

TINJAUAN ENERGI SPESIFIK AKIBAT PENYEMPITAN PADA SALURAN TERBUKA

Jhonson A. Harianja¹⁾, Stefanus Gunawan²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

²⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM Yogyakarta

Abstract

Open channel configuration is found in man-made water conduits such as irrigation channels and trenches as well as naturally occurring water conduits such as rivers. The narrowing of open channel conduits due to various reasons leads to the transformation of the cross-sectional area of the channel from prismatic to non-prismatic, causing a flow pattern which is more difficult to analyze than that in a prismatic section.

In order to observe the effect of reduced cross-section on the specific energy of a flow, a physical model of an open conduit with reduced cross-section has been made in the laboratory of Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta. The channel was 26.5 cm wide. In one experiment, the width was reduced to 16 cm at a point along the channel and water was passed at a discharge rate of $5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$. Measurements were carried out on the height of the flow at the reduced section as well as the rate of discharge, from which the Froude number was determined to identify the flow type.

From the same measurement the specific energy parameter was also determined. Measurements were also made for flow at discharge rate of $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ and $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$, respectively. The same experiment was conducted with reduced cross-section of 10 cm and 5 cm.

Keywords : specific energy , open channel

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saluran terbuka adalah saluran jika permukaan air yang mengalir berada pada kondisi bebas. Saluran terbuka dapat dibedakan dua jenis, yaitu buatan dan alami. Saluran terbuka yang dijumpai baik pada saluran irigasi teknis, semi teknis, dan saluran alami banyak yang berada pada kondisi non-prismatis. Pada saluran yang mempunyai bentuk saluran yang non prismatis aliran air mengalami perubahan seperti ketinggian, kecepatan, dan perilaku aliran lainnya. Beberapa penyebab terjadinya penampang saluran yang tidak prismatis misalnya akibat sambungan dua penampang yang berbeda, adanya bangunan lain seperti pilar jembatan, atau penyebab lain yang mengubah penampang dari saluran.

Analisis aliran pada saluran non-prismatis menuntut ketelitian akibat adanya perubahan karakteristik aliran air. Salah satu contoh adalah

penyempitan saluran yang akan menyebabkan ketinggian, kecepatan dan energi pada aliran berubah. Perubahan energi aliran tersebut akan berpengaruh pada kelancaran aliran dalam saluran yang pada gilirannya dapat terganggunya distribusi air yang dapat merugikan. Kenyataan ini perlu mendapat perhatian, sehingga pembahasan aliran yang terjadi pada kasus penyempitan saluran dalam tulisan ini mencoba mengurai permasalahan tersebut melalui pengukuran dan pengujian pada saluran terbuka dengan adanya penyempitan.

B. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku aliran pada penyempitan saluran, khususnya perilaku aliran yang menyangkut perubahan energi spesifik yang terjadi akibat penyempitan pada saluran..

Manfaat secara teoritis dari penelitian ini adalah untuk pengembangan pemahaman akan karakter aliran pada penampang yang mengalami penyempitan sehingga secara praktis dijadikan bahan pertimbangan dalam desain teknis saluran khususnya pada saluran-saluran irigasi.

C. Batasan Masalah

Alat peraga dibuat di laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Immanuel dengan saluran dari pasangan batu dengan dinding halus dengan bentuk persegi dan trapezium. Saluran terbuka dengan dasar saluran halus dari pasangan batu. Penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penyempitan terhadap energi spesifik. Dalam penelitian ini dipakai tiga variasi penyempitan yaitu 10.5 cm, 16.5 cm, 21.5 cm. Debit aliran yang dipakai $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$, $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$, $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$.

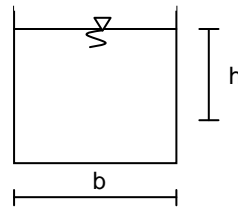
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Saluran Terbuka

Saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas disebut saluran terbuka. Saluran digolongkan menjadi dua macam yaitu saluran alam (*natural*) dan saluran buatan (*artificial*). Saluran alam meliputi semua saluran air yang terdapat secara alamiah di bumi, melalui dari anak selokan kecil di pegunungan, sungai kecil dan sungai besar sampai ke muara sungai. Sifat-sifat hidrolis saluran alam biasanya sangat tidak menentu. Dalam beberapa hal dapat dibuat anggapan pendekatan yang cukup sesuai dengan pengamatan sesungguhnya. Sehingga persyaratan aliran pada saluran ini dapat diterima untuk penyelesaian analisa hidrolis teoritis. Saluran buatan merupakan saluran yang dibuat manusia untuk tujuan dan kepentingan tertentu. Saluran buatan memiliki penampang teratur dan lebih mudah dalam melakukan analisa dibanding saluran alami.

