungsi akibat perlakuan debit Q_{PMF} .

3. Analisa kedalaman aliran panjang kolam olakan 53m (L₃).

Berikut disajikan hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m.

Tabel 4.21 Rekapitulasi hasil nilai kedalaman aliran untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 53 m (L₃)

X	Y	Z	Jarak	Kedalaman Aliran Elevasi +61m (E1)			Kedalaman Aliran Elevasi +63m (E2)			Kedalaman Aliran Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	0.246	0.281	0.919	0.248	0.286	0.893	0.240	0.359	0.633
23.374	12.000	9.036	2.034	0.242	0.267	0.906	0.241	0.272	0.877	0.249	0.249	0.641
25.376	12.000	8.669	4.069	0.245	0.255	0.891	0.236	0.392	0.862	0.260	0.260	0.652
27.378	12.000	8.298	6.105	0.240	0.243	0.878	0.271	0.215	0.850	0.272	0.272	0.663
29.381	12.000	7.920	8.144	0.237	0.844	0.867	0.239	0.219	0.845	0.280	0.282	0.588
31.386	12.000	7.533	10.186	0.218	1.915	0.857	0.240	1.392	0.844	0.291	0.293	0.596
33.393	12.000	7.134	12.232	1.084	2.628	0.855	0.435	2.033	0.845	0.207	0.225	0.493
35.402	12.000	6.722	14.283	1.797	3.090	0.861	1.377	2.625	0.846	0.125	0.573	0.376
37.415	12.000	6.294	16.340	2.422	3.494	0.869	2.221	3.172	0.798	0.539	2.126	0.521
39.430	12.000	5.848	18.404	2.860	4.020	1.681	2.711	3.525	0.786	1.812	2.215	0.500
41.448	12.000	5.381	20.476	3.385	4.457	2.751	3.115	3.972	1.967	2.012	2.299	1.004
43.471	12.000	4.905	22.554	3.830	4.744	3.575	3.136	4.007	2.802	2.074	2.365	0.501
45.495	12.000	4.478	24.623	4.257	5.089	4.320	3.134	4.006	3.195	2.092	2.392	0.525
47.520	12.000	4.170	26.671	4.676	5.447	4.968	4.180	4.996	4.565	2.120	2.386	1.130
49.545	12.000	4.050	28.699	5.087	5.991	5.757	4.196	4.984	4.881	2.158	2.381	0.787
51.567	12.000	4.177	30.726	5.439	6.374	6.286	4.196	4.995	5.190	2.170	2.394	0.554
53.589	12.000	4.499	32.773	5.431	6.423	6.501	4.191	5.019	5.436	2.151	2.420	1.002
55.612	12.000	4.894	34.834	5.426	6.465	6.664	4.189	5.044	5.631	2.150	2.446	2.080
57.640	12.000	5.249	36.893	6.426	7.451	7.799	4.197	5.056	5.769	2.160	2.464	2.592
59.673	12.000	5.529	38.945	6.429	7.469	7.917	4.212	5.060	5.875	2.160	2.473	2.840
61.710	12.000	5.740	40.993	6.432	8.000	8.020	4.228	5.057	5.955	2.143	2.481	2.930
63.750	12.000	5.890	43.039	6.435	7.007	8.119	4.236	5.051	6.000	2.127	2.493	3.015
65.793	12.000	5.987	45.084	6.438	8.000	8.197	4.226	5.046	6.047	2.127	2.500	3.065
67.838	12.000	6.039	47.130	6.440	7.502	8.258	4.212	5.042	6.073	2.140	2.543	3.170
69.885	12.000	6.055	49.176	6.442	7.471	8.303	4.209	5.038	6.093	2.152	2.564	3.269
71.933	12.000	6.047	51.224	6.445	7.289	8.342	4.215	5.038	6.110	2.161	2.577	3.370
73.981	12.000	6.025	53.272	6.450	7.501	8.363	4.225	5.043	6.127	2.167	2.581	3.454
76.029	12.000	6.001	55.321	6.452	7.506	8.377	4.233	5.051	6.140	2.170	2.578	3.535
78.077	12.000	5.985	57.369	6.451	8.000	8.387	4.242	5.056	6.152	2.171	2.576	3.602
80.124	12.000	5.978	59.416	6.449	7.517	8.394	4.240	5.058	6.162	2.172	2.574	3.673
82.171	12.000	5.979	61.463	6.449	7.500	8.399	4.251	5.055	6.172	2.173	2.574	3.708
84.218	12.000	5.990	63.510	6.452	7.412	8.401	4.242	5.048	6.182	2.172	2.580	3.718
86.265	12.000	6.010	65.557	6.455	8.000	8.403	4.226	5.039	6.191	2.166	2.591	3.726
88.312	12.000	6.036	67.604	6.458	8.000	8.402	4.215	5.030	6.199	1.625	2.117	3.260
90.359	12.000	6.066	69.651	6.461	7.500	8.401	4.219	5.025	6.206	2.149	2.539	3.593
92.406	12.000	6.097	71.699	6.461	8.000	8.399	4.230	5.025	6.211	2.071	2.552	3.664
94.453	12.000	6.125	73.746	6.458	7.294	8.395	4.226	5.029	6.214	2.072	2.554	3.743
96.501	12.000	6.146	75.793	6.453	7.003	8.391	4.210	5.039	6.210	2.081	2.557	3.742
98.548	12.000	6.159	77.841	6.448	7.501	8.387	3.231	4.075	5.221	2.090	2.563	3.752
100.595	12.000	6.162	79.888	6.448	7.204	8.381	2.762	3.606	4.727	2.098	2.567	3.760
102.642	12.000	6.161	81.935	6.450	7.313	8.375	2.389	3.229	4.338	2.103	2.571	3.764
104.689	12.000	6.156	83.982	6.450	7.290	8.368	2.213	3.057	4.158	2.107	2.576	3.764
106.737	12.000	6.151	86.030	6.450	7.315	8.362	2.208	3.056	4.158	2.113	2.579	3.762
108.784	12.000	6.147	88.077	5.422	6.340	7.384	2.208	3.049	4.166	2.112	2.582	3.760
110.831	12.000	6.146	90.124	4.716	5.872	6.726	2.211	3.041	4.170	2.106	2.584	3.758
112.879	12.000	6.146	92.172	4.070	4.702	5.923	2.214	3.035	4.172	2.098	2.586	3.753
114.926	12.000	6.148	94.219	3.426	4.225	5.270	2.213	3.039	4.172			
116.973	12.000	6.150	96.266	2.784	3.632	4.606	2.212	3.050	4.172			

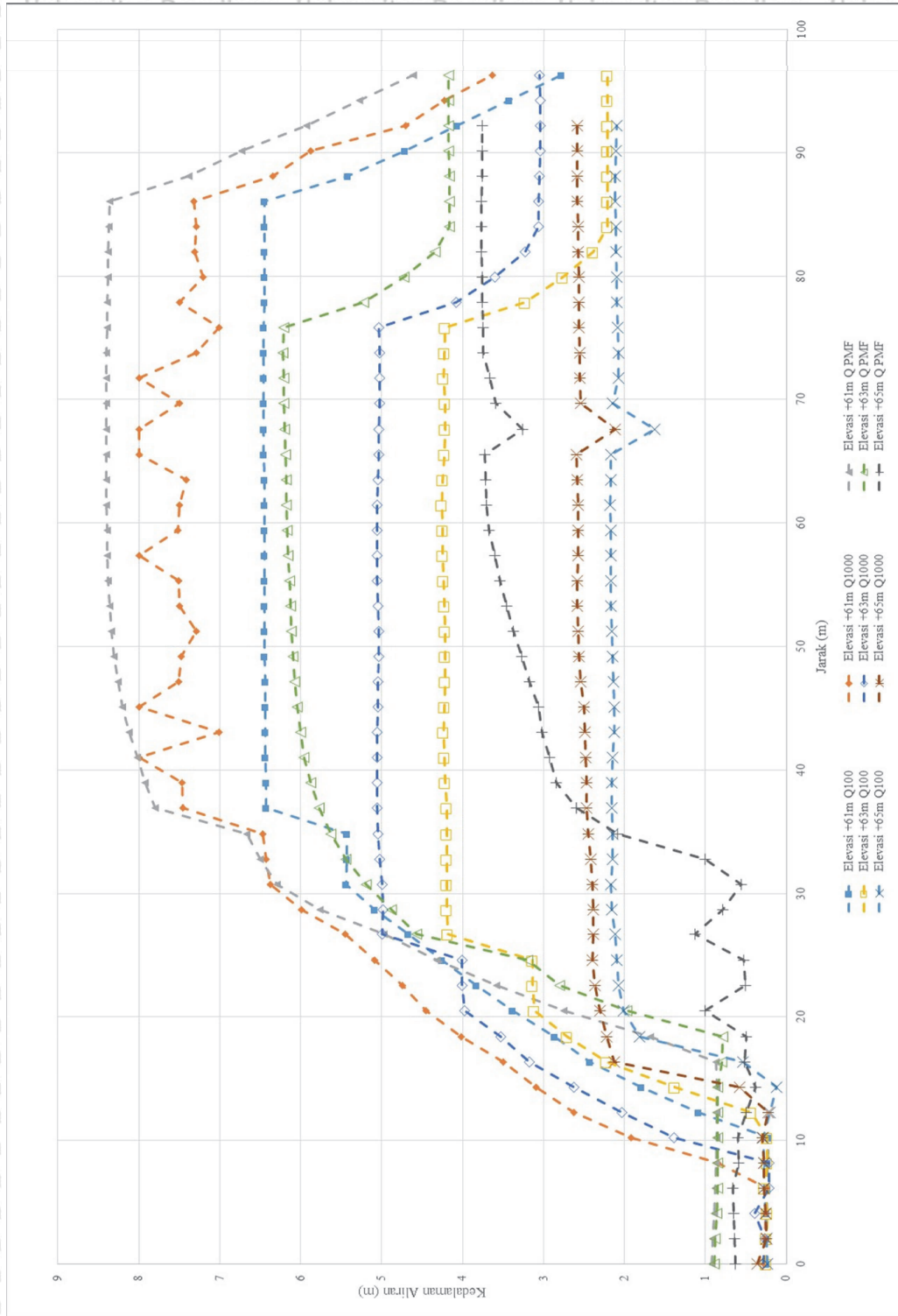
Keterangan :

= Saluran Peluncur

= Peredam Energi

= Escape Channel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



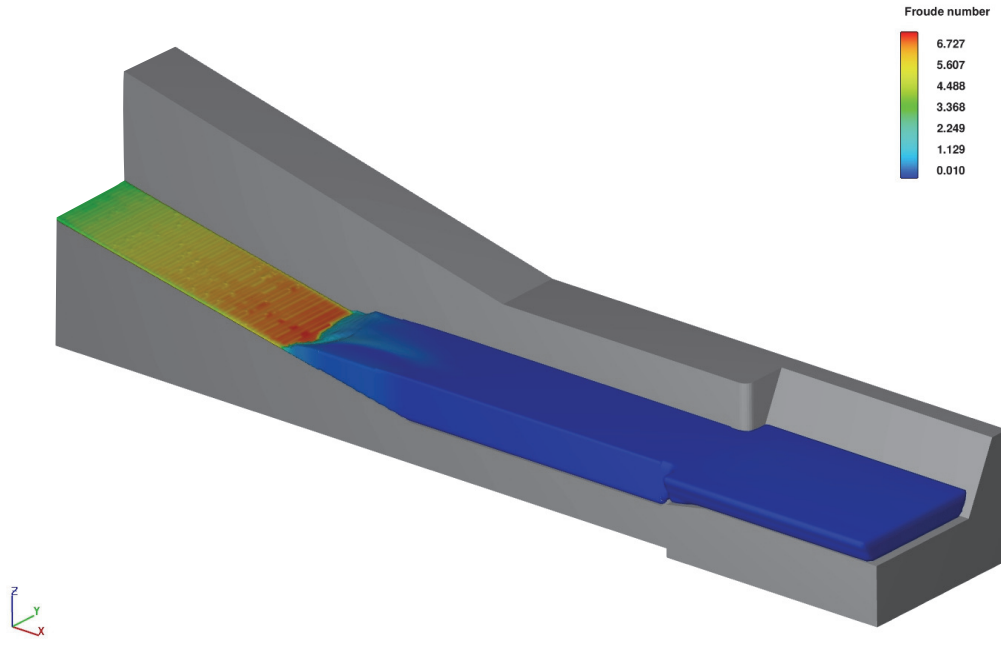
Gambar 4.54 Profil Kedalaman Aliran Pada Panjang Kolam Olakan 53m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Perubahan akibat elevasi dari kolam dasar olakan membuat kedalaman aliran di hilir menurun. Sedangkan perubahan panjang kolam olakan mempengaruhi panjang kedalaman aliran di kolam olakan itu sendiri. Pada model standar USBR II (seri E_3-L_2) kedalaman aliran meningkat sesaat setelah loncatan hidrolis terjadi kemudian cenderung stabil disepanjang kolam olakan kecuali saat perlakuan debit Q_{PMF} kedalaman air meningkat di bagian hilir.

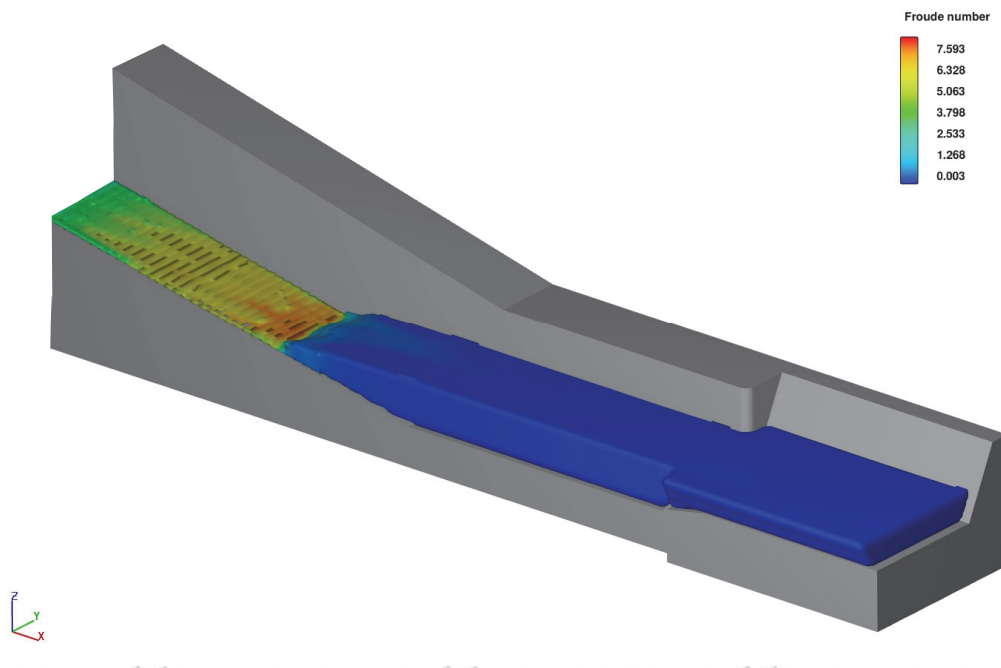
4.4.3 Analisa Bilangan Froude

1. Analisa Bilangan Froude panjang kolam olakan 31 m (L_1).

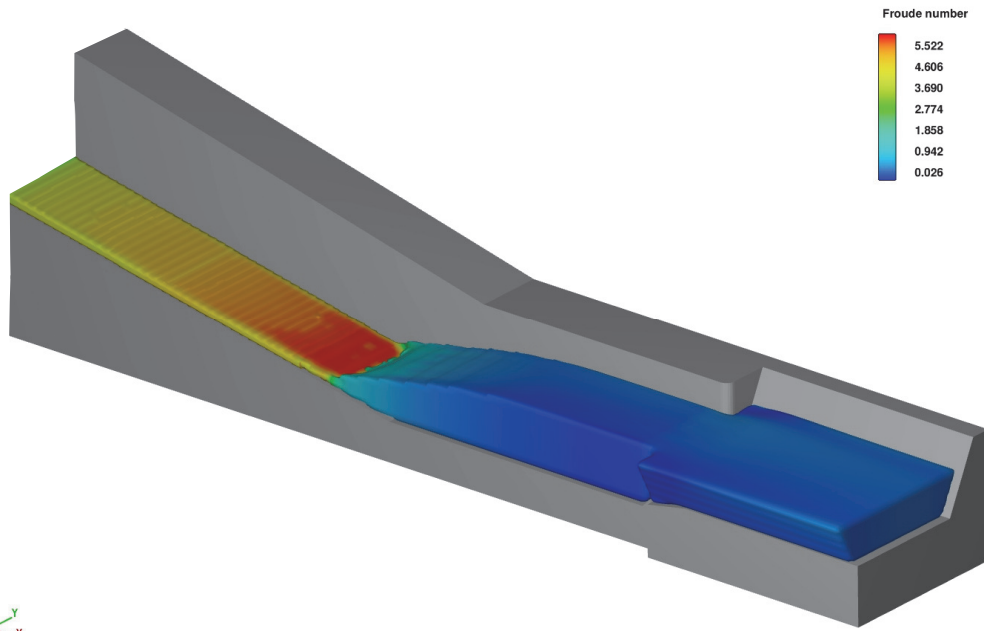
Berikut disajikan hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m.