1. Geometri saluran

Penampang saluran alam umumnya sangat tidak beraturan, biasanya bervariasi dari bentuk seperti parabola sampai trapesium. Istilah penampang saluran (*channel section*) adalah tegak lurus terhadap arah aliran, sedangkan penampang vertikal saluran (*vertical channel section*) adalah penampang vertikal melalui titik terbawah atau terendah dari penampang. Oleh sebab itu pada saluran mendatar penampangnya selalu merupakan penampang vertikal.



Gambar 2.1. Penampang saluran persegi panjang

$$\text{Luas (A)} = b \times h \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

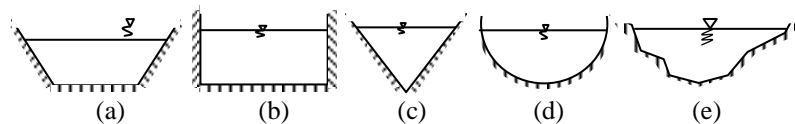
$$\text{Keliling basah (P)} = b + 2h \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Jari - jari Hidrolik (R)} = \frac{bh}{b + 2h} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan b = lebar dasar saluran, dan h = tinggi kedalaman air.

2. Bentuk saluran

Terdapat banyak bentuk penampang saluran terbuka antara lain penampang bentuk trapesium, penampang bentuk persegi panjang, penampang bentuk segitiga, penampang bentuk parit dangkal, dan penampang saluran alam yang tidak beraturan.



Gambar 2. 2. Berbagai macam bentuk saluran terbuka
(a)Trapezium, (b)Persegi, (c)Segitiga, (d)Setengah lingkaran, (e)Tak beraturan

B. Penyempitan Saluran

Penyempitan saluran adalah suatu fenomena yang biasa dijumpai pada saluran terbuka. Suatu penyempitan pada saluran terbuka, terdiri atas daerah penyempitan penampang lintang saluran secara mendadak. Pengaruh penyempitan tergantung pada geometri (bentuk) bagian lengkungan masuk penyempitan, kecepatan aliran dan keadaan aliran (Ven Te Chow,1992).

Aliran yang melalui penyempitan dapat berupa aliran superkritis atau subkritis. Pada aliran subkritis, adanya penyempitan saluran akan menyebabkan terjadinya efek pembendungan yang meluas ke arah hulu, sedangkan pada aliran superkritis hanya akan menimbulkan perubahan ketinggian permukaan air didekat penyempitan dan tidak meluas ke arah hulu. Bila kedalaman air di penyempitan lebih besar dibandingkan kedalaman kritis, maka perluasan genangan air ke arah hulu hanya terjadi pada jarak yang dekat, dan dibagian akhir efek pembendungan itu akan terjadi suatu loncatan hidrolis. Kedalaman kritis dapat dirumuskan sebagai berikut (Henderson, 1966 dalam Budi S, 1988):

$$h_c = \frac{2}{3} E \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

sedangkan

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B_c} \frac{1}{g}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