Gambar 4.55 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E2-L1
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

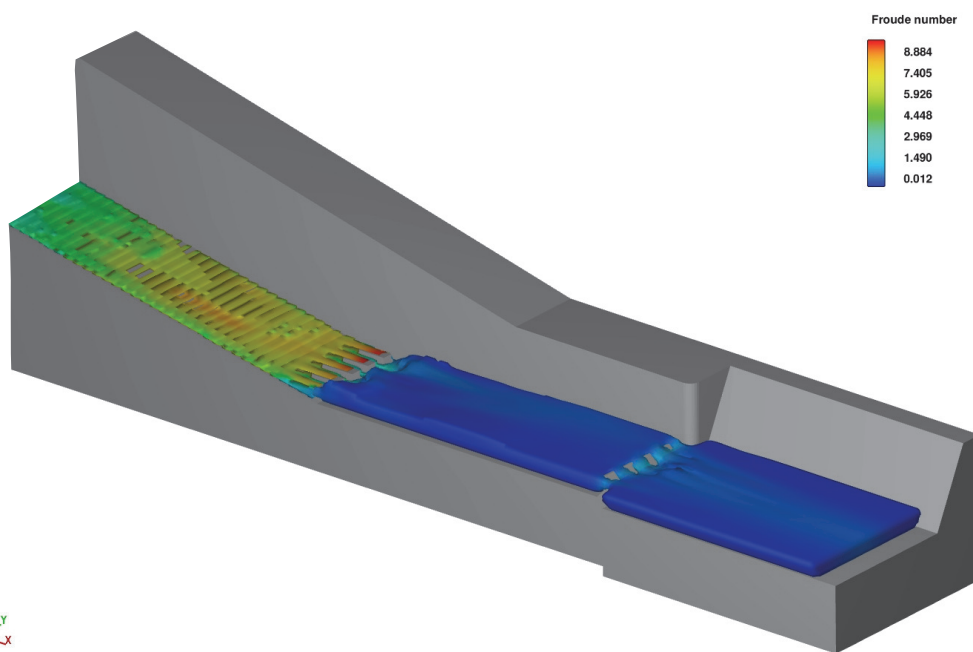


Gambar 4.56 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E2-L1
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

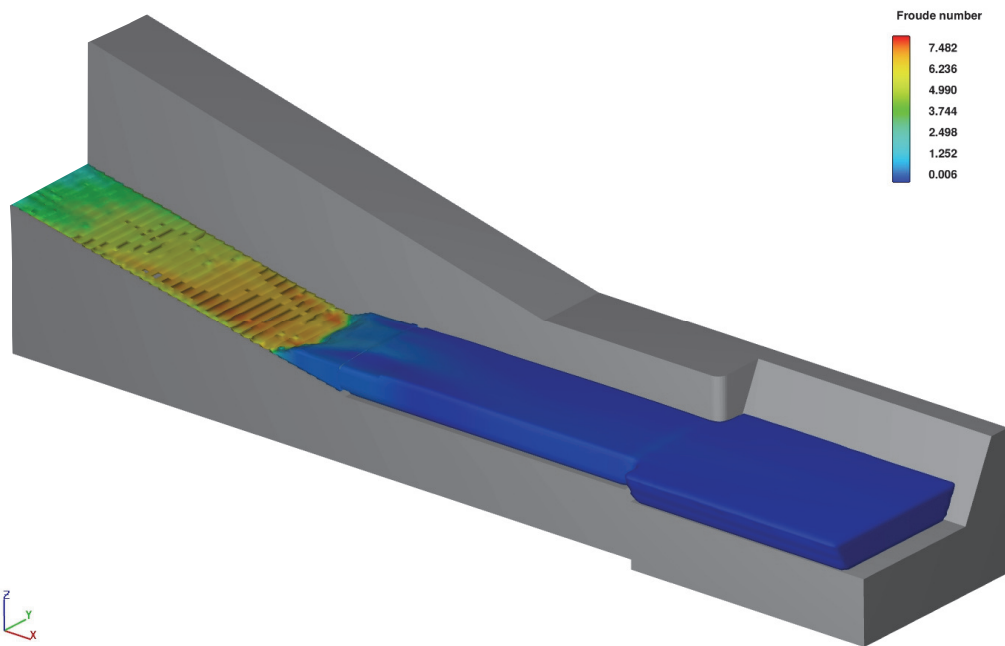


Gambar 4.57 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E₂-L₁
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

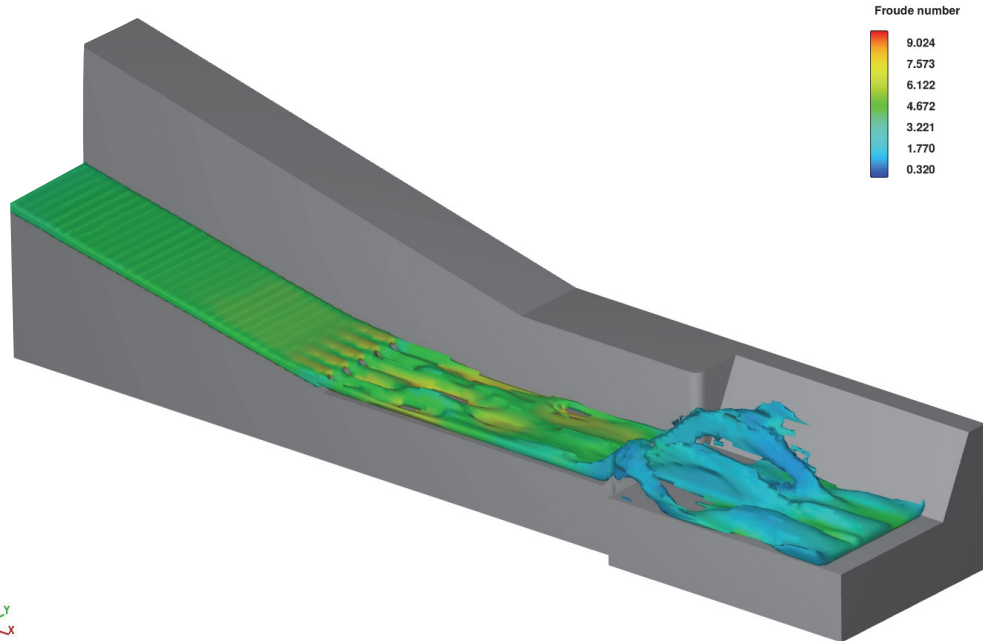
Secara umum terlihat pada Gambar 4.55, Gambar 4.56 dan Gambar 4.57 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* untuk model seri E₂-L₁ di semua perlakuan debit, membuktikan bangunan peredam energi seri E₂-L₁ mampu berfungsi dengan baik.



Gambar 4.58 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E₃-L₁
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.59 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E_3-L_1
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.60 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E_3-L_1
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Terlihat dalam Gambar 4.58, Gambar 4.59 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* untuk model seri E_3-L_1 . Saat model diberi perlakuan debit Q_{PMF} (Gambar 4.60), bangunan peredam energi tidak berfungsi dengan baik.

Tabel 4.22 Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 31 m (L₁)

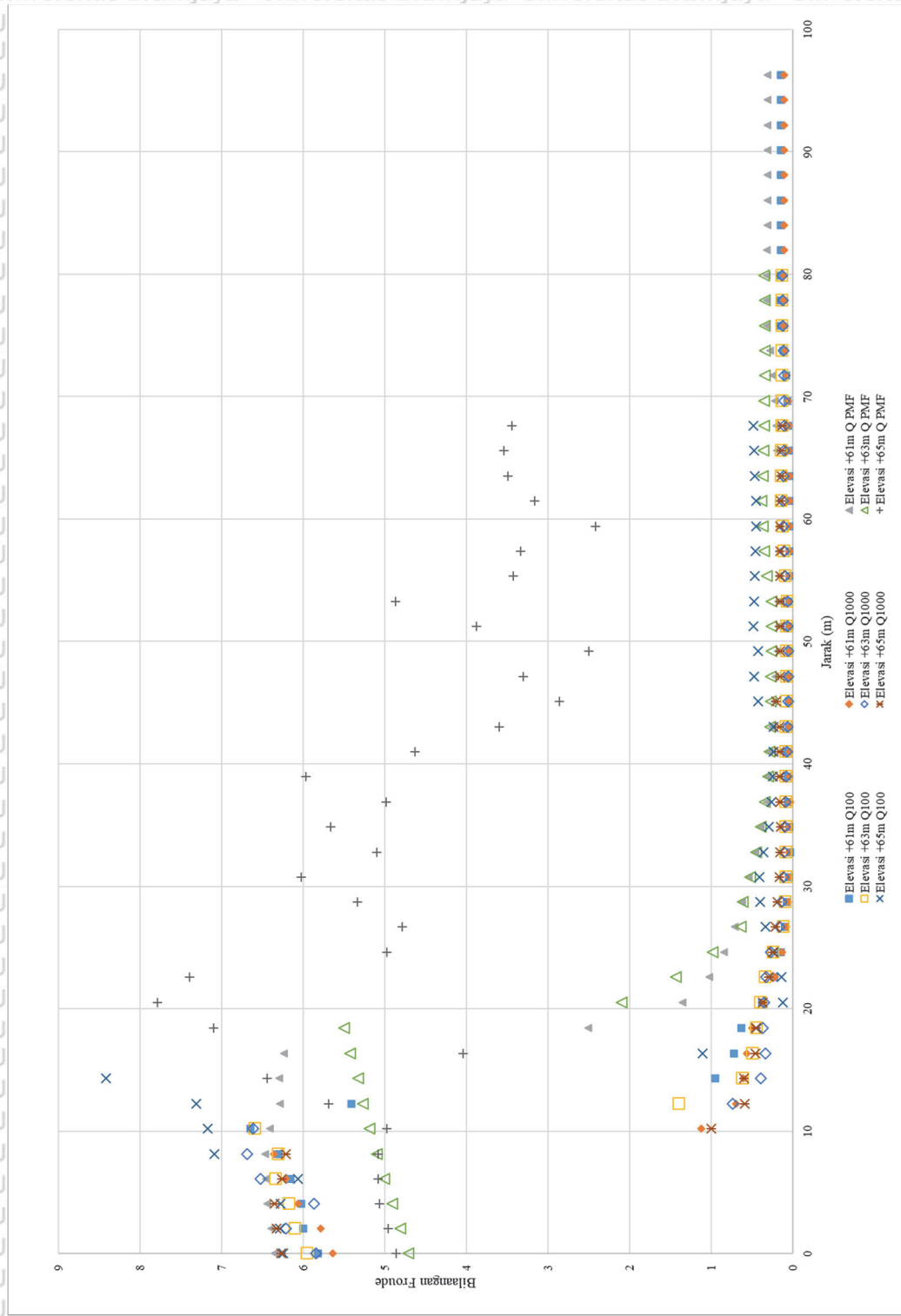
X	Y	Z	Jarak	Bilangan Froud Elevasi +61m (E1)			Bilangan Froud Elevasi +63m (E2)			Bilangan Froud Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	5.819	5.639	6.353	5.958	5.849	4.713	6.249	6.274	4.866
23.374	12.000	9.036	2.034	5.998	5.792	6.392	6.112	6.219	4.813	6.289	6.325	4.965
25.376	12.000	8.669	4.069	6.024	6.071	6.447	6.183	5.874	4.912	6.283	6.352	5.066
27.378	12.000	8.298	6.105	6.155	6.213	6.462	6.345	6.525	5.010	6.069	6.261	5.081
29.381	12.000	7.920	8.144	6.302	6.362	6.471	6.317	6.687	5.102	7.090	6.216	5.082
31.386	12.000	7.533	10.186	6.650	1.122	6.415	6.602	6.613	5.193	7.177	0.999	4.978
33.393	12.000	7.134	12.232	5.412	0.696	6.288	1.402	0.737	5.268	7.314	0.593	5.686
35.402	12.000	6.722	14.283	0.953	0.609	6.293	0.624	0.391	5.328	8.422	0.603	6.443
37.415	12.000	6.294	16.340	0.722	0.569	6.236	0.501	0.337	5.425	1.104	0.463	4.041
39.430	12.000	5.848	18.404	0.630	0.500	2.507	0.456	0.366	5.497	0.450	0.456	7.100
41.448	12.000	5.381	20.476	0.381	0.381	1.351	0.404	0.352	2.097	0.123	0.369	7.790
43.471	12.000	4.905	22.554	0.232	0.225	1.028	0.348	0.327	1.437	0.140	0.293	7.395
45.495	12.000	4.478	24.623	0.149	0.131	0.842	0.244	0.272	0.982	0.241	0.249	4.975
47.520	12.000	4.170	26.671	0.101	0.084	0.717	0.122	0.167	0.641	0.341	0.214	4.786
49.545	12.000	4.050	28.699	0.075	0.062	0.626	0.099	0.140	0.618	0.404	0.187	5.336
51.567	12.000	4.177	30.726	0.051	0.051	0.542	0.090	0.118	0.526	0.412	0.167	6.026
53.589	12.000	4.499	32.773	0.037	0.047	0.463	0.088	0.104	0.453	0.363	0.156	5.100
55.612	12.000	4.894	34.834	0.041	0.045	0.391	0.088	0.098	0.394	0.296	0.152	5.662
57.640	12.000	5.249	36.893	0.055	0.037	0.319	0.088	0.092	0.345	0.261	0.155	4.981
59.673	12.000	5.529	38.945	0.062	0.038	0.308	0.088	0.084	0.305	0.249	0.162	5.971
61.710	12.000	5.740	40.993	0.059	0.039	0.284	0.088	0.075	0.286	0.239	0.167	4.633
63.750	12.000	5.890	43.039	0.053	0.039	0.258	0.087	0.067	0.277	0.239	0.167	3.597
65.793	12.000	5.987	45.084	0.049	0.039	0.234	0.086	0.062	0.271	0.428	0.208	2.858
67.838	12.000	6.039	47.130	0.046	0.040	0.212	0.085	0.060	0.268	0.478	0.158	3.302
69.885	12.000	6.055	49.176	0.045	0.040	0.193	0.083	0.062	0.267	0.430	0.157	2.500
71.933	12.000	6.047	51.224	0.045	0.041	0.183	0.080	0.066	0.266	0.481	0.157	3.875
73.981	12.000	6.025	53.272	0.044	0.041	0.178	0.076	0.070	0.266	0.480	0.159	4.869
76.029	12.000	6.001	55.321	0.044	0.041	0.174	0.099	0.096	0.323	0.470	0.158	3.431
78.077	12.000	5.985	57.369	0.043	0.041	0.170	0.119	0.111	0.354	0.457	0.157	3.341
80.124	12.000	5.978	59.416	0.043	0.041	0.168	0.136	0.119	0.374	0.451	0.154	2.416
82.171	12.000	5.979	61.463	0.042	0.041	0.166	0.152	0.125	0.388	0.454	0.149	3.168
84.218	12.000	5.990	63.510	0.043	0.040	0.164	0.147	0.115	0.373	0.467	0.143	3.490
86.265	12.000	6.010	65.557	0.052	0.049	0.197	0.145	0.110	0.362	0.479	0.139	3.546
88.312	12.000	6.036	67.604	0.059	0.054	0.204	0.143	0.107	0.355	0.481	0.136	3.442
90.359	12.000	6.066	69.651	0.070	0.061	0.221	0.143	0.106	0.351			
92.406	12.000	6.097	71.699	0.086	0.072	0.245	0.142	0.107	0.349			
94.453	12.000	6.125	73.746	0.114	0.089	0.283	0.143	0.112	0.348			
96.501	12.000	6.146	75.793	0.151	0.110	0.325	0.143	0.120	0.348			
98.548	12.000	6.159	77.841	0.150	0.109	0.322	0.144	0.128	0.349			
100.595	12.000	6.162	79.888	0.149	0.108	0.319	0.144	0.133	0.350			
102.642	12.000	6.161	81.935	0.149	0.107	0.317						
104.689	12.000	6.156	83.982	0.148	0.107	0.316						
106.737	12.000	6.151	86.030	0.148	0.106	0.316						
108.784	12.000	6.147	88.077	0.148	0.106	0.316						
110.831	12.000	6.146	90.124	0.148	0.105	0.316						
112.879	12.000	6.146	92.172	0.147	0.105	0.316						
114.926	12.000	6.148	94.219	0.147	0.106	0.316						
116.973	12.000	6.150	96.266	0.146	0.105	0.316						

Keterangan :

 = Saluran Peluncur = Peredam Energi = Escape Channel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

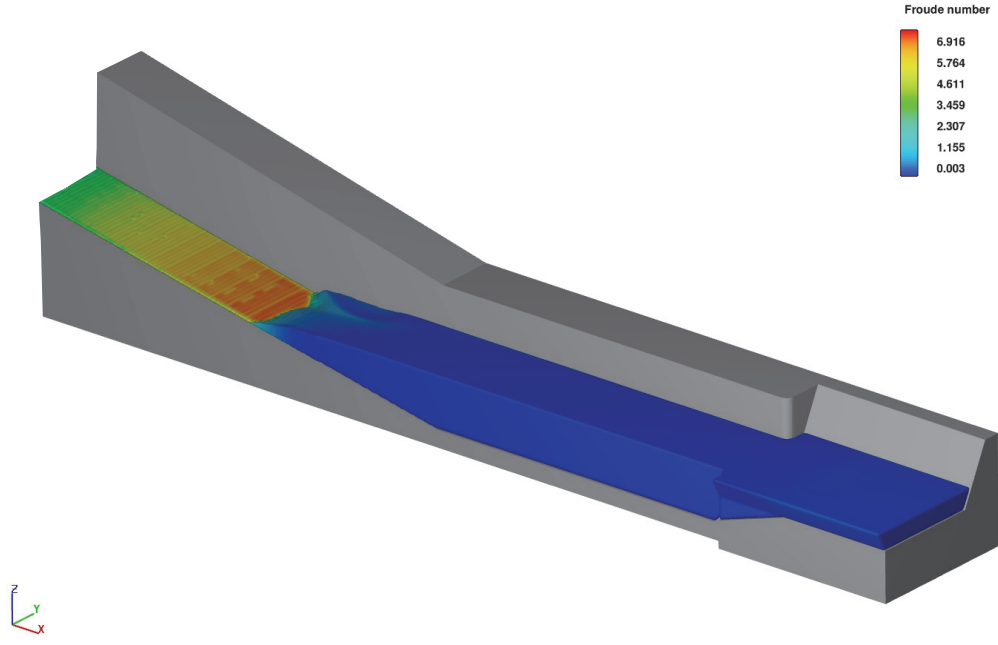
Dari Tabel 4.22 diatas dibuatlah grafik profil bilangan Froude di sepanjang bangunan peredam energi.



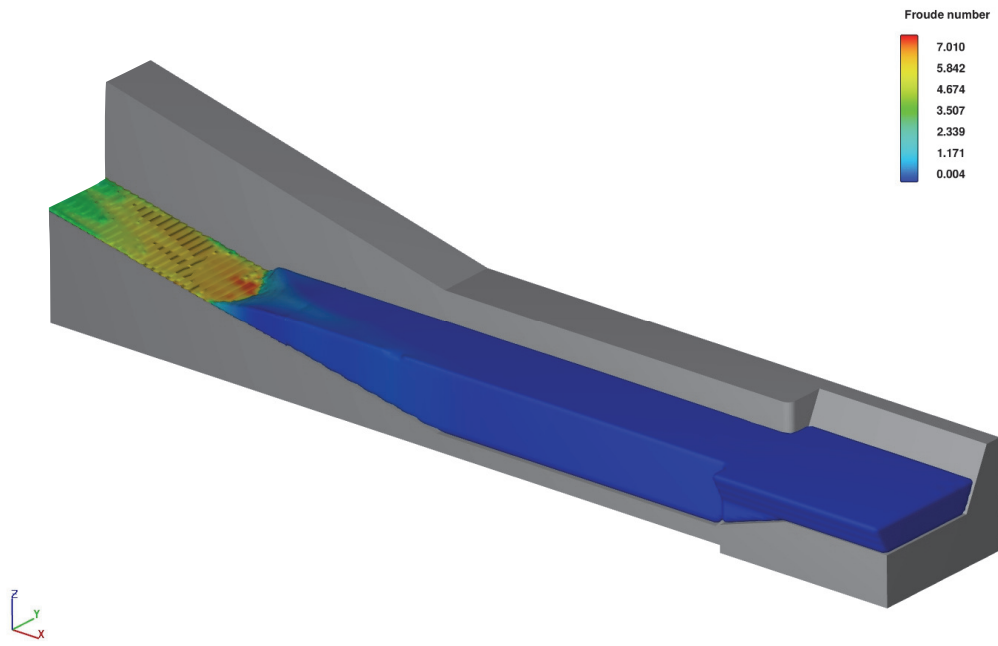
Gambar 4.61 Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolam Olakan 3.1m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Terlihat dalam Gambar 4.61 semua model memberikan hasil aliran sub kritis pada bagian hilir bangunan peredam energi, kecuali model seri E₃-L₁ saat diperlakukan debit Q_{PMF}.

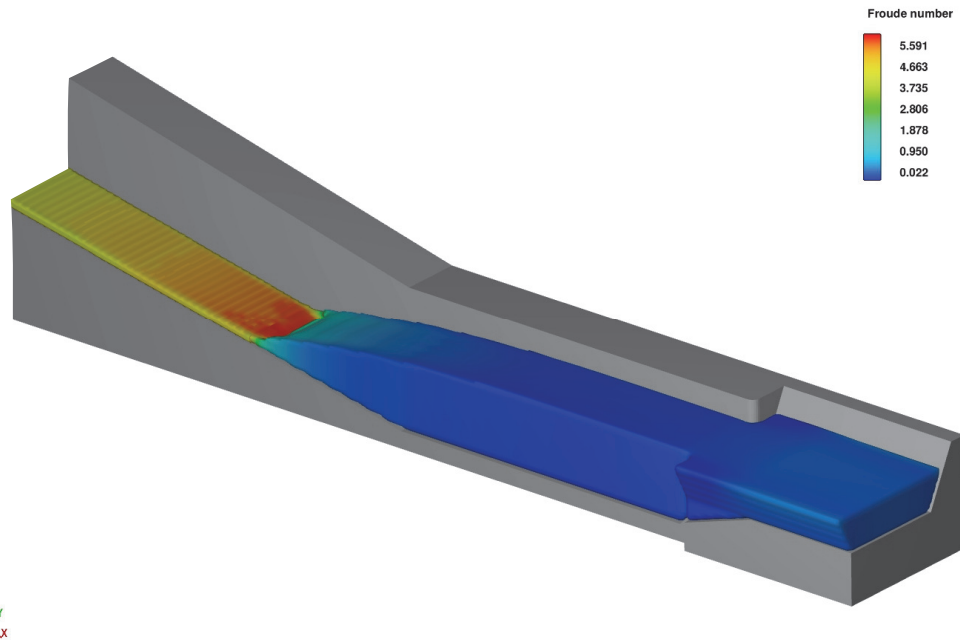
- Analisa Bilangan Froude panjang kolam olakan 39m (L₂).
Berikut disajikan hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m.



Gambar 4.62 Profil bilangan Froude Q₁₀₀ pada E₁-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

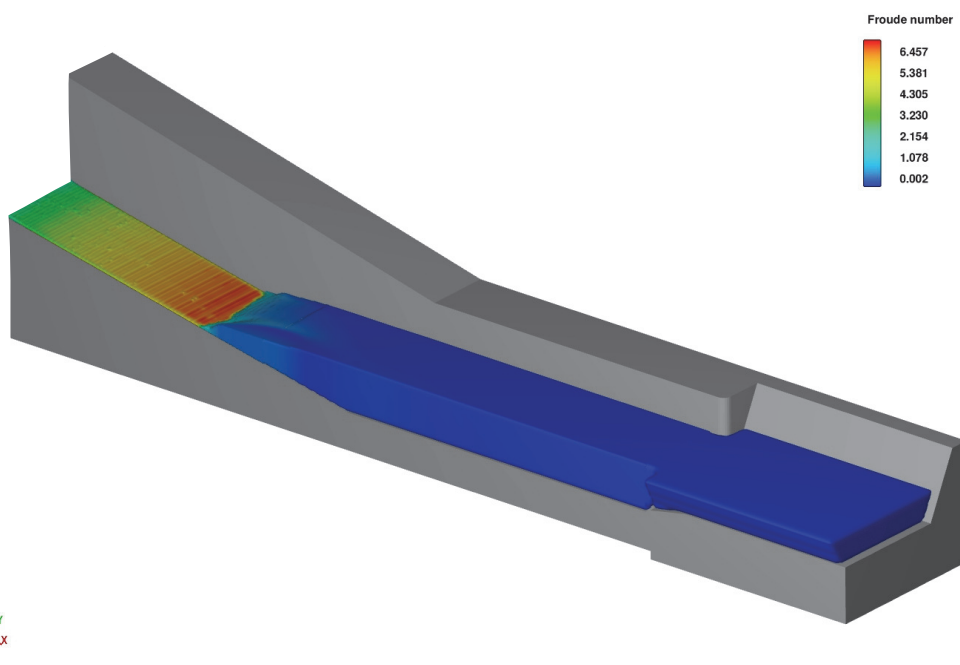


Gambar 4.63 Profil bilangan Froude Q₁₀₀₀ pada E₁-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

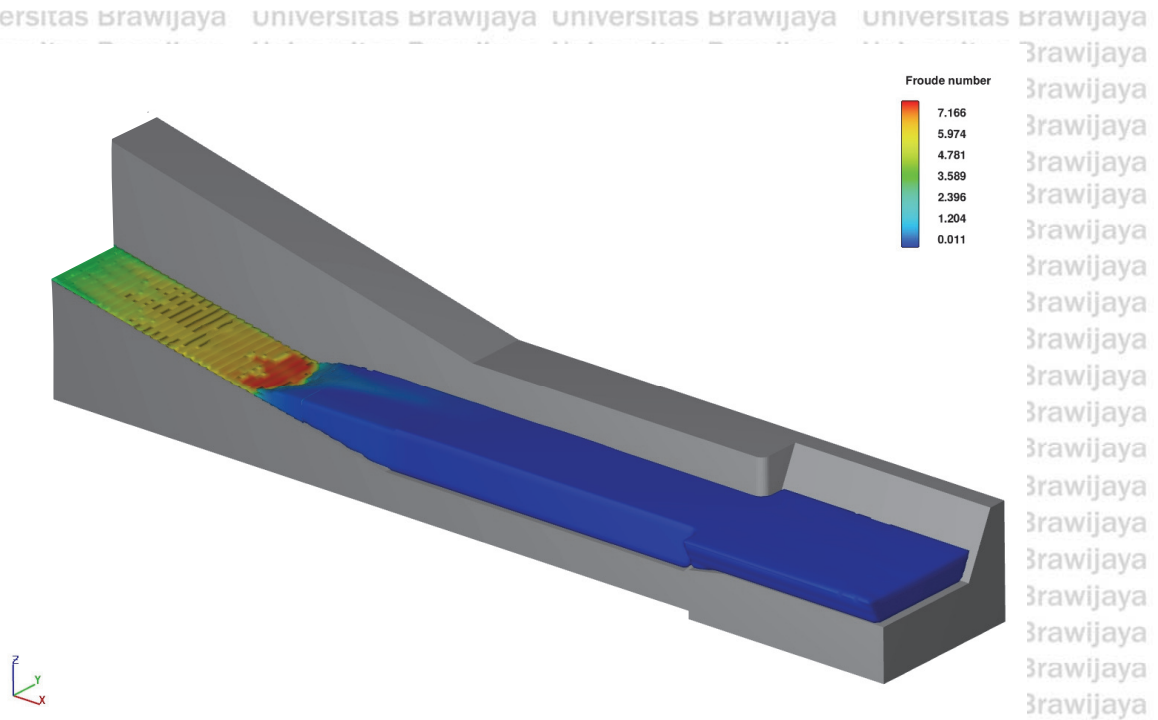


Gambar 4.64 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E₁-L₂
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

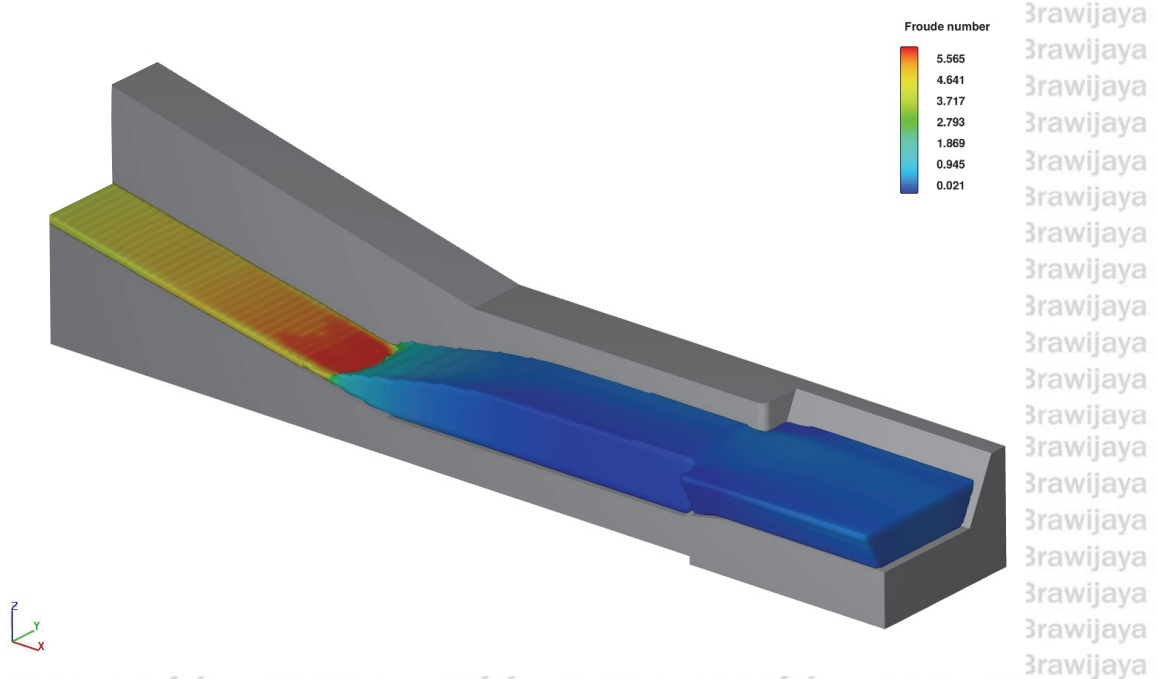
Secara umum terlihat pada Gambar 4.62, Gambar 4.63 dan Gambar 4.64 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* untuk model seri E₁-L₂ di semua perlakuan debit, membuktikan bangunan peredam energi seri E₁-L₂ mampu berfungsi dengan baik.



Gambar 4.65 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E₂-L₂
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

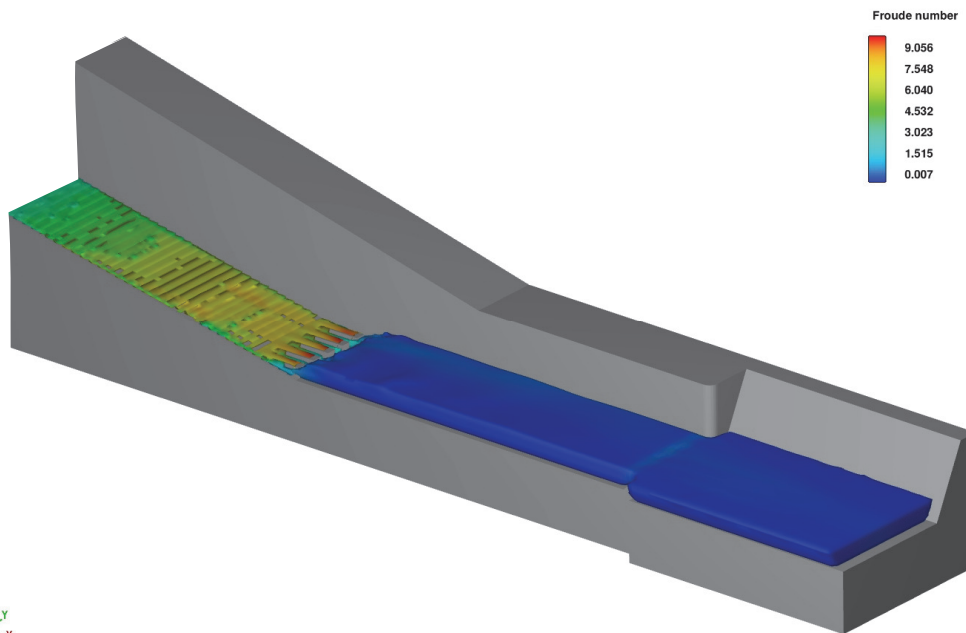


Gambar 4.66 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E2-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

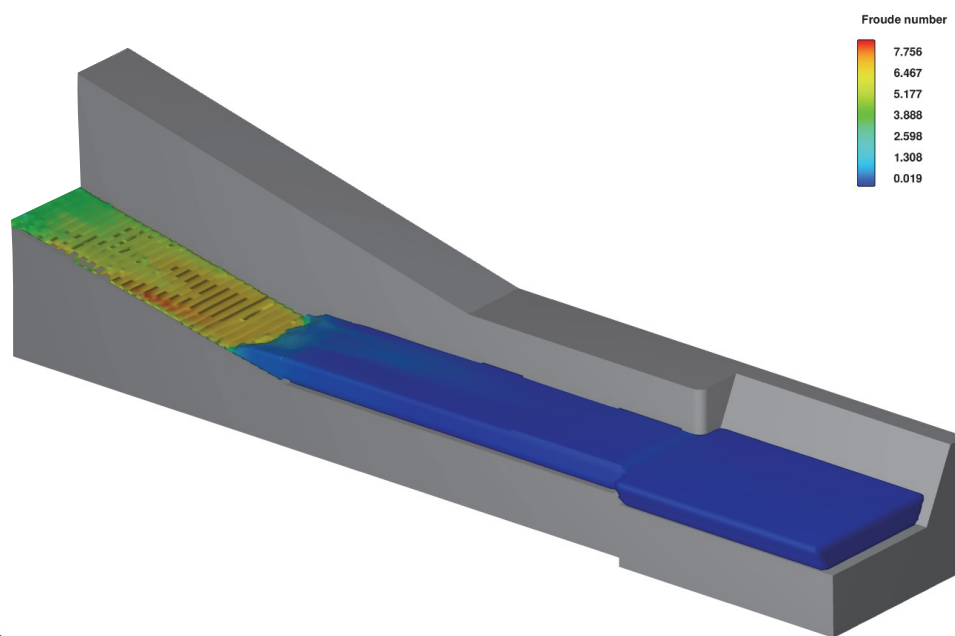


Gambar 4.67 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E2-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

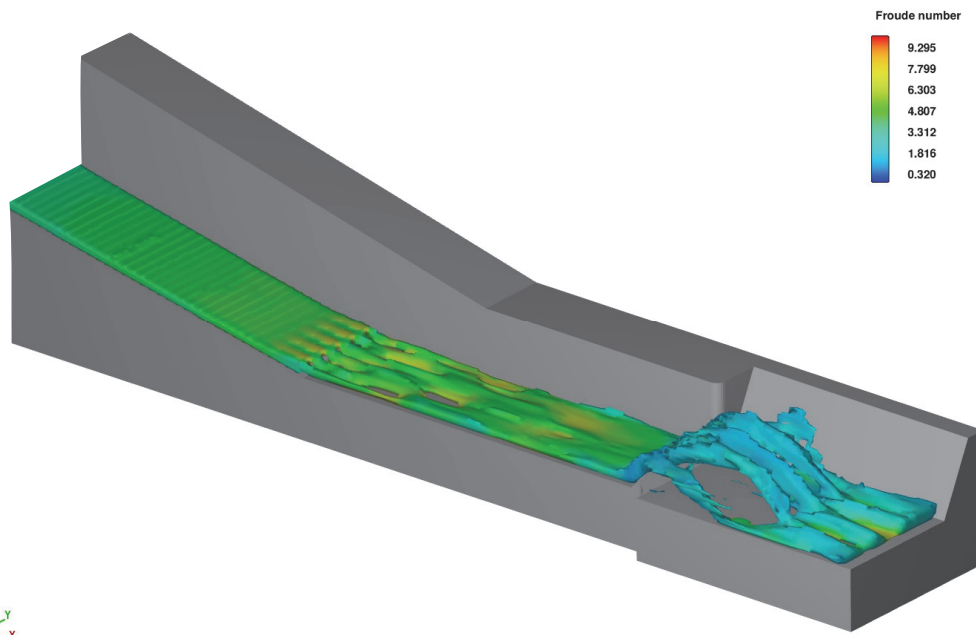
Secara umum terlihat pada Gambar 4.65, Gambar 4.66 dan Gambar 4.67 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* untuk model seri E1-L2 di semua perlakuan debit, membuktikan bangunan peredam energi seri E2-L2 mampu berfungsi dengan baik.



Gambar 4.68 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E3-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.69 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E3-L2
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.70 Profil bilangan Froude QPMF pada E₃-L₂
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Terlihat dalam Gambar 4.68, Gambar 4.69 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* untuk model seri E₃-L₂. Saat model diberi perlakuan debit Q_{PMF} (Gambar 4.70), bangunan peredam energi tidak berfungsi dengan baik.

Tabel 4.23 Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 39 m (L₂)

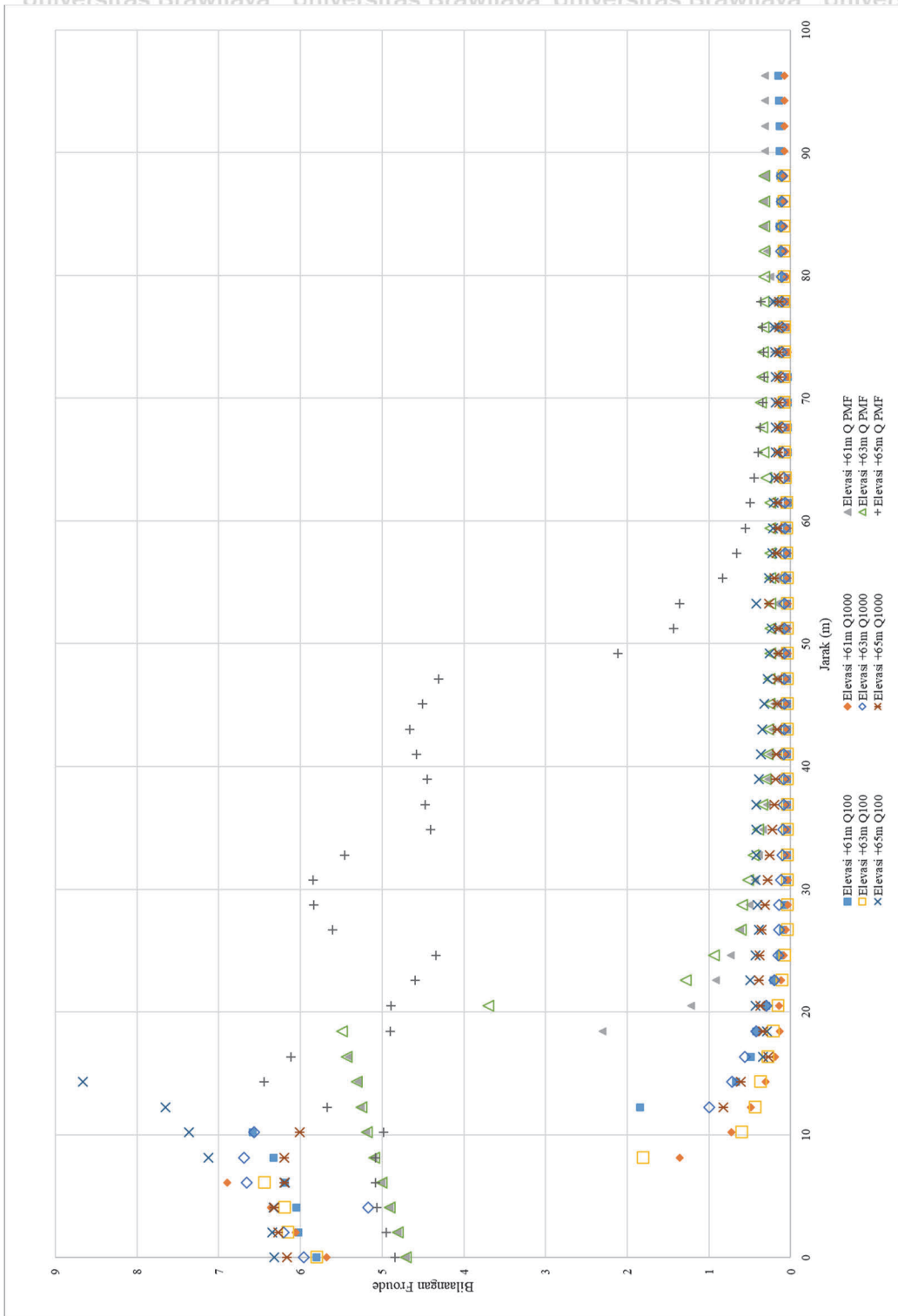
X	Y	Z	Jarak	Bilangan Froud Elevasi +61m (E1)			Bilangan Froud Elevasi +63m (E2)			Bilangan Froud Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m³/det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m³/det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m³/det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m³/det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m³/det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m³/det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m³/det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m³/det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m³/det)
(m)	(m)	(m)	(m)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	5.803	5.681	4.713	5.800	5.961	4.709	6.319	6.164	4.847
23.374	12.000	9.036	2.034	6.027	6.055	4.814	6.154	6.205	4.813	6.349	6.270	4.949
25.376	12.000	8.669	4.069	6.053	6.366	4.913	6.195	5.176	4.908	6.326	6.321	5.066
27.378	12.000	8.298	6.105	6.188	6.901	5.011	6.441	6.660	5.007	6.188	6.198	5.083
29.381	12.000	7.920	8.144	6.329	1.356	5.102	1.809	6.693	5.099	7.128	6.201	5.083
31.386	12.000	7.533	10.186	6.586	0.729	5.192	0.600	6.565	5.190	7.367	6.006	4.979
33.393	12.000	7.134	12.232	1.840	0.485	5.258	0.441	0.996	5.255	7.653	0.826	5.676
35.402	12.000	6.722	14.283	0.667	0.311	5.295	0.370	0.716	5.311	8.665	0.613	6.442
37.415	12.000	6.294	16.340	0.491	0.194	5.408	0.283	0.566	5.435	0.339	0.274	6.118
39.430	12.000	5.848	18.404	0.426	0.136	2.304	0.219	0.427	5.494	0.290	0.339	4.903
41.448	12.000	5.381	20.476	0.298	0.141	1.218	0.163	0.296	3.697	0.427	0.371	4.892
43.471	12.000	4.905	22.554	0.211	0.122	0.916	0.113	0.201	1.283	0.501	0.393	4.596
45.495	12.000	4.478	24.623	0.132	0.085	0.735	0.074	0.154	0.938	0.434	0.384	4.339
47.520	12.000	4.170	26.671	0.097	0.061	0.616	0.045	0.147	0.614	0.392	0.353	5.611
49.545	12.000	4.050	28.699	0.076	0.038	0.507	0.043	0.142	0.597	0.404	0.316	5.840
51.567	12.000	4.177	30.726	0.048	0.033	0.438	0.043	0.122	0.522	0.428	0.284	5.845
53.589	12.000	4.499	32.773	0.043	0.044	0.386	0.043	0.101	0.454	0.423	0.255	5.455
55.612	12.000	4.894	34.834	0.048	0.048	0.337	0.044	0.091	0.395	0.420	0.227	4.406
57.640	12.000	5.249	36.893	0.048	0.043	0.291	0.045	0.088	0.346	0.420	0.200	4.472
59.673	12.000	5.529	38.945	0.047	0.045	0.271	0.045	0.087	0.306	0.393	0.182	4.448
61.710	12.000	5.740	40.993	0.044	0.046	0.248	0.046	0.084	0.284	0.368	0.172	4.577
63.750	12.000	5.890	43.039	0.045	0.044	0.223	0.046	0.080	0.271	0.351	0.168	4.661
65.793	12.000	5.987	45.084	0.046	0.043	0.202	0.046	0.077	0.262	0.324	0.165	4.509
67.838	12.000	6.039	47.130	0.047	0.042	0.185	0.046	0.076	0.257	0.285	0.160	4.313
69.885	12.000	6.055	49.176	0.048	0.040	0.174	0.045	0.076	0.254	0.258	0.153	2.114
71.933	12.000	6.047	51.224	0.049	0.040	0.169	0.045	0.076	0.252	0.237	0.152	1.430
73.981	12.000	6.025	53.272	0.048	0.039	0.166	0.046	0.074	0.251	0.424	0.264	1.362
76.029	12.000	6.001	55.321	0.046	0.037	0.164	0.049	0.071	0.249	0.270	0.199	0.837
78.077	12.000	5.985	57.369	0.044	0.035	0.162	0.050	0.069	0.249	0.226	0.172	0.659
80.124	12.000	5.978	59.416	0.042	0.033	0.161	0.050	0.069	0.249	0.213	0.163	0.554
82.171	12.000	5.979	61.463	0.040	0.033	0.161	0.051	0.068	0.249	0.209	0.157	0.494
84.218	12.000	5.990	63.510	0.040	0.033	0.161	0.068	0.085	0.302	0.197	0.152	0.444
86.265	12.000	6.010	65.557	0.040	0.034	0.162	0.075	0.101	0.333	0.186	0.148	0.397
88.312	12.000	6.036	67.604	0.040	0.034	0.163	0.081	0.113	0.352	0.182	0.145	0.377
90.359	12.000	6.066	69.651	0.039	0.034	0.164	0.086	0.122	0.365	0.184	0.144	0.341
92.406	12.000	6.097	71.699	0.039	0.034	0.166	0.082	0.115	0.350	0.186	0.144	0.327
94.453	12.000	6.125	73.746	0.052	0.040	0.198	0.081	0.111	0.339	0.192	0.146	0.336
96.501	12.000	6.146	75.793	0.058	0.044	0.212	0.081	0.109	0.332	0.201	0.147	0.349
98.548	12.000	6.159	77.841	0.067	0.049	0.228	0.082	0.112	0.329	0.211	0.146	0.363
100.595	12.000	6.162	79.888	0.084	0.055	0.253	0.082	0.114	0.327			
102.642	12.000	6.161	81.935	0.111	0.066	0.290	0.083	0.115	0.326			
104.689	12.000	6.156	83.982	0.135	0.077	0.325	0.084	0.115	0.326			
106.737	12.000	6.151	86.030	0.130	0.076	0.320	0.084	0.114	0.327			
108.784	12.000	6.147	88.077	0.130	0.076	0.316	0.085	0.113	0.328			
110.831	12.000	6.146	90.124	0.133	0.076	0.314						
112.879	12.000	6.146	92.172	0.138	0.078	0.313						
114.926	12.000	6.148	94.219	0.144	0.080	0.313						
116.973	12.000	6.150	96.266	0.148	0.081	0.313						