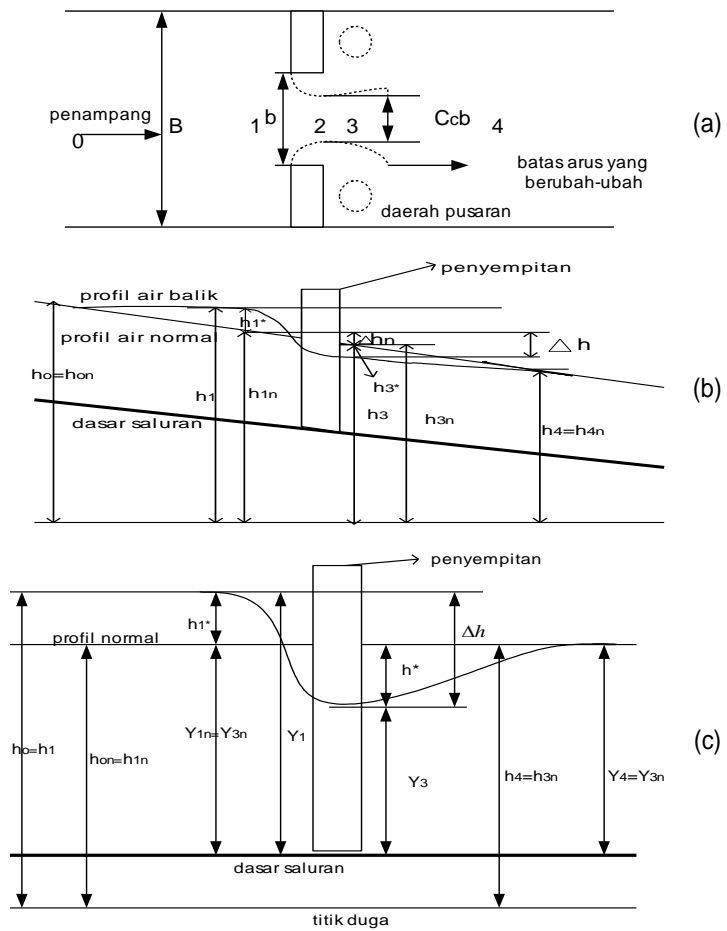
sehingga

$$B_c = 1.84 \frac{Q}{E^{3/2} g^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan Q = debit air (m^3/det), B_c = lebar kritis, E = energi spesifik, H_c = kedalaman kritis, g = percepatan gravitasi.

Kedalaman kritis dapat didefinisikan sebagai kedalaman air yang menyebabkan terjadinya aliran kritis. Terjadi atau tidaknya penampang kritis (penampang saat aliran dalam kondisi kritis) pada penyempitan, tergantung pada besarnya perbandingan antara energi aliran normal E_{sn} dengan energi aliran kritis E_{skr} . Pada Gambar 3 tampak kasus penyempitan yang terjadi pada saluran terbuka dengan kemiringan kecil. Pada keadaan ini timbul efek pembendungan berupa genangan air yang berawal di bagian masuk penyempitan dan berakhir pada penampang 0. Di antara titik 0 sampai 1 kecepatan aliran berubah secara perlahan-lahan. Mulai masuk bagian penyempitan pada penampang 1, kecepatan aliran mulai bertambah dan akhirnya semakin berkurang setelah keluar dari penyempitan.

Pada bagian akhir penyempitan, aliran berubah secara cepat dan ditandai dengan adanya percepatan pada arah tegak lurus dan sejajar garis arus. Pada daerah ini permukaan air turun secara drastis, dan pada arus yang berubah-ubah tersebut kecepatannya terus berkurang. Daerah antara arus yang berubah-ubah dengan bagian akhir penyempitan dipisahkan oleh suatu zona yang berupa pusaran air. Perubahan arus yang mengalir melalui penyempitan mencapai lebar minimum pada penampang 2. Setelah keluar dari penyempitan, diantara penampang 3 dan 4, aliran akan berubah sedikit demi sedikit, dan akhirnya arus yang berubah-ubah berangsur-angsur kembali menjadi aliran seragam pada penampang 4. Jika aliran pada penampang 0 sampai 4 telah konstan, maka kehilangan energi total sama dengan energi total seragam.



Gambar 2.3. Sketsa aliran yang melalui penyempitan, (Menurut Tracy dan Carter, 1965 dalam Budi, S, 1998). (a) Denah ; (b) tampak tegak; (c) tampak tegak, dengan asumsi kehilangan energi akibat gesekan = 0.

C. Klasifikasi Aliran

Aliran saluran terbuka dapat digolongkan menjadi beberapa jenis dan diuraikan dengan berbagai cara, adalah sebagai berikut (Rangga Raju, 1981):

1. Aliran tunak (*steady flow*) dan aliran tak tunak (*unsteady flow*)

Aliran dalam saluran terbuka dikatakan tunak (*steady*) bila kedalaman aliran tidak berubah atau dianggap konstan selama selang waktu tertentu. Aliran dikatakan tak tunak (*unsteady*) bila kedalamannya berubah sesuai dengan waktu. Sebagian besar persoalan tentang saluran terbuka

umumnya hanya memerlukan penelitian mengenai perilaku aliran dalam keadaan tunak. Debit Q pada suatu penampang saluran untuk sembarang aliran dinyatakan dengan persamaan :

$$Q = VA \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan V = kecepatan rata-rata dan A = luas penampang melintang tegak lurus terhadap arah aliran.