Keterangan :

= Saluran Peluncur = Peredam Energi = Escape Channel

Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Dari Tabel 4.23 diatas dibuatlah grafik profil bilangan Froude di sepanjang bangunan peredam energi.

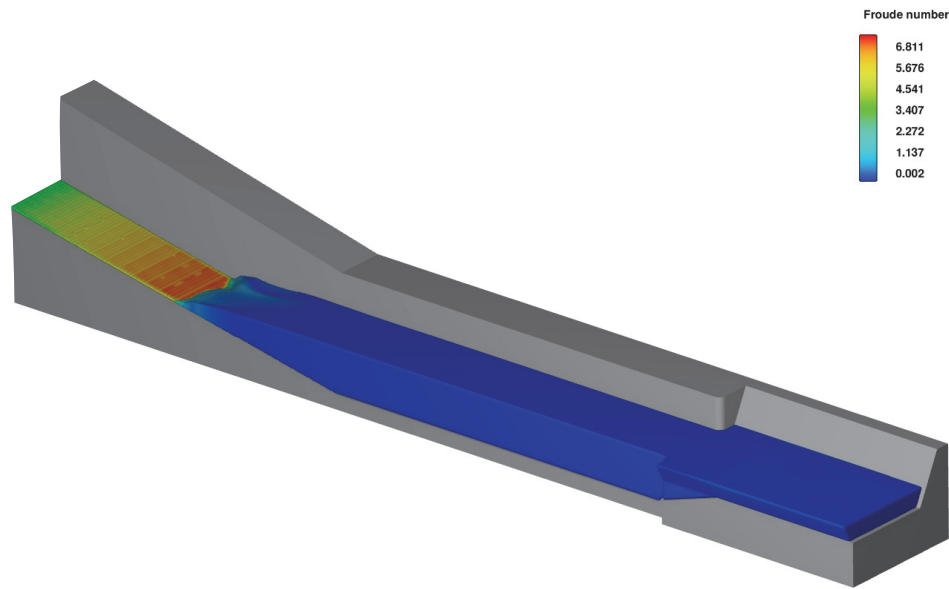


Gambar 4.71 Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolum Olakan 39m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

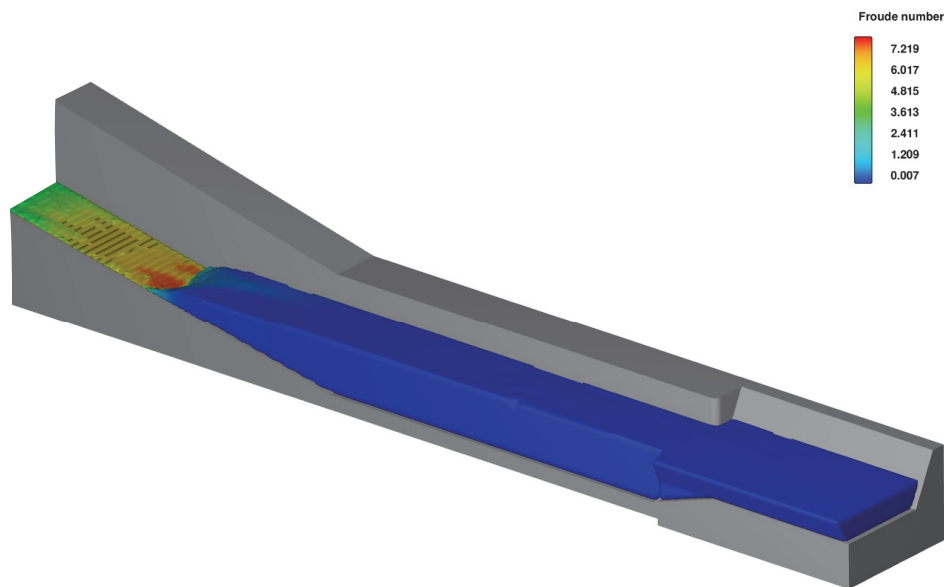
Terlihat dalam Gambar 4.71 semua model memberikan hasil aliran sub kritis pada bagian hilir bangunan peredam energi, kecuali model seri E₃-L₂ saat diperlakukan debit Q_{PMF}.

3. Analisa Bilangan Froude panjang kolam olakan 53m (L₃).

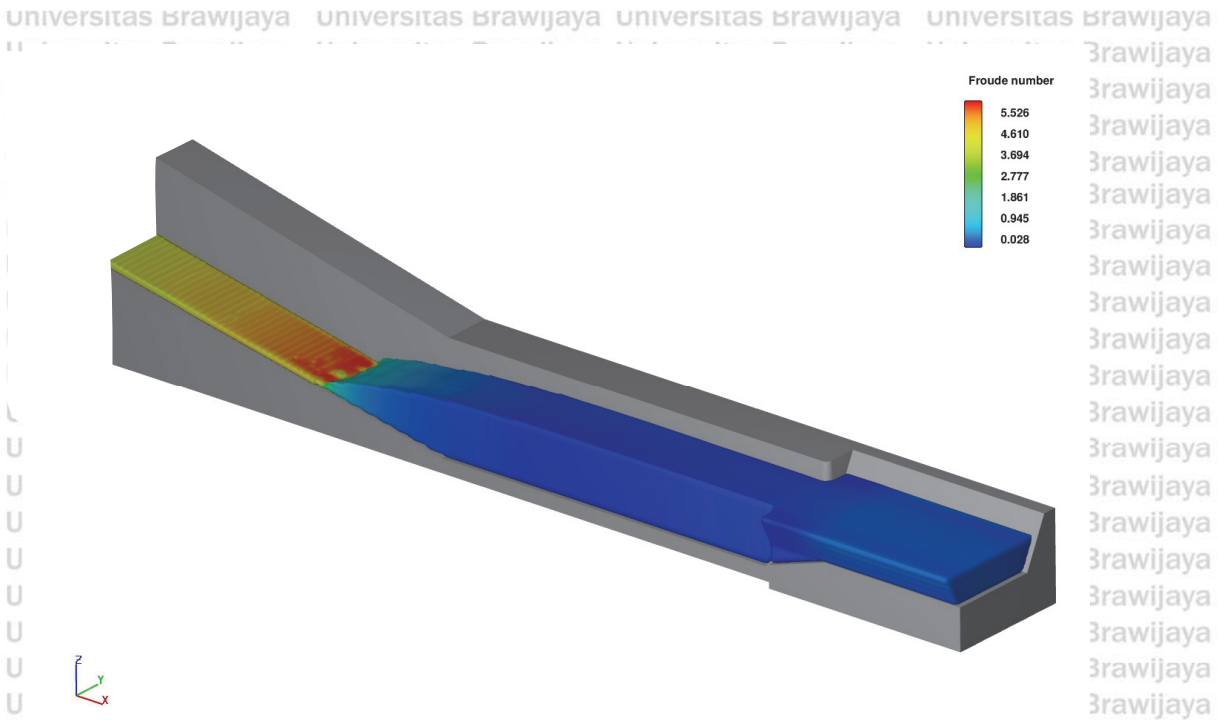
Berikut disajikan hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m, +63 m dan +65 m.



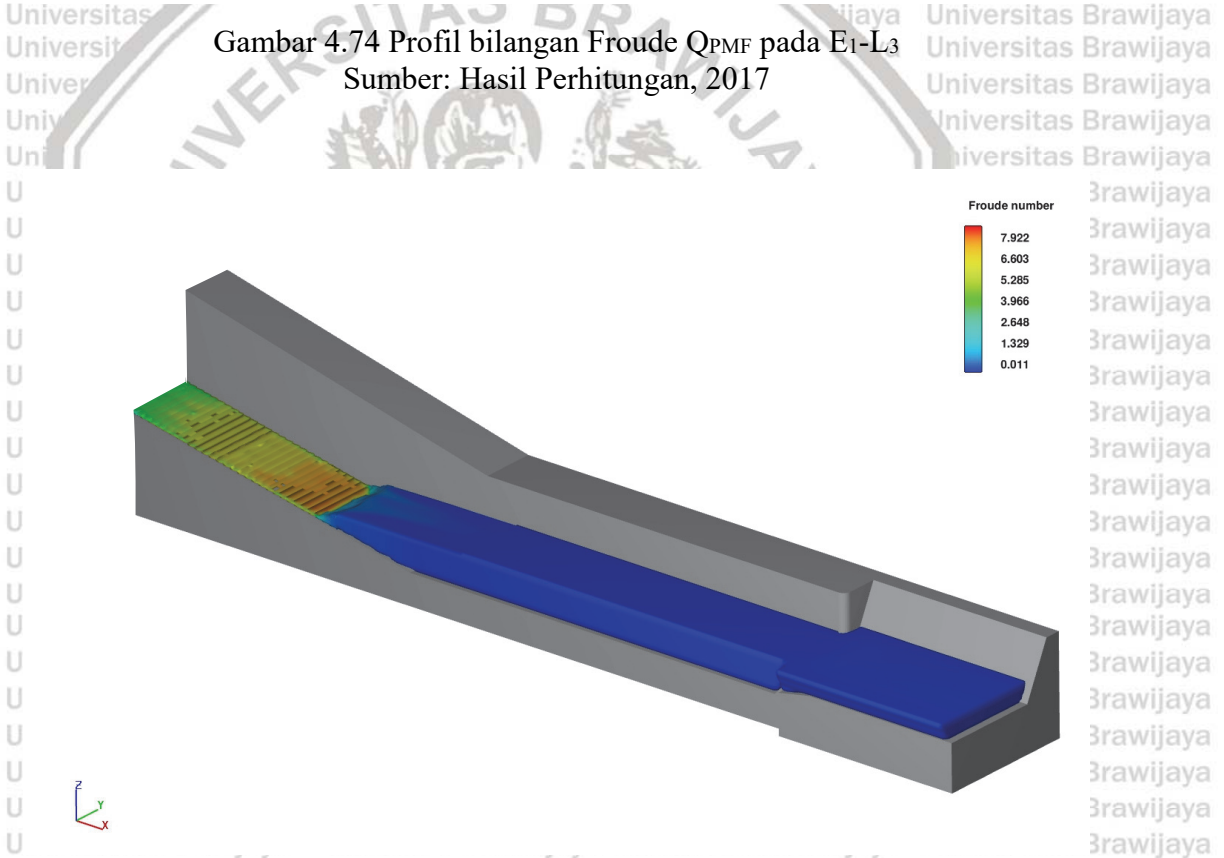
Gambar 4.72 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E1-L₃
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



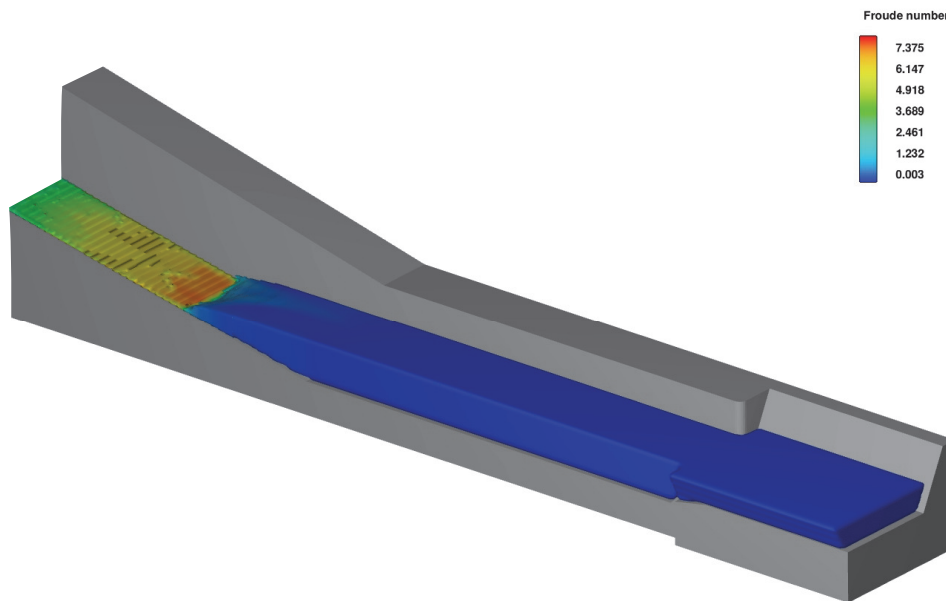
Gambar 4.73 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E1-L₃
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



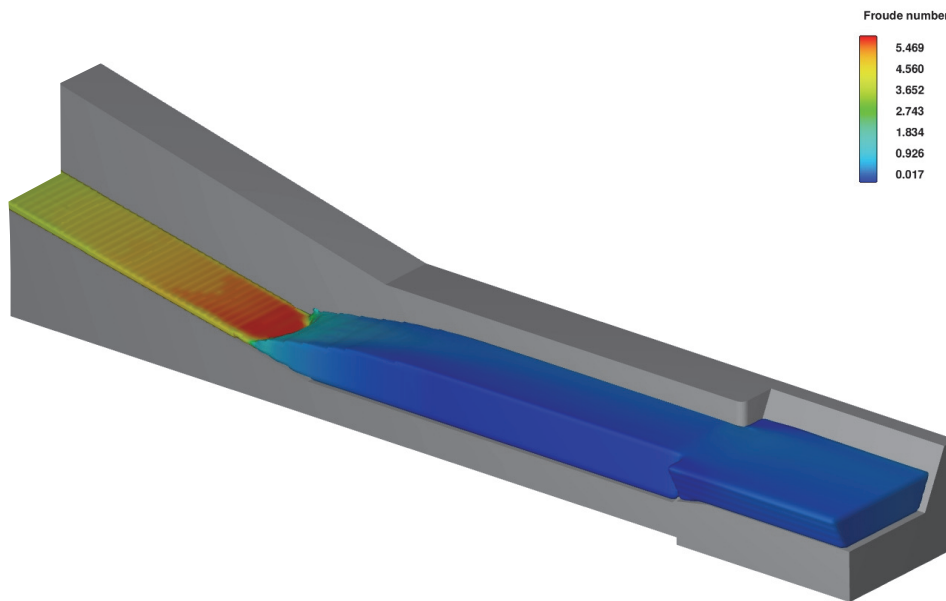
Gambar 4.74 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E1-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.75 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E2-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

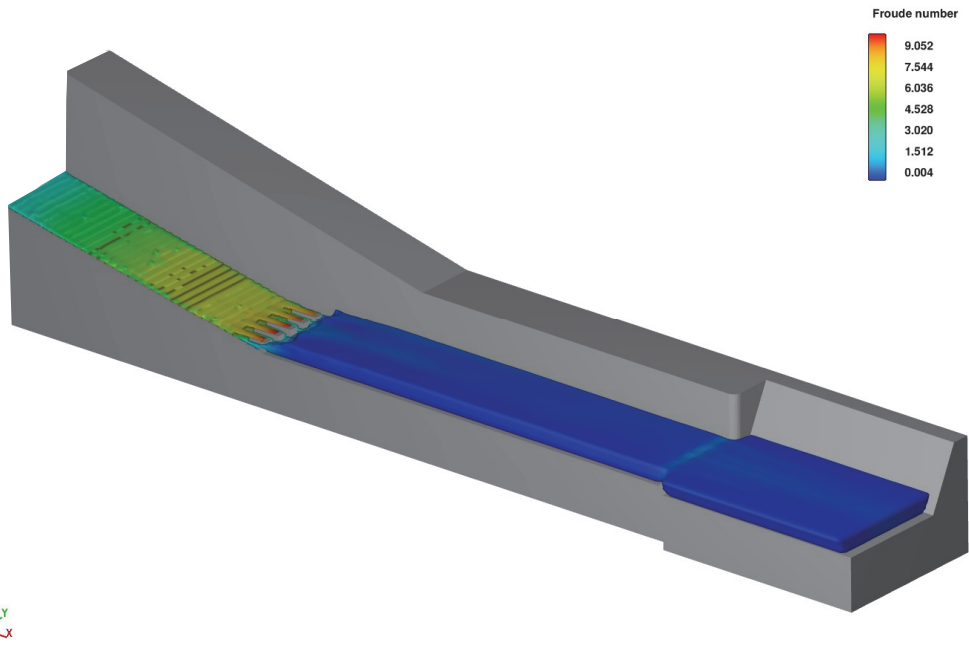


Gambar 4.76 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E2-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

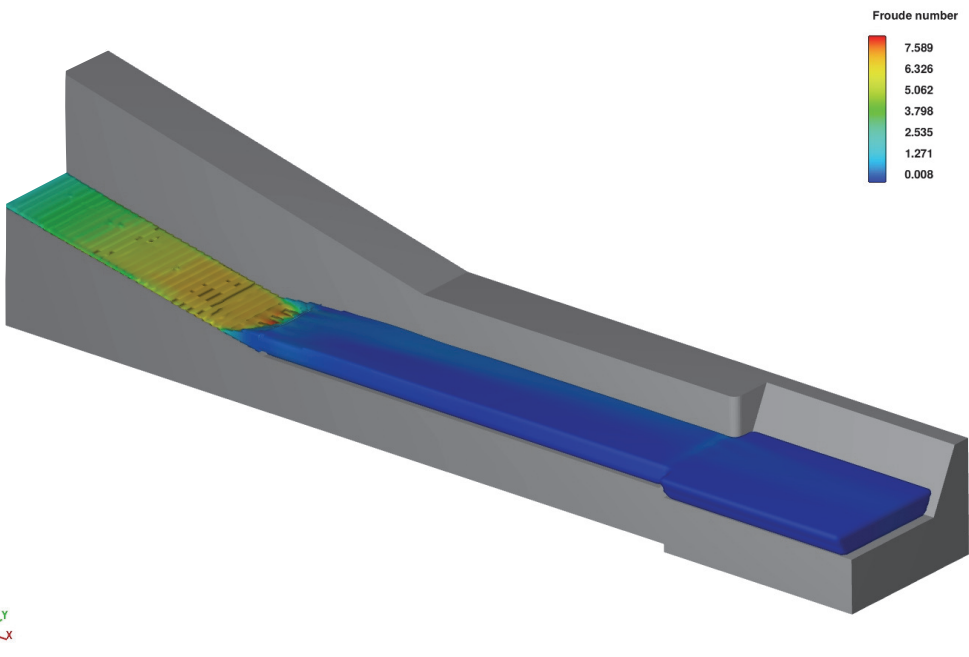


Gambar 4.77 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E2-L3
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

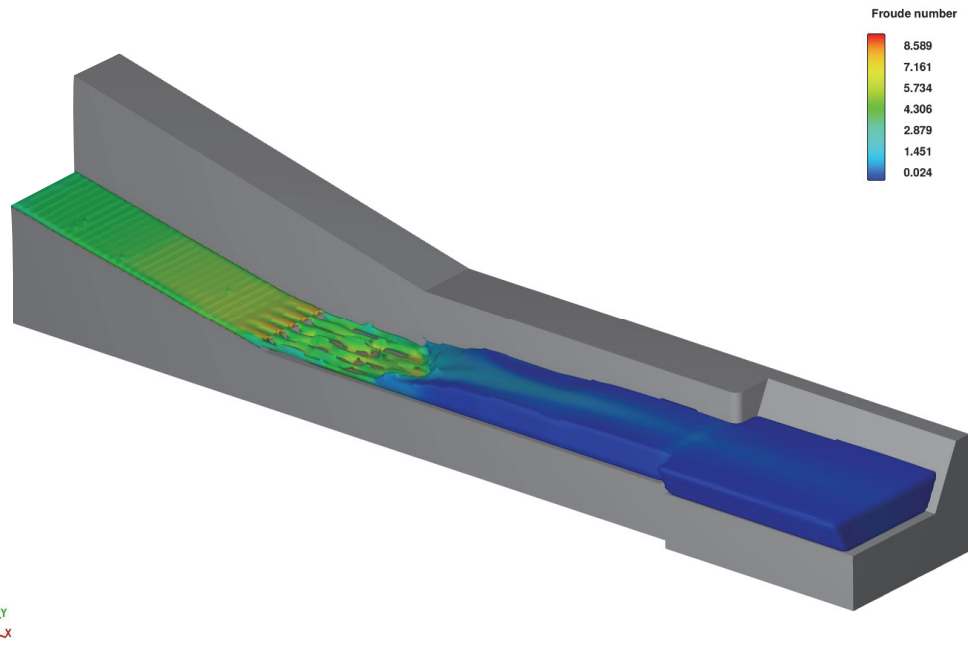




Gambar 4.78 Profil bilangan Froude Q_{100} pada E3-L3
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.79 Profil bilangan Froude Q_{1000} pada E3-L3
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017



Gambar 4.80 Profil bilangan Froude Q_{PMF} pada E_3-L_3
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Secara umum terlihat pada Gambar 4.72 sampai dengan Gambar 4.80 terjadi aliran subkritis di bagian *escape channel* dan berfungsi dengan baik untuk model seri L_3 dengan semua variasi elevasi dasar kolam olakan oleh semua perlakuan debit.

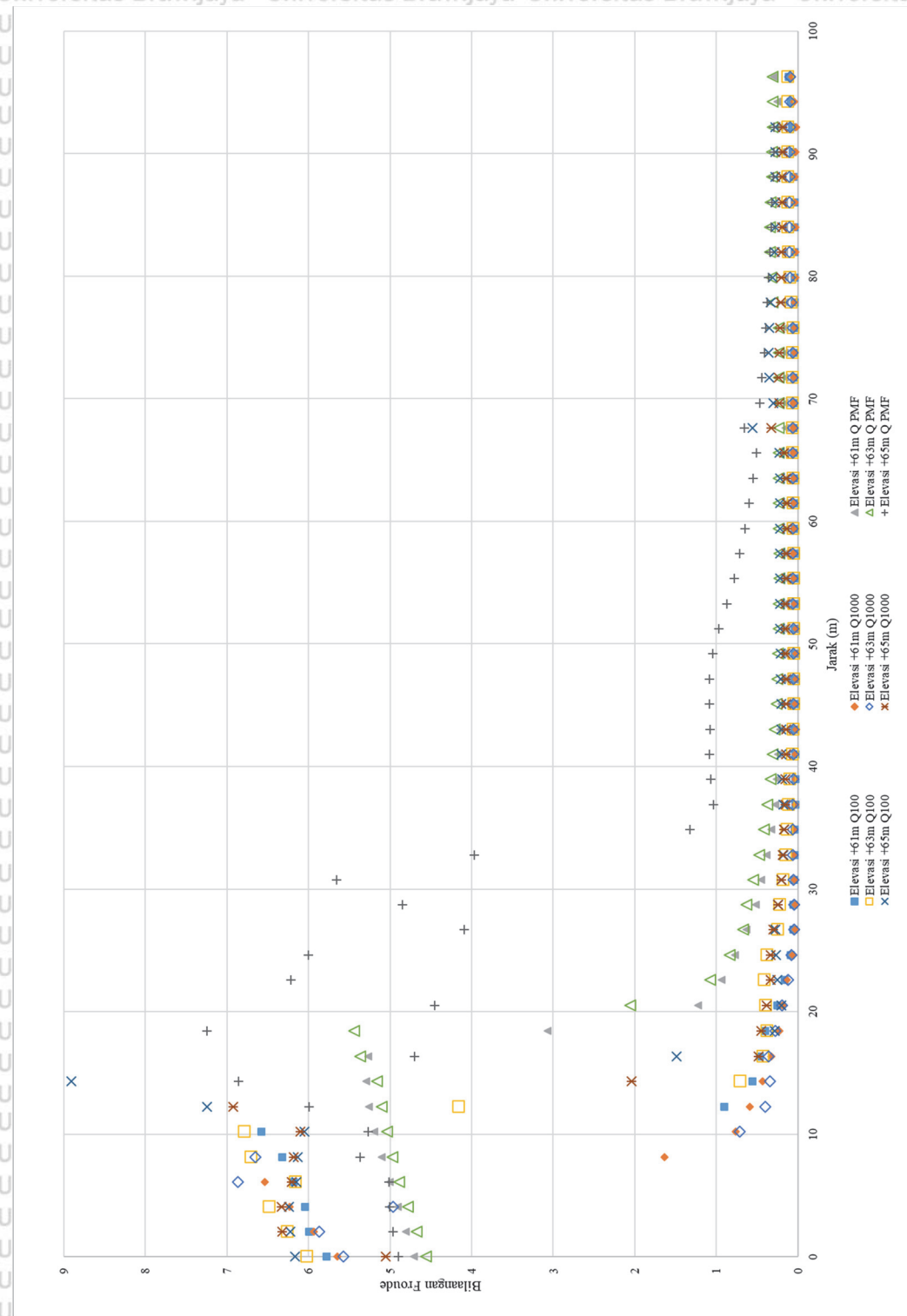
Tabel 4.24 Rekapitulasi hasil nilai bilangan Froude untuk elevasi +61 m,+63 m dan +65 m dengan model panjang kolam olakan 53 m (L₃)

X	Y	Z	Jarak	Bilangan Froud Elevasi +61m (E1)			Bilangan Froud Elevasi +63m (E2)			Bilangan Froud Elevasi +65m (E3)		
				Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀ (21.16 m ³ /det)	Debit Q ₁₀₀₀ (23.03 m ³ /det)	Debit Q _{PMF} (67.06 m ³ /det)
(m)	(m)	(m)	(m)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21.373	12.000	9.400	0.000	5.776	5.643	4.708	6.026	5.573	4.560	6.163	5.054	4.900
23.374	12.000	9.036	2.034	5.992	5.934	4.809	6.267	5.866	4.675	6.223	6.322	4.964
25.376	12.000	8.669	4.069	6.045	6.233	4.908	6.485	4.961	4.784	6.239	6.330	5.007
27.378	12.000	8.298	6.105	6.184	6.533	5.008	6.170	6.868	4.888	6.146	6.208	5.009
29.381	12.000	7.920	8.144	6.324	1.635	5.102	6.705	6.652	4.968	6.131	6.180	5.363
31.386	12.000	7.533	10.186	6.575	0.766	5.194	6.792	0.712	5.037	6.048	6.102	5.270
33.393	12.000	7.134	12.232	0.906	0.593	5.258	4.167	0.398	5.100	7.246	6.925	5.996
35.402	12.000	6.722	14.283	0.556	0.438	5.291	0.712	0.342	5.161	8.911	2.039	6.862
37.415	12.000	6.294	16.340	0.466	0.325	5.271	0.433	0.358	5.367	1.484	0.480	6.697
39.430	12.000	5.848	18.404	0.399	0.228	3.071	0.387	0.277	5.445	0.282	0.448	7.244
41.448	12.000	5.381	20.476	0.252	0.185	1.223	0.400	0.192	2.057	0.201	0.381	4.454
43.471	12.000	4.905	22.554	0.161	0.134	0.936	0.414	0.124	1.073	0.249	0.339	6.216
45.495	12.000	4.478	24.623	0.090	0.067	0.771	0.384	0.081	0.840	0.271	0.337	5.998
47.520	12.000	4.170	26.671	0.058	0.030	0.635	0.255	0.049	0.672	0.275	0.303	4.093
49.545	12.000	4.050	28.699	0.056	0.030	0.518	0.225	0.044	0.628	0.243	0.242	4.847
51.567	12.000	4.177	30.726	0.050	0.037	0.447	0.185	0.054	0.550	0.202	0.207	5.655
53.589	12.000	4.499	32.773	0.041	0.041	0.385	0.155	0.060	0.478	0.179	0.187	3.971
55.612	12.000	4.894	34.834	0.036	0.037	0.327	0.137	0.060	0.420	0.173	0.169	1.323
57.640	12.000	5.249	36.893	0.030	0.030	0.278	0.125	0.060	0.373	0.182	0.156	1.035
59.673	12.000	5.529	38.945	0.032	0.028	0.261	0.107	0.059	0.337	0.195	0.152	1.067
61.710	12.000	5.740	40.993	0.034	0.033	0.242	0.072	0.059	0.309	0.200	0.148	1.088
63.750	12.000	5.890	43.039	0.035	0.023	0.221	0.063	0.058	0.285	0.202	0.145	1.074
65.793	12.000	5.987	45.084	0.036	0.028	0.203	0.057	0.057	0.265	0.205	0.145	1.086
67.838	12.000	6.039	47.130	0.037	0.026	0.188	0.053	0.057	0.251	0.211	0.148	1.086
69.885	12.000	6.055	49.176	0.036	0.022	0.180	0.052	0.059	0.242	0.216	0.154	1.046
71.933	12.000	6.047	51.224	0.037	0.026	0.173	0.053	0.059	0.237	0.220	0.158	0.966
73.981	12.000	6.025	53.272	0.039	0.041	0.167	0.056	0.060	0.234	0.220	0.154	0.870
76.029	12.000	6.001	55.321	0.041	0.045	0.163	0.057	0.061	0.232	0.218	0.148	0.782
78.077	12.000	5.985	57.369	0.041	0.054	0.160	0.058	0.062	0.232	0.217	0.142	0.710
80.124	12.000	5.978	59.416	0.042	0.048	0.157	0.060	0.062	0.232	0.217	0.139	0.648
82.171	12.000	5.979	61.463	0.042	0.046	0.156	0.062	0.061	0.233	0.218	0.141	0.598
84.218	12.000	5.990	63.510	0.043	0.046	0.156	0.066	0.061	0.234	0.221	0.149	0.553
86.265	12.000	6.010	65.557	0.043	0.056	0.156	0.070	0.060	0.234	0.232	0.173	0.511
88.312	12.000	6.036	67.604	0.044	0.051	0.157	0.072	0.060	0.235	0.556	0.330	0.656
90.359	12.000	6.066	69.651	0.044	0.058	0.158	0.072	0.060	0.234	0.300	0.229	0.466
92.406	12.000	6.097	71.699	0.044	0.047	0.161	0.070	0.060	0.234	0.349	0.234	0.442
94.453	12.000	6.125	73.746	0.043	0.038	0.163	0.068	0.060	0.234	0.362	0.226	0.408
96.501	12.000	6.146	75.793	0.043	0.035	0.165	0.065	0.060	0.234	0.354	0.219	0.395
98.548	12.000	6.159	77.841	0.043	0.035	0.166	0.090	0.082	0.308	0.333	0.212	0.379
100.595	12.000	6.162	79.888	0.043	0.033	0.166	0.104	0.092	0.328	0.307	0.206	0.362
102.642	12.000	6.161	81.935	0.042	0.026	0.166	0.122	0.103	0.345	0.288	0.201	0.346
104.689	12.000	6.156	83.982	0.042	0.028	0.167	0.132	0.107	0.346	0.279	0.197	0.330
106.737	12.000	6.151	86.030	0.042	0.039	0.167	0.131	0.105	0.332	0.276	0.194	0.317
108.784	12.000	6.147	88.077	0.054	0.037	0.194	0.131	0.104	0.323	0.277	0.191	0.305
110.831	12.000	6.146	90.124	0.060	0.028	0.207	0.131	0.102	0.317	0.279	0.189	0.296
112.879	12.000	6.146	92.172	0.070	0.020	0.228	0.131	0.100	0.314	0.281	0.187	0.291
114.926	12.000	6.148	94.219	0.087	0.044	0.254	0.132	0.098	0.312			
116.973	12.000	6.150	96.266	0.114	0.071	0.293	0.133	0.097	0.310			

Keterangan :

- = Saluran Peluncur
- = Peredam Energi
- = Escape Channel





Gambar 4.81 Profil Bilangan Froude Pada Panjang Kolang Olakan 53m
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Terlihat dalam Gambar 4.81 semua model seri L3 memberikan hasil aliran sub kritis pada bagian hilir bangunan peredam energi.

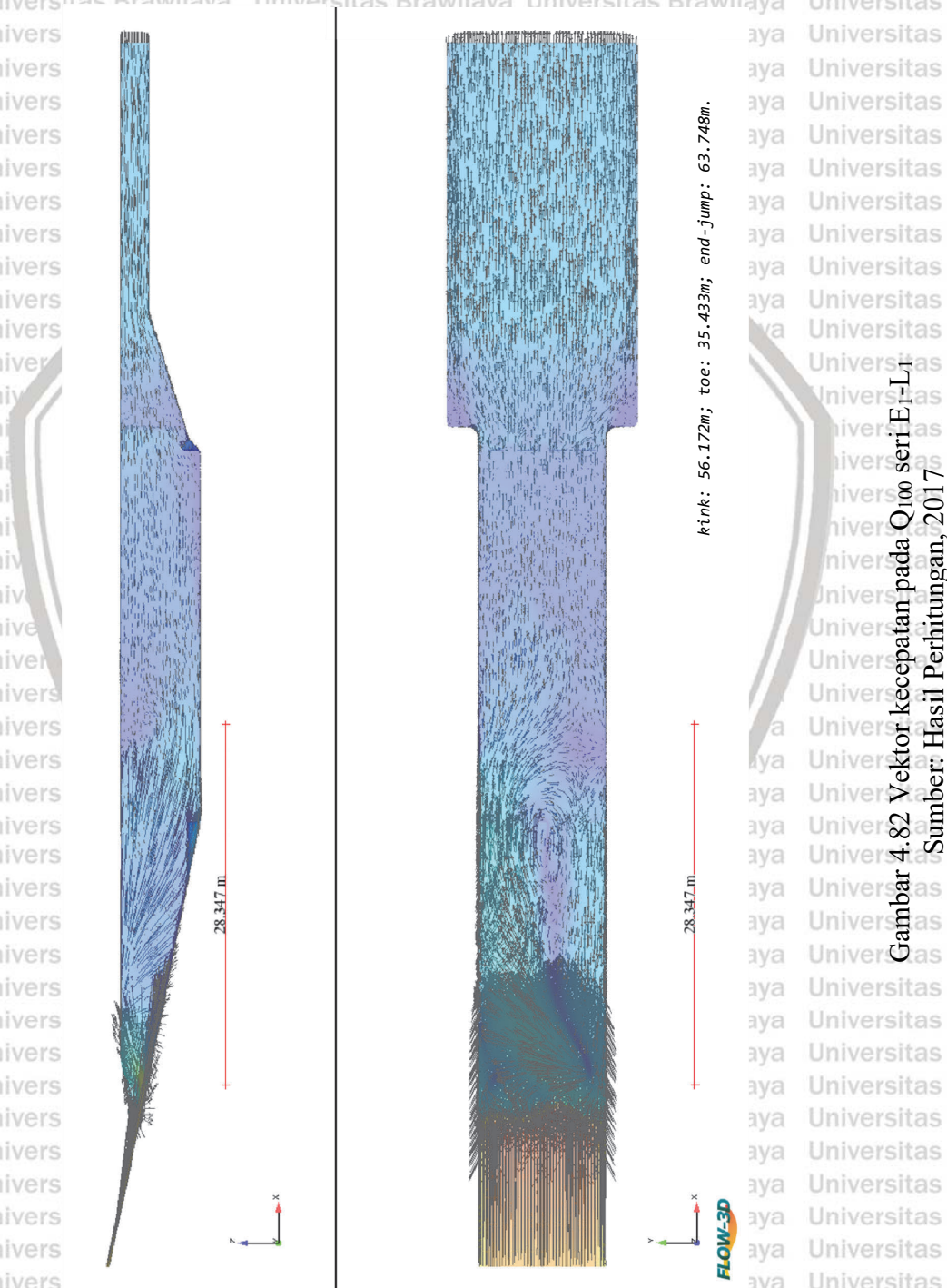
4.5 Penentuan Panjang Loncatan

4.5.1 Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L₁

1. Tinggi elevasi dasar kolam olak +61 m (E₁)

Vektor kecepatan menggambarkan aliran pusaran horisontal yang kuat di lokasi terjadinya loncatan hidrolis. Pola aliran disepanjang kolam olak sedikit menyilang.