Sebagian besar persoalan aliran tunak, berdasarkan suatu pertimbangan, maka debit diasumsikan tetap di sepanjang bagian saluran yang luas, dengan kata lain aliran bersifat tunak kontinu (*continous steady flow*), sehingga dari Persamaan (2.7) :

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan subscript 1 dan 2 menunjukkan penampang saluran yang berlainan. Persamaan (2.8) tidak dapat dipakai bila debit aliran tunak tak seragam (*nonuniform*) disepanjang saluran karena terjadi limpahan. Jenis aliran ini dikenal sebagai aliran berubah beraturan (*spatially varied flow*) atau aliran diskontinu (*diskontinuous flow*) yang terdapat pada pelimpah samping, air pembilas melalui saringan, cabang saluran sekitar tangki pengolah air buangan, saluran pembuang utama dan saluran pembawa dalam sistem irigasi.

2. Aliran seragam

Aliran pada saluran terbuka dikatakan seragam jika kedalaman aliran sama pada setiap penampang saluran. Suatu aliran seragam dapat bersifat tunak atau tidak tunak, tergantung apakah kedalamannya berubah sesuai dengan perubahan waktu. Aliran seragam yang tunak (*steady uniform flow*) merupakan jenis aliran pokok yang dibahas dalam hidrolika saluran terbuka dengan kedalaman aliran tidak berubah selama waktu tertentu yang telah diperhitungkan. Penetapan bahwa suatu aliran bersifat seragam tak tunak (*unsteady uniform flow*) harus dengan syarat bahwa permukaan air berfluktuasi sepanjang waktu dan tetap sejajar dasar saluran tetapi hal ini merupakan suatu keadaan yang praktis tidak mungkin terjadi.

Aliran disebut berubah (*varied*) bila kedalaman aliran berubah di sepanjang saluran dan dapat bersifat tunak maupun tidak tunak. Karena aliran seragam yang tak tunak jarang terjadi, istilah tak tunak disini selanjutnya khusus dipakai untuk aliran tak tunak yang berubah. Untuk perhitungan hidrolika, kecepatan aliran rata-rata aliran seragam turbulen dalam saluran terbuka biasanya dinyatakan dengan perkiraan yang dikenal dengan rumus aliran seragam dan sebagian besar persamaannya dapat dinyatakan dalam bentuk umum, yaitu :

$$V = C R^x S^y \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

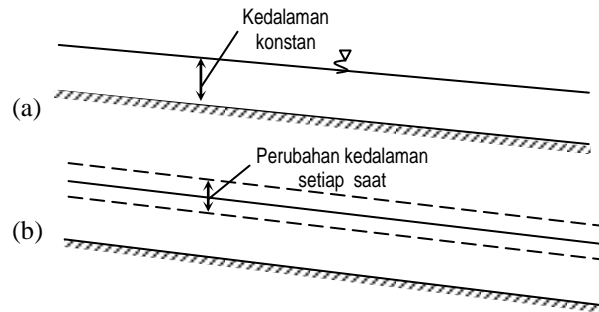
dengan V : kecepatan rerata (m^3/det), R : jari-jari hidrolis (m), S : kemiringan energi, x dan y adalah eksponen, dan C : faktor tekanan aliran yang bervariasi menurut kecepatan rerata, jari-jari hidrolis, kekasaran saluran ,dan berbagai faktor-faktor lainnya.

3. Aliran turbulen dan aliran laminar

Aliran fluida khususnya air diklasifikasikan berdasarkan perbandingan antara gaya-gaya inersia (*inertial forces*) dengan gaya-gaya akibat kekentalan (*viscous forces*) menjadi tiga bagian, yaitu aliran laminar, aliran transisi dan aliran turbulen. Variabel yang dipakai untuk klasifikasi ini adalah bilangan *Reynolds* yang didefinisikan sebagai :

$$Re = \frac{uL}{\nu} \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan u = karakteristik kecepatan aliran, biasanya diambil kecepatan rata-rata (m/det). L = panjang karakteristik (m), ν = kekentalan kinematik (m^2/det) yaitu $\nu = \mu / \rho$ dengan μ = kekentalan kinematik $kg/m \ det$, ρ = kerapatan air dengan satuan kg/m^3 . Selanjutnya klasifikasi aliran berdasar bilangan *Reynolds* dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu $Re < 500$ = aliran laminar, $500 < Re < 12,500$ = aliran peralihan, dan $Re > 12,500$ = aliran turbulen. Umumnya pada saluran terbuka mempunyai $Re > 12,500$ sehingga aliran termasuk dalam kategori aliran turbulen. (Robert, J.K.,2002)