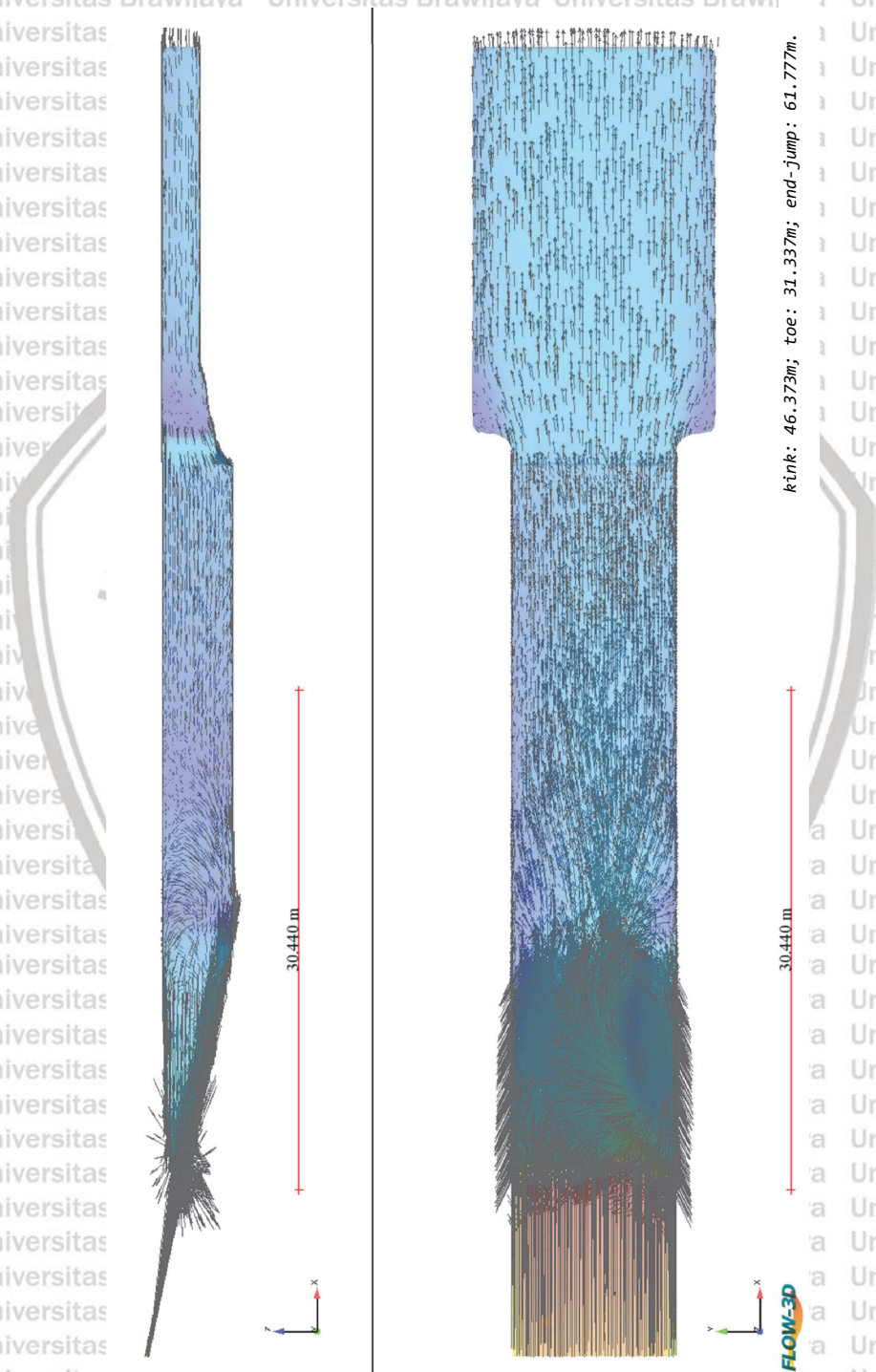
Panjang loncatan hidrolis 28,315 m dengan tipe locatan B.



Gambar 4.82 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₁-L₁
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

2. Tinggi elevasi dasar kolam olak +63 m (E₂)

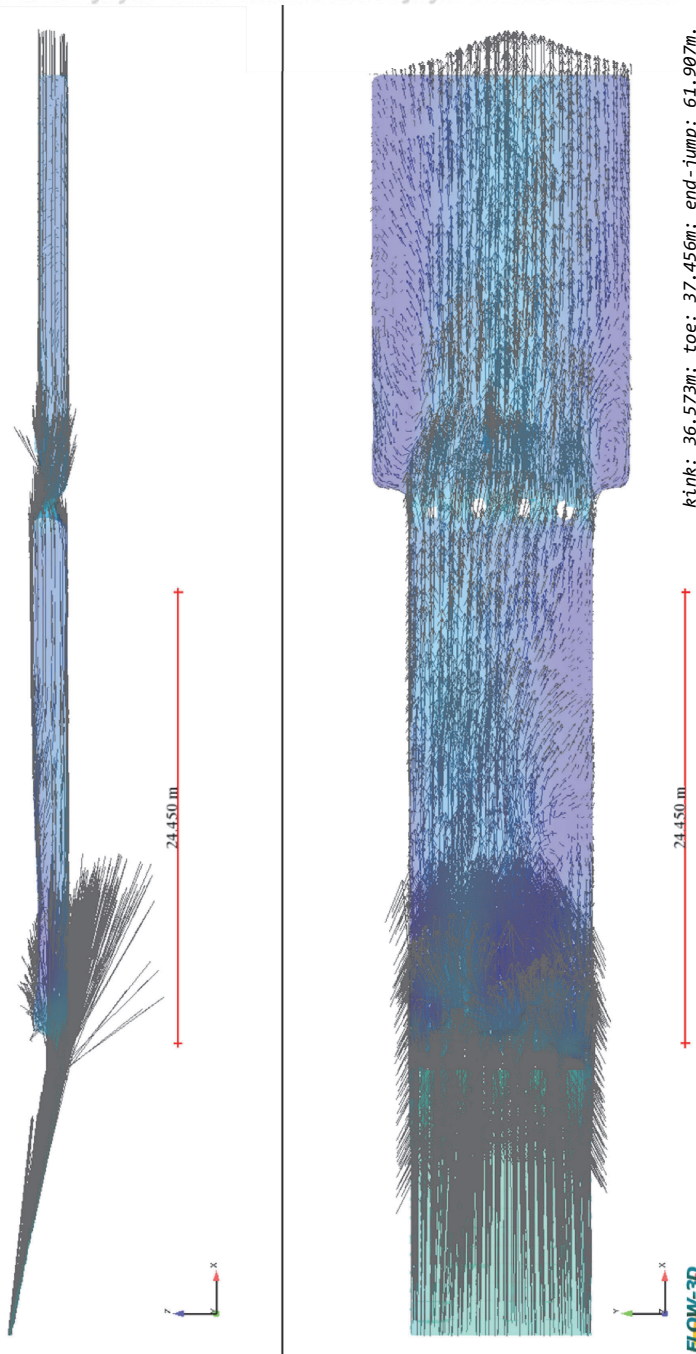
Vektor kecepatan menggambarkan adanya aliran pusaran horisontal yang kuat di lokasi terjadinya loncatan hidrolik diiringi pusaran vertikal yang berakhir di gigi pemencar. Pola aliran disepanjang kolam olak cenderung stabil. Panjang loncatan hidrolik 30,440 m dengan tipe locatan B.



Gambar 4.83 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₂-L₁
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

3. Tinggi elevasi dasar kolam olak +65m (E₃)

Pola aliran disepanjang kolam olak cenderung tidak stabil berlanjut pada *escape channel* yang menunjukkan terjadinya pusaran di bagian sampingnya. Panjang loncatan hidrolis 24,450 m dengan tipe locatan CI.

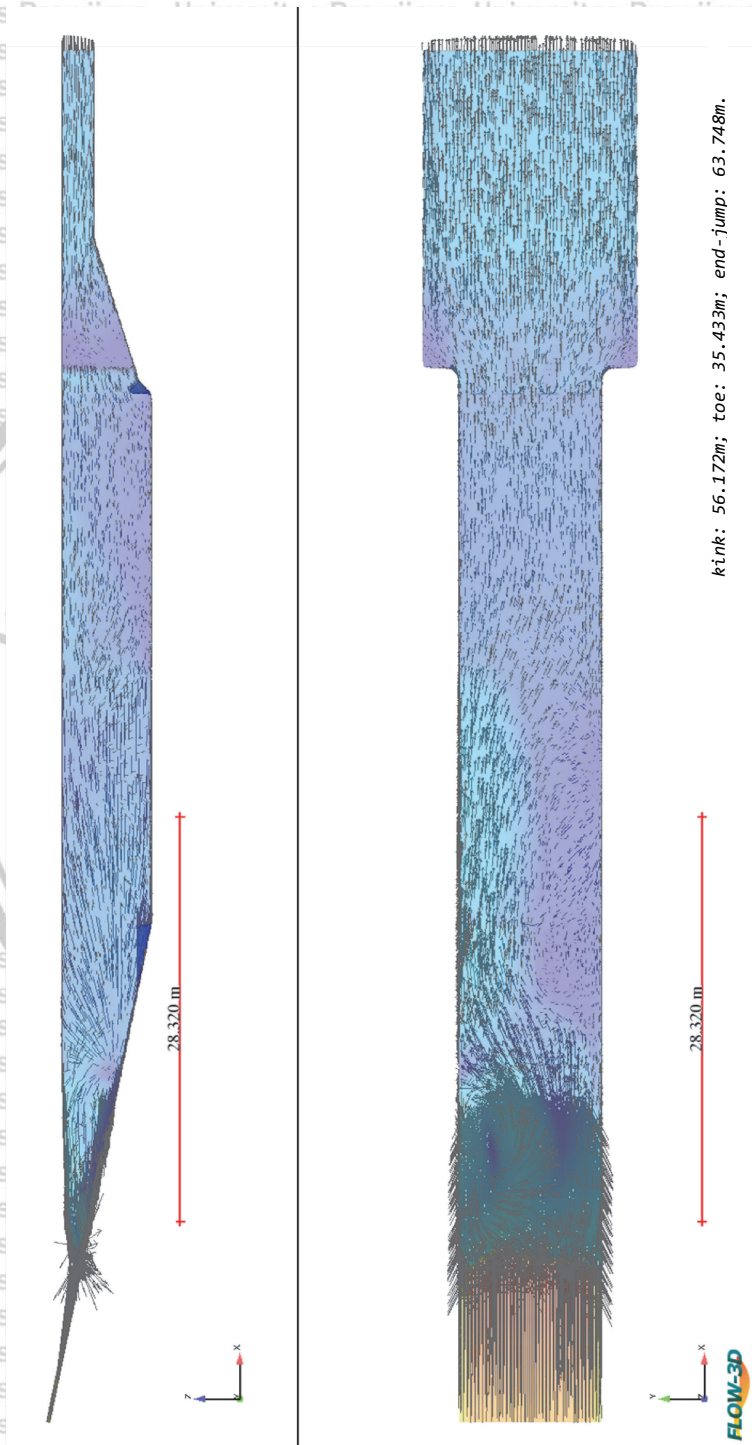


Gambar 4.84 Vektor kecepatan pada Q₁₀₀ seri E₃-L
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.5.2 Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L₂

1. Tinggi elevasi dasar kolam olak +61m (E_i)

Pola aliran disepanjang kolam olak sedikit menyilang kemudian stabil sampai mencapai saluran *escape channel*. Panjang loncatan hidrolis 28,320 m dengan tipe loncatan B.

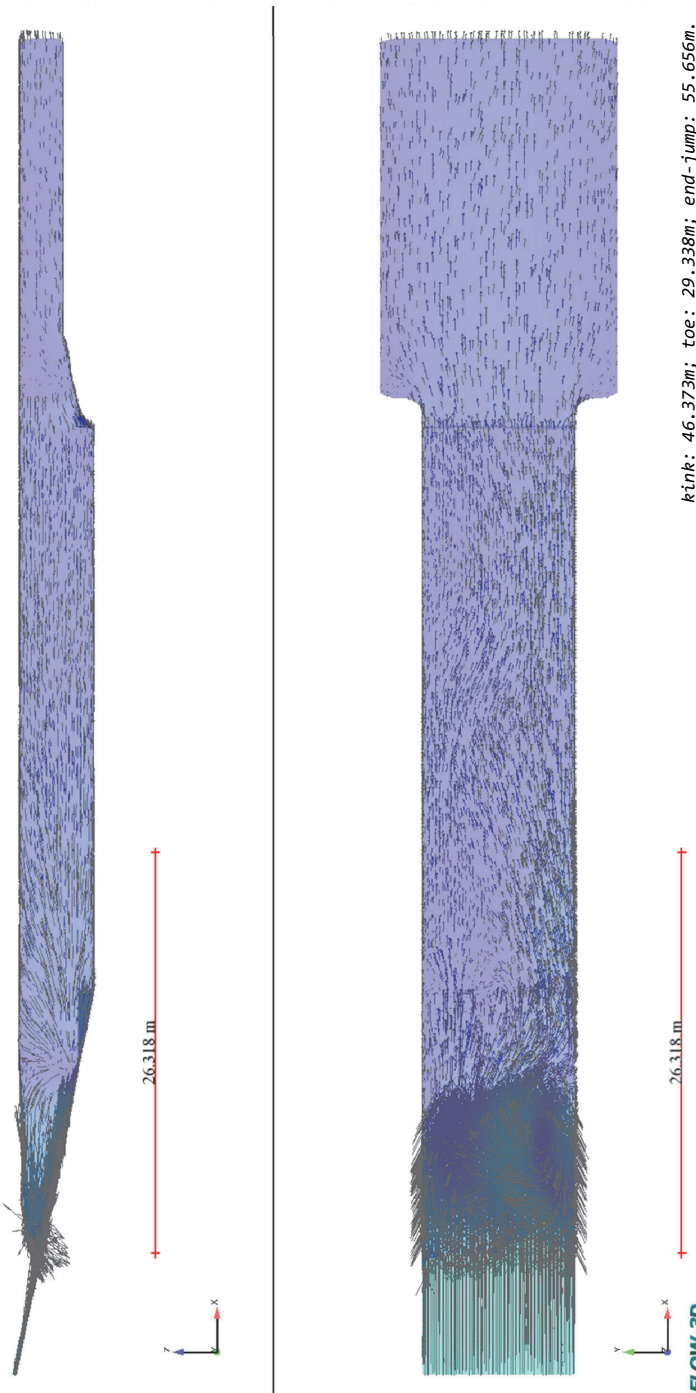


rink: 56.172m; toe: 35.433m; end-jump: 63.748m.

Gambar 4.85 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₁-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

2. Tinggi elevasi dasar kolam olak +63m (E₂)

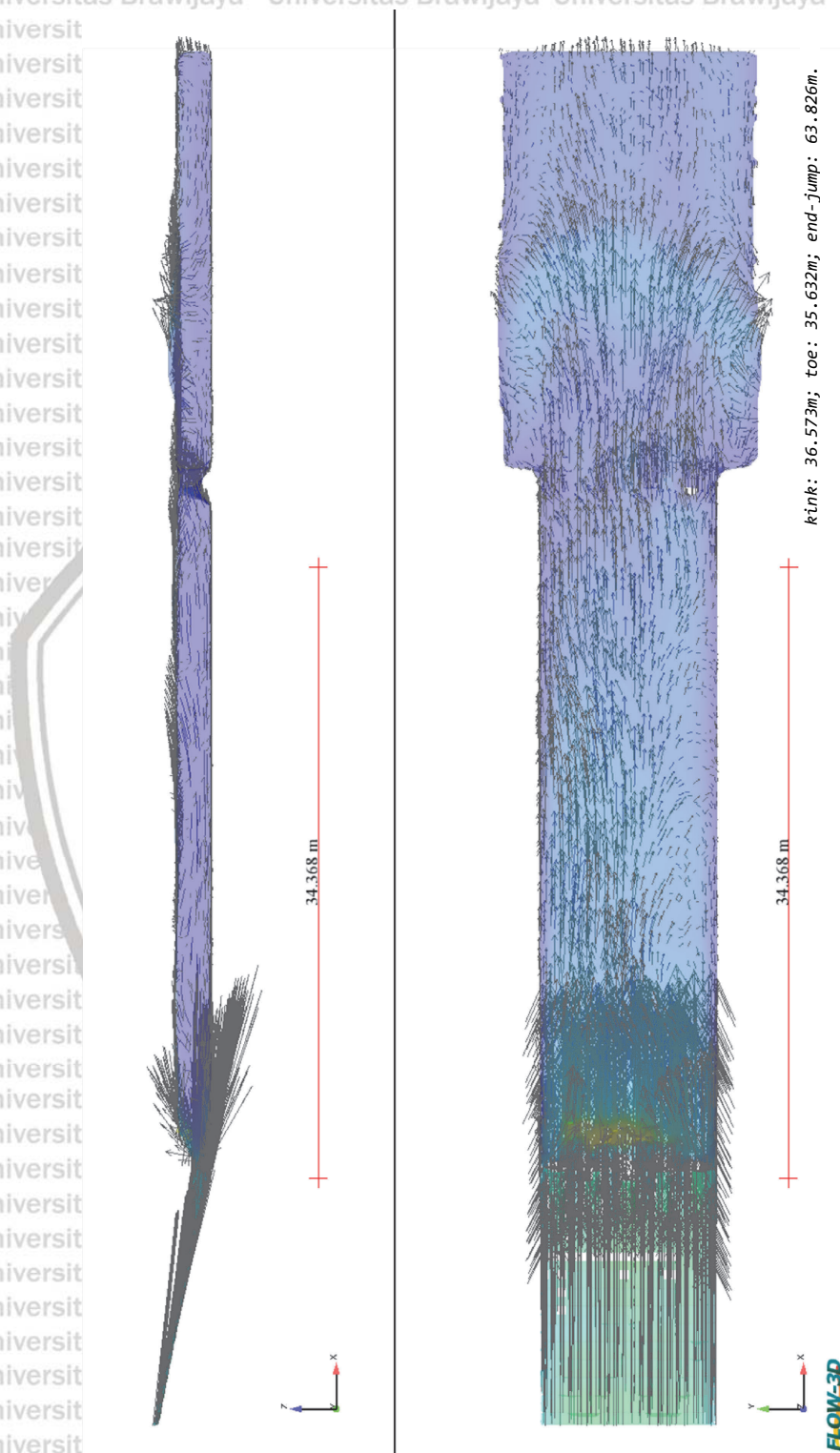
Vektor kecepatan menggambarkan adanya aliran silang disepanjang kolam olak akan tetapi di saluran *escape channel* pola aliran cenderung stabil. Panjang loncatan hidrolik 26,318 m dengan tipe locatan B.



Gambar 4.86 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₂-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

3. Tinggi elevasi dasar kolam olak +65m (E₃)

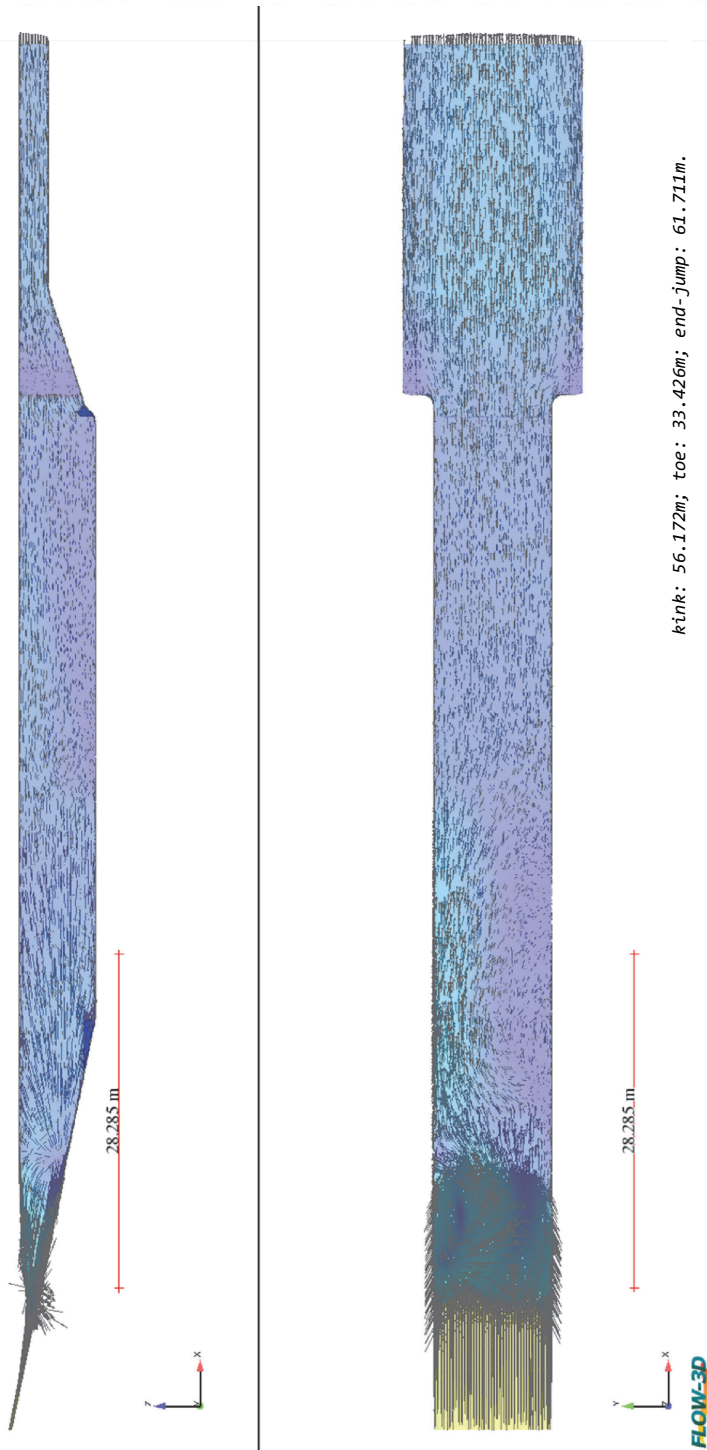
Vektor kecepatan menggambarkan pola aliran yang tidak stabil di saluran *escape channel*. Panjang loncatan hidrolis 34,368 m dengan tipe locatan B



Gambar 4.87 Vektor kecepatan pada Q₁₀₀ seri E₃-L₂
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.5.3 Panjang Loncatan pada Model Numerik seri L₃

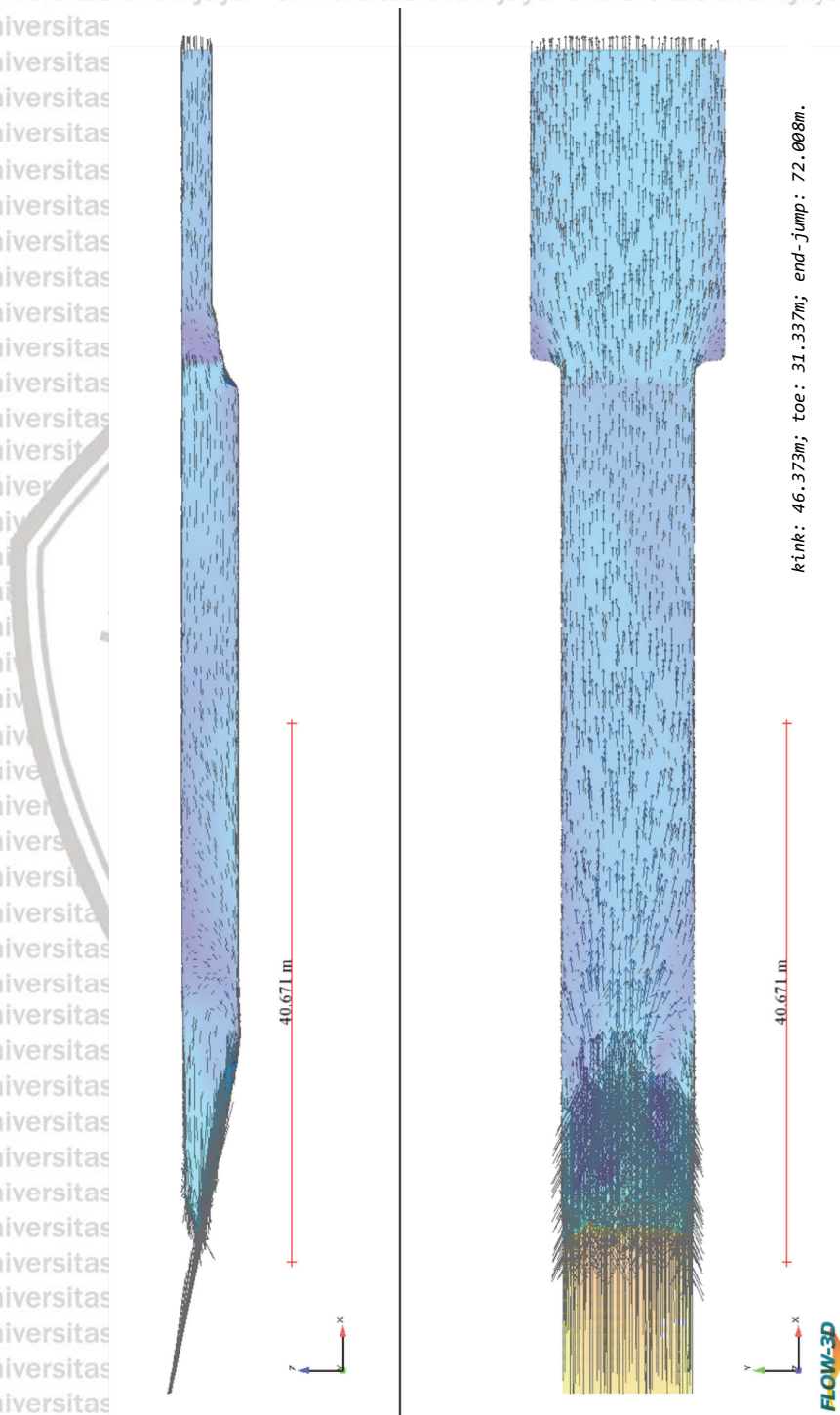
1. Tinggi elevasi dasar kolam olak +61m (E₁)
 Vektor kecepatan menggambarkan pola aliran relatif stabil di sepanjang saluran.
 Panjang loncatan hidrolis 28,285 m dengan tipe locatan B



Gambar 4.88 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₁-L₃
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

2. Tinggi elevasi dasar kolam olak +63m (E₂)

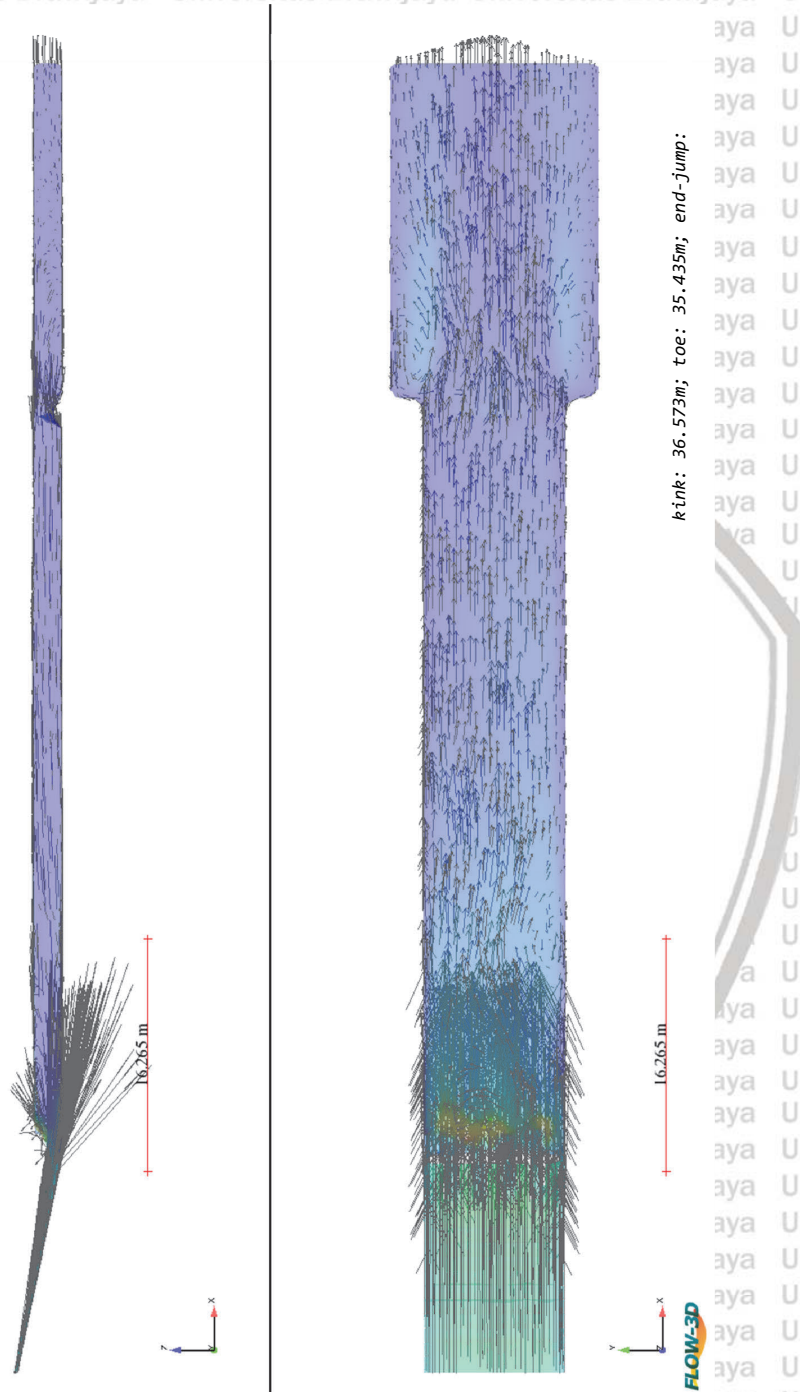
Vektor kecepatan menggambarkan adanya aliran pusaran vertikal yang berakhir di gigi pemencar dan pola aliran disepanjang kolam olak cenderung stabil. Panjang loncatan hidrolik 40,671 m dengan tipe locatan B.



Gambar 4.89 Vektor kecepatan pada Q_{100} seri E₂-L₃
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

3. Tinggi elevasi dasar kolam olak +65m (E₃)

Pola aliran disepanjang kolam olak stabil sampai mencapai saluran *escape channel*. Panjang loncatan hidrolik 16,265 m dengan tipe locatan B.



Gambar 4.90 Vektor kecepatan pada Q₁₀₀ seri E₃-L₃
Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

4.6 Efisiensi Peredam Energi

Perbandingan kehilangan energi akibat loncatan dengan energi awal sebelum mengalami loncatan menggambarkan performa dari peredam energi. Semakin besar nilai prosentasenya maka dapat dikatakan peredam energi semakin baik.

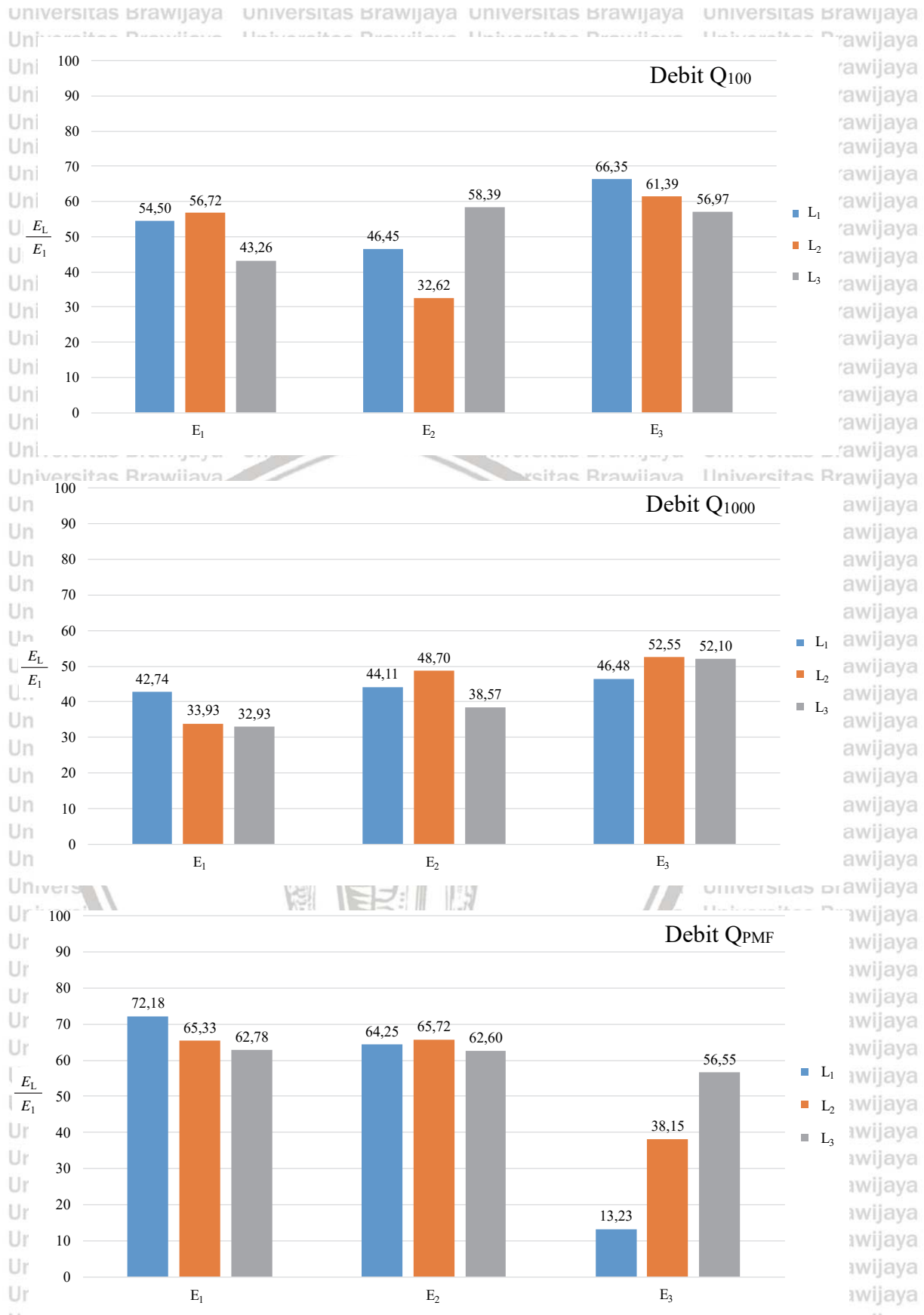
Perhitungan nilai masing masing prosentasenya berdasarkan perlakuan model dan debit, serta besarnya bilangan Froude yang menggambarkan kategori bentuk aliran di lokasi *escape-channel* disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.25 Perbandingan energi yang hilang akibat loncatan dengan energi sebelum loncatan

No.	Notasi	Debit Kala Ulang	Q	D ₁	D ₂	V ₁	V ₂	$E_1 = D_1 + \frac{V_1^2}{2g}$	$E_2 = D_2 + \frac{V_2^2}{2g}$	$E_L = E_1 - E_2$	$\frac{E_L}{E_1}$	F
			m ³ /dt	m	m	m/dt	m/dt	m	m	m	%	
1	Model Fisik	Q ₁₀₀	21,16	0,25	2,04	10,16	0,87	5,513	2,079	3,434	62,30	0,19
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,44	2,77	12,59	0,87	8,522	2,809	5,713	67,04	0,17
		Q _{PMF}	67,06	0,73	3,87	16,34	1,74	14,343	4,024	10,319	71,94	0,28
2	E1-L1	Q ₁₀₀	21,16	0,244	2,247	9,651	0,697	4,993	2,272	2,721	54,50	0,15
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,262	2,899	9,734	0,586	5,093	2,917	2,177	42,74	0,11
		Q _{PMF}	67,06	0,729	4,209	17,266	2,088	15,928	4,432	11,496	72,18	0,32
3	E1-L2	Q ₁₀₀	21,16	0,219	2,134	9,658	0,620	4,975	2,153	2,821	56,72	0,14
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,213	3,485	9,978	0,452	5,290	3,495	1,795	33,93	0,08
		Q _{PMF}	67,06	0,842	4,333	15,542	2,119	13,159	4,562	8,596	65,33	0,33
4	E1-L3	Q ₁₀₀	21,16	0,218	2,784	9,622	0,594	4,938	2,802	2,136	43,26	0,11
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,243	3,632	10,088	0,471	5,432	3,643	1,789	32,93	0,07
		Q _{PMF}	67,06	0,861	4,606	15,373	1,972	12,911	4,805	8,106	62,78	0,29
5	E2-L1	Q ₁₀₀	21,16	0,213	2,578	9,545	0,683	4,858	2,602	2,256	46,45	0,14
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,234	2,969	10,017	0,644	5,350	2,990	2,360	44,11	0,12
		Q _{PMF}	67,06	0,837	4,397	15,545	2,455	13,158	4,704	8,454	64,25	0,37
6	E2-L2	Q ₁₀₀	21,16	0,201	2,940	9,051	0,443	4,378	2,950	1,428	32,62	0,08
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,234	2,792	10,142	0,601	5,479	2,811	2,668	48,70	0,11
		Q _{PMF}	67,06	0,833	4,242	15,532	2,257	13,133	4,502	8,632	65,72	0,35
7	E2-L3	Q ₁₀₀	21,16	0,240	2,389	10,427	0,589	5,784	2,407	3,377	58,39	0,12
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,215	3,229	9,970	0,579	5,283	3,246	2,038	38,57	0,10
		Q _{PMF}	67,06	0,798	4,338	15,012	2,248	12,288	4,596	7,693	62,60	0,34
8	E3-L1	Q ₁₀₀	21,16	0,191	1,636	10,021	1,722	5,312	1,787	3,524	66,35	0,43
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,269	2,934	10,176	0,842	5,549	2,970	2,579	46,48	0,16
		Q _{PMF}	67,06	0,732	2,643	15,235	12,729	12,566	10,903	1,663	13,23	2,50
9	E3-L2	Q ₁₀₀	21,16	0,177	2,036	10,088	0,832	5,365	2,071	3,294	61,39	0,19
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,285	2,709	10,372	0,761	5,770	2,738	3,032	52,55	0,15
		Q _{PMF}	67,06	0,575	0,536	15,321	11,901	12,543	7,758	4,785	38,15	0,40
10	E3-L3	Q ₁₀₀	21,16	0,125	2,098	9,883	1,392	5,106	2,197	2,909	56,97	0,31
		Q ₁₀₀₀	23,03	0,225	2,567	10,146	1,035	5,474	2,622	2,852	52,10	0,21
		Q _{PMF}	67,06	0,376	3,760	13,171	2,201	9,221	4,007	5,214	56,55	0,36

Sumber: Hasil perhitungan, 2017

Semua perlakuan model mempunyai aliran subkritis ($F < 1$) di hilir peredam energi untuk debit rancangan Q₁₀₀, sehingga dapat dikatakan memenuhi kriteria desain. Khusus untuk model E3-L1 terjadi aliran super kritis di hilirnya apabila terjadi debit Q_{PMF}, kejadian tersebut masih di perbolehkan dalam proses desain peredam energi. Kemudian dari tabel tersebut untuk memudahkan mengevaluasi disajikan dalam bentuk grafik-grafik berdasarkan besaran debit kala ulang Q₁₀₀, Q₁₀₀₀, Q_{PMF}, sebagai berikut:



Gambar 4.91 Grafik perbandingan energi yang hilang akibat loncatan dengan energi sebelum loncatan
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2017

Secara umum untuk debit Q_{100} (lihat Gambar 4.91) perubahan elevasi dasar kolam olakan dari E_3 (+61 m) ke E_2 (+63 m) menurunkan kemampuan peredam energi dengan panjang kolam olakan L_1 (31 m) dan L_2 (39 m) dan menunjukkan kemampuan tertinggi saat perlakuan elevasi dasar kolam olakan sebesar E_3 (+65 m). Akan tetapi untuk model dengan panjang kolam olakan L_3 (53 m), tingkat peredaman energi tertinggi saat elevasi dasar kolam olakan E_2 (+63 m) dan menurun sedikit saat elevasi dasar kolam olakan E_3 (+65 m). Nilai terbesar redaman energi diperoleh dari model seri E_3-L_1 sebesar 66,35% dan terendah oleh model E_2-L_2 sebesar 32,62%.

Saat diperiksa dengan debit Q_{1000} hampir semua model mengalami penurunan kemampuan redaman. Model E_2-L_1 mempunyai penurunan kemampuan redaman terkecil sebesar 2,33%, sedangkan penurunan terbesar oleh model E_1-L_2 sebesar 22,79%. Jadi model bangunan pedaman energi yang paling baik kemampuannya adalah model E_2-L_1 (elevasi dasar kolam olakan +63 m dengan panjang kolam olakan 31 m).



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa perhitungan dan pengujian pada model fisik bangunan pelimpah di Bendungan Randugunting dengan skala 1:40 serta dilakukan simulasi dengan model numerik berbasis CFD, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bangunan peredam energi yang direncanakan menggunakan debit Q_{100} mempunyai *trend* profil kecepatan (V), kedalaman aliran (H) dan bilangan Froude (F) yang serupa antara model fisik dan model numerik berbasis CFD. Dari hasil kalibrasi yang didapat diketahui bahwa perbedaan yang signifikan terjadi pada data hasil perhitungan kecepatan dengan debit bangkitan Q_{1000} dengan selisih terkecil sekitar 28,93%, sedangkan hasil perhitungan lainnya memenuhi harapan yaitu selisihnya $< 10\%$. Perilaku aliran di bangunan peredam energi pada model numerik terjadi loncatan hidrolis tipe B, dijelaskan bahwa (*toe*) awal pusaran air terbentuk 20,739 m sebelum titik perubahan dasar saluran (*kink*) yang merupakan titik awal bangunan kolam olak. Panjang loncatan hidrolis diketahui sebesar 28,347m. Efisiensi peredaman energi pada model numerik adalah 54,5% sedangkan hasil perhitungan dari data model fisik adalah 62,3%. Jenis aliran di saluran *escape channel* di kedua model adalah aliran sub kritis, dengan nilai bilangan Froude model numerik sebesar 0,15 dan model fisik sebesar 0,19. Dengan model numerik diketahui juga pola aliran di kolam olak cenderung membentuk pusaran horisontal di permukaan aliran (Gambar 4.82);
2. Alternatif desain bangunan peredam energi yang direkomendasikan berdasarkan analisa model numerik berbasis CFD yaitu: bangunan peredam energi mempunyai elevasi dasar kolam olakan +63 m dengan panjang kolam olakan 31 m. Hasil analisa bangunan tersebut mempunyai perbandingan energi yang hilang akibat loncatan dengan energi sebelum loncatan saat debit Q_{100} adalah 46,45%, debit Q_{1000} adalah 44,11% dan debit Q_{PMF} adalah 64,25%. Di bagian saluran *escape channel* terjadi aliran sub kritis dengan bilangan Froude 0,14 untuk debit Q_{100} ; 0,12 untuk debit Q_{1000} dan 0,37 untuk debit Q_{PMF} . Loncatan hidrolis yang terjadi adalah tipe B dengan panjang loncatan hidrolis 30,440m.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya tentang model numerik turbulen berbasis CFD, disarankan untuk mempelajari secara mendalam tentang penentuan titik awal loncatan hidrolis (*toe*), titik akhir pusaran aliran (*end-roller*) yang terjadi, pengaruh udara yang terjebak (*air entrapment*) dalam aliran serta pengaruh gelembung (*bubble*). Dikarenakan, sampai saat ini belum ada metode numerik yang pasti dalam penentuan variabel-variabel tersebut selain pengamatan visual.



DAFTAR PUSTAKA

- Abrari, L., Talebbeydokhti, N., dan Sahraei, S., 2015, *Investigation of Hydraulic Performance of Piano Shaped Weirs Using Three Dimensional Numerical Modeling*, IJST Transactions of Civil Engineering Vol. 39 No. C2, Iran: Shiraz University.
- Anonim, 2016, *Laporan Hasil Review Desain Bendungan Randugunting*, Tidak dipublikasikan. Malang: Laboratorium Hidrolika Terapan Universitas Brawijaya.
- Babaali H., Shamsai A., Vosoughifar H., 2014, *Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes*, Arab J Sci Eng
- Bayon A., Valero D., García-Bartual R., Vallés-Morán F. J., López-Jiménez P.A., 2016, *Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump*, Elsevier Ltd.
- Chow, Ven Te., 1997, *Hidrolika Saluran Terbuka, terjemahan E.V. Nensi Rosalina*. Jakarta: Erlangga.
- FLOW-3D v11.1.1.3 win64, 2015, *User Manual*, Flow Science, Inc.
- Hagger, Willi H., 1992, *Energy Dissipators And Hydraulic Jump*, Springer-Science+Business Media, B.V.
- Peterka, A. J., 1984, *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, United States Departement of The Interior Bureau of Reclamation.
- Schulz, Harry Edmar, Nóbrega, Juliana Dorn, Simões, André Luiz Andrade, Schulz, Henry, dan Porto, Rodrigo de Melo., 2015, *Hydrodynamics: Concepts and Experiments*, Croatia: InTech.
- Sosrodarsono, Suyono dan Takeda, Kensaku., 1988. *Bendungan Type Urugan*, Jakarta: Erlangga.
- Triatmodjo, Bambang., 1996. *Hidrolika II*, Yogyakarta: Beta Offset.
- Yen, Ben Chie., 1991, *Channel flow resistance: centennial of Manning's formula*, Water Resources Publications.

**DATA PENGUKURAN TINGGI MUKA AIR FINAL DESIGN
PENGUJIAN MODEL FISIK BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA**

Diukur Team Peneliti Tgl 30-Jul-16
Debit (Q) : Q 100th = 21.16 m³/dt IPG = 120.6 : El 91.27 91.27

Keterangan	No. Sec.	Jarak Sec.	Elevasi				Bacaan tinggi Muka Air				El. Prototipe				H _{air} Prototipe			
			Dasar	Kiri	As	Kanan	Kiri	As	Kanan	rerata	Kiri	As	Kanan	rerata				
Waduk			83.00		111.00			95.11		95.11		12.11		12.11				
PELIMPAH	III		91.27	111.05	111.00	111.05	95.09	95.11	95.09	95.10	3.82	3.84	3.82	3.83				
	II	20.0	91.27	111.05	111.00	111.05	95.09	95.11	95.09	95.10	3.82	3.84	3.82	3.83				
	I	4.0	91.27	111.05	111.05	111.10	95.09	95.09	95.07	95.08	3.82	3.82	3.80	3.81				
	0	4.0	94.27	111.50	111.6	111.50	94.91	94.87	94.91	94.90	0.64	0.60	0.64	0.63				
	A	4.0	88.73	120.65	120.65	120.55	91.25	91.25	91.29	91.26	2.52	2.52	2.56	2.53				
SALURAN SAMPING	1		87.57	124.05	124.95	124.75	89.89	89.53	89.61	89.68	2.32	1.96	2.04	2.11				
	2	7.2	87.57	123.85	125.20	124.70	89.97	89.43	89.63	89.68	2.40	1.86	2.06	2.11				
	3	7.2	87.53	123.90	124.50	124.80	89.95	89.71	89.59	89.75	2.42	2.18	2.06	2.22				
SALURAN TRANSISI	4	7.2	87.31	124.75	124.70	124.65	89.61	89.63	89.65	89.63	2.30	2.32	2.34	2.32				
	5	13.6	86.81	124.60	124.60	124.60	89.67	89.67	89.67	89.67	2.86	2.86	2.86	2.86				
	6	10.4	86.49	124.55	124.50	124.60	89.69	89.71	89.67	89.69	3.20	3.22	3.18	3.20				
SALURAN TRANSISI	7	11.2	86.47	124.45	124.50	124.50	89.73	89.71	89.71	89.72	3.26	3.24	3.24	3.25				
	8	10.0	87.33	129.30	129.20	129.10	87.79	87.83	87.87	87.83	0.46	0.50	0.54	0.50				
	9	4.0	86.53	131.40	131.30	131.10	86.95	86.99	87.07	87.00	0.42	0.46	0.54	0.47				
PELUNCUR	10	4.0	85.77	133.50	132.30	133.10	86.11	86.59	86.27	86.32	0.34	0.82	0.50	0.55				
	11	8.8	83.89	138.00	137.80	137.75	84.31	84.39	84.41	84.37	0.42	0.50	0.52	0.48				
	12	20.0	79.91	148.30	148.30	148.30	80.19	80.19	80.19	80.19	0.28	0.28	0.28	0.28				
	13	20.0	75.87	158.35	158.35	158.35	76.17	76.17	76.17	76.17	0.30	0.30	0.30	0.30				
	14	20.0	71.87	168.40	168.40	168.40	72.15	72.15	72.15	72.15	0.28	0.28	0.28	0.28				
	15	20.0	67.87	178.45	178.45	178.50	68.13	68.13	68.11	68.12	0.26	0.26	0.24	0.25				
	16	20.0	63.87	181.00	181.10	181.30	67.11	67.07	66.99	67.06	3.24	3.20	3.12	3.19				
	17	6.8	62.51	180.80	180.75	180.85	67.19	67.21	67.17	67.19	4.68	4.70	4.66	4.68				
	18	8.2	61.00	180.90	180.90	180.95	67.15	67.15	67.13	67.14	6.15	6.15	6.13	6.14				
STILLING BASIN	19	10.0	61.00	180.85	180.80	180.90	67.17	67.19	67.15	67.17	6.17	6.19	6.15	6.17				
	20	10.0	61.00	180.90	180.80	180.85	67.15	67.19	67.17	67.17	6.15	6.19	6.17	6.17				
	21	9.2	61.00	180.80	180.85	180.90	67.19	67.17	67.15	67.17	6.19	6.17	6.15	6.17				
ESCAPE CHANNEL	22	11.6	65.00	181.10	181.20	181.20	67.07	67.03	67.03	67.04	2.07	2.03	2.03	2.04				
	23	10.0	65.00	181.00	181.10	181.10	67.11	67.07	67.07	67.08	2.11	2.07	2.07	2.08				
	24	10.0	65.00	181.20	181.15	181.20	67.03	67.05	67.03	67.04	2.03	2.05	2.03	2.04				
	25	10.0	65.00	181.10	181.10	181.10	67.07	67.07	67.07	67.07	2.07	2.07	2.07	2.07				
	26	20.0	65.00	181.00	181.00	181.00	67.11	67.11	67.11	67.11	2.11	2.11	2.11	2.11				
	27	20.0	65.00	181.10	181.10	181.10	67.07	67.07	67.07	67.07	2.07	2.07	2.07	2.07				
	28	40.0	65.00	181.3	181.2	181.20	66.99	67.03	67.03	67.0167	1.99	2.03	2.03	2.02				
	29	40.0	65.00	181.4	181.45	181.4	66.95	66.93	66.95	66.9433	1.95	1.93	1.95	1.94				
BACKWATER			65.00	181.3	181.3	181.3	66.99	66.99	66.99	66.99	1.99		1.99					

**DATA PENGUKURAN TINGGI MUKA AIR FINAL DESIGN
PENGUJIAN MODEL FISIK BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA**

Diukur : Team Peneliti Tgl 1-Jul-16
 Debit (Q) : Q 1000 th = 23.03 m³/dt IPG = 121 : El. 91.27 91.27

Keterangan	No. Sec.	Jarak Sec.	Elevasi	Bacaan tinggi Muka Air			El. Prototipe				H _{air} Prototipe			
			Dasar	Kiri	As	Kanan	Kiri	As	Kanan	rerata	Kiri	As	Kanan	rerata
Waduk			83.00		110.95			95.29		95.29		12.29		12.29
PELIMPAH	III		91.27	110.80	110.80	110.80	95.35	95.35	95.35	95.35	4.08	4.08	4.08	4.08
	II	20.0	91.27	110.80	110.80	110.80	95.35	95.35	95.35	95.35	4.08	4.08	4.08	4.08
	I	4.0	91.27	110.80	110.80	110.75	95.35	95.35	95.37	95.36	4.08	4.08	4.10	4.09
	0	4.0	94.27	111.90	111.90	111.90	94.91	94.91	94.91	94.91	0.64	0.64	0.64	0.64
	A	4.0	88.73	120.60	120.50	120.50	91.43	91.47	91.47	91.46	2.70	2.74	2.74	2.73
SALURAN SAMPING	1		87.57	122.90	125.00	124.70	90.51	89.67	89.79	89.99	2.94	2.10	2.22	2.42
	2	7.2	87.57	123.80	125.00	124.40	90.15	89.67	89.91	89.91	2.58	2.10	2.34	2.34
	3	7.2	87.53	123.75	124.55	124.65	90.17	89.85	89.81	89.94	2.64	2.32	2.28	2.41
SALURAN TRANSISI	4	7.2	87.31	124.40	124.40	124.40	89.91	89.91	89.91	89.91	2.60	2.60	2.60	2.60
	5	13.6	86.81	124.40	124.45	124.50	89.91	89.89	89.87	89.89	3.10	3.08	3.06	3.08
	6	10.4	86.49	124.40	124.30	124.30	89.91	89.95	89.95	89.94	3.42	3.46	3.46	3.45
SALURAN TRANSISI	7	11.2	86.47	124.20	124.30	124.35	89.99	89.95	89.93	89.96	3.52	3.48	3.46	3.49
	8	10.0	87.33	129.20	129.20	128.90	87.99	87.99	88.11	88.03	0.66	0.66	0.78	0.70
	9	4.0	86.53	131.20	131.30	131.10	87.19	87.15	87.23	87.19	0.66	0.62	0.70	0.66
PELUNCUR	10	4.0	85.77	133.40	133.10	133.00	86.31	86.43	86.47	86.40	0.54	0.66	0.70	0.63
	11	8.8	83.89	137.90	137.80	137.70	84.51	84.55	84.59	84.55	0.62	0.66	0.70	0.66
	12	20.0	79.91	148.20	148.10	148.15	80.39	80.43	80.41	80.41	0.48	0.52	0.50	0.50
	13	20.0	75.87	158.35	158.35	158.35	76.33	76.33	76.33	76.33	0.46	0.46	0.46	0.46
	14	20.0	71.87	168.30	168.45	168.45	72.35	72.29	72.29	72.31	0.48	0.42	0.42	0.44
	15	20.0	67.87	178.30	178.30	178.30	68.35	68.35	68.35	68.35	0.48	0.48	0.48	0.48
	16	20.0	63.87	179.60	179.80	179.90	67.83	67.75	67.71	67.76	3.96	3.88	3.84	3.89
	17	6.8	62.51	179.70	179.70	180.00	67.79	67.79	67.67	67.75	5.28	5.28	5.16	5.24
	18	8.2	61.00	179.80	179.80	179.90	67.75	67.75	67.71	67.74	6.75	6.75	6.71	6.74
STILLING BASIN	19	10.0	61.00	179.65	179.75	179.75	67.81	67.77	67.77	67.78	6.81	6.77	6.77	6.78
	20	10.0	61.00	179.70	179.65	179.65	67.79	67.81	67.81	67.80	6.79	6.81	6.81	6.80
	21	9.2	61.00	179.60	179.65	179.75	67.83	67.81	67.77	67.80	6.83	6.81	6.77	6.80
ESCAPE CHANNEL	22	11.6	65.00	179.75	179.75	179.75	67.77	67.77	67.77	67.77	2.77	2.77	2.77	2.77
	23	10.0	65.00	180.00	180.00	180.00	67.67	67.67	67.67	67.67	2.67	2.67	2.67	2.67
	24	10.0	65.00	180.20	180.20	180.20	67.59	67.59	67.59	67.59	2.59	2.59	2.59	2.59
	25	10.0	65.00	180.20	180.20	180.20	67.59	67.59	67.59	67.59	2.59	2.59	2.59	2.59
	26	20.0	65.00	180.00	180.00	180.00	67.67	67.67	67.67	67.67	2.67	2.67	2.67	2.67
	27	20.0	65.00	180.00	180.00	180.00	67.67	67.67	67.67	67.67	2.67	2.67	2.67	2.67
	28	40.00	65.00	180.00	180.00	180.00	67.67	67.67	67.67	67.67	2.67	2.67	2.67	2.67
	29	40.00	65.00	180.20	180.20	180.20	67.59	67.59	67.59	67.59	2.59	2.59	2.59	2.59
BACKWATER			65.00	180.10	180.10	180.10	67.63	67.63	67.63	67.63	2.63	2.63	2.63	2.63

**DATA PENGUKURAN TINGGI MUKA AIR FINAL DESIGN
PENGUJIAN MODEL FISIK BENDUNGAN RANDUGUNTING
KABUPATEN BLORA**

Diukur : Team Peneliti Tgl 1-Jul-16
Debit (Q) : Q PMF = 67.06 m³/dt IPG = 121 : EL 91.27 91.27

Keterangan	No. Sec.	Jarak Sec.	Elevasi Dasar	Bacaan tinggi Muka Air			El Prototipe				H _{air} Prototipe			
				Kiri	As	Kanan	Kiri	As	Kanan	rerata	Kiri	As	Kanan	rerata
Waduk			83.00		109.40			95.91		95.91		12.91		12.91
PELIMPAH	III		91.27	107.15	109.40	107.15	96.81	95.91	96.81	96.51	5.54	4.64	5.54	5.24
	II	20.0	91.27	107.40	109.40	107.25	96.71	95.91	96.77	96.46	5.44	4.64	5.50	5.19
	I	4.0	91.27	107.50	109.40	107.40	96.67	95.91	96.71	96.43	5.40	4.64	5.44	5.16
	0	4.0	94.27	110.25	110.20	110.20	95.57	95.59	95.59	95.58	1.30	1.32	1.32	1.31
	A	4.0	88.73	119.80	119.80	119.70	91.75	91.75	91.79	91.76	3.02	3.02	3.06	3.03
SALURAN SAMPING	1		87.57	117.30	122.80	122.55	92.75	90.55	90.65	91.32	5.18	2.98	3.08	3.75
	2	7.2	87.57	118.80	122.15	121.90	92.15	90.81	90.91	91.29	4.58	3.24	3.34	3.72
	3	7.2	87.53	119.40	122.25	121.75	91.91	90.77	90.97	91.22	4.38	3.24	3.44	3.69
SALURAN TRANSISI	4	7.2	87.31	122.10	121.90	121.80	90.83	90.91	90.95	90.90	3.52	3.60	3.64	3.59
	5	13.6	86.81	121.50	121.65	121.65	91.07	91.01	91.01	91.03	4.26	4.20	4.20	4.22
	6	10.4	86.49	121.70	121.60	121.60	90.99	91.03	91.03	91.02	4.50	4.54	4.54	4.53
SALURAN TRANSISI	7	11.2	86.47	121.65	121.65	121.75	91.01	91.01	90.97	91.00	4.54	4.54	4.50	4.53
	8	10.0	87.33	127.50	127.60	127.70	88.67	88.63	88.59	88.63	1.34	1.30	1.26	1.30
	9	4.0	86.53	129.90	130.00	130.00	87.71	87.67	87.67	87.68	1.18	1.14	1.14	1.15
PELUNCUR	10	4.0	85.77	131.90	132.10	132.10	86.91	86.83	86.83	86.86	1.14	1.06	1.06	1.09
	11	8.8	83.89	136.80	136.80	136.80	84.95	84.95	84.95	84.95	1.06	1.06	1.06	1.06
	12	20.0	79.91	147.40	147.40	147.50	80.71	80.71	80.67	80.70	0.80	0.80	0.76	0.79
	13	20.0	75.87	157.60	157.65	157.60	76.63	76.61	76.63	76.62	0.76	0.74	0.76	0.75
	14	20.0	71.87	167.65	167.65	167.75	72.61	72.61	72.57	72.60	0.74	0.74	0.70	0.73
	15	20.0	67.87	177.80	177.70	177.70	68.55	68.59	68.59	68.58	0.68	0.72	0.72	0.71
	16	20.0	63.87	179.60	179.65	179.85	67.83	67.81	67.73	67.79	3.96	3.94	3.86	3.92
	17	6.8	62.51	178.40	178.50	178.55	68.31	68.27	68.25	68.28	5.80	5.76	5.74	5.77
	18	8.2	61.00	176.60	176.60	176.70	69.03	69.03	68.99	69.02	8.03	8.03	7.99	8.02
STILLING BASIN	19	10.0	61.00	176.70	176.80	176.80	68.99	68.95	68.95	68.96	7.99	7.95	7.95	7.96
	20	10.0	61.00	176.85	176.80	176.90	68.93	68.95	68.91	68.93	7.93	7.95	7.91	7.93
	21	9.2	61.00	176.70	176.70	176.70	68.99	68.99	68.99	68.99	7.99	7.99	7.99	7.99
ESCAPE CHANNEL	22	11.6	65.00	177.00	177.00	177.00	68.87	68.87	68.87	68.87	3.87	3.87	3.87	3.87
	23	10.0	65.00	176.90	176.90	176.90	68.91	68.91	68.91	68.91	3.91	3.91	3.91	3.91
	24	10.0	65.00	176.90	176.90	176.90	68.91	68.91	68.91	68.91	3.91	3.91	3.91	3.91
	25	10.0	65.00	176.90	176.90	176.90	68.91	68.91	68.91	68.91	3.91	3.91	3.91	3.91
	26	20.0	65.00	177.00	177.00	177.00	68.87	68.87	68.87	68.87	3.87	3.87	3.87	3.87
	27	20.0	65.00	177.10	177.10	177.10	68.83	68.83	68.83	68.83	3.83	3.83	3.83	3.83
	28	40	65.00	177.00	177	177.00	68.87	68.87	68.87	68.87	3.87	3.87	3.87	3.87
	29	40	65.00	177.90	177.9	177.90	68.51	68.51	68.51	68.51	3.51	3.51	3.51	3.51
BACKWATER			65.00	177.30	177.3	177.30	68.75	68.75	68.75	68.75	3.75	3.75	3.75	3.75