Gambar 2.4 (a) Aliran seragam, (b) Aliran tak seragam

4. Aliran kritis dan superkritis

Aliran dikatakan kritis apabila bilangan Froude (F) sama dengan satu (1), sedangkan aliran disebut subkritis atau kadang-kadang dinamakan aliran tenang (*trianguil flow*) apabila $F < 1$ dan disebut superkritis atau aliran cepat (*rapid flow*) apabila $F > 1$. Perbandingan kecepatan aliran dengan gaya grafitasi (per satuan volume) dikenal sebagai bilangan Froude dan dapat dirumuskan sebagai berikut (Rangga Raju, 1981) :

$$F = V / \sqrt{gL} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan F = bilangan Froude, V = kecepatan rata-rata aliran (m/det), g = pecepatan grafitasi (m^2/det), L = panjang karakteristik (m).

Pada aliran terbuka biasanya digunakan kedalaman hidraulis D sebagai panjang karakteristik, sehingga F dapat ditulis sebagai :

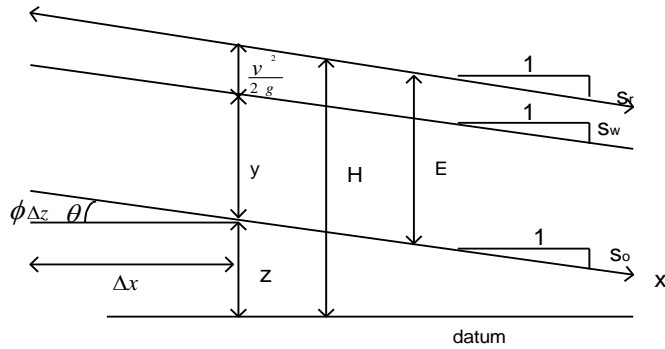
$$F = V / \sqrt{gD} \dots\dots\dots (2.12)$$

D. Energi Spesifik (*Specific Energy*)

Besarnya energi spesifik dapat dirumuskan sebagai berikut (Ven Te Chow, 1959 dalam Robert, J.K., 2002) :

$$E = \frac{v^2}{2g} + h \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan E = energi spesifik.



Gambar 2. 5. Parameter energi spesifik (Robert.J.K. (2002))

Dasar saluran diasumsikan mempunyai kemiringan landai atau tanpa kemiringan. Z adalah ketinggian dasar diatas garis sreferensi yang dipilih, h adalah kedalaman aliran, dan faktor koreksi energi (α) dimisalkan sama dengan satu. Energi spesifik aliran pada setiap penampang tertentu dihitung sebagai total energi pada penampang itu dengan menggunakan dasar saluran sebagai referensi (Rangga Raju, 1981). Persamaan energi secara umum adalah :

$$H = z + h \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.14)$$

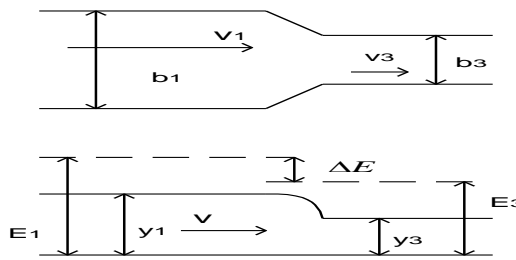
sehingga persamaan energi untuk saluran datar ($\theta = 0$), adalah :

$$E = \frac{v^2}{2g} + h \dots\dots\dots (2.15)$$

Berhubung $Q = v \times A$, maka rumus energi spesifik menjadi :

$$E = \frac{Q^2}{2g A^2} + h \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan H = tinggi energi (cm), z = tinggi suatu titik terhadap bidang referensi (cm), α = koefisien energi, pada perhitungan selanjutnya $\alpha = 1$, E = energi spesifik (cm), h = kedalaman aliran (cm), v = kecepatan aliran rata-rata (cm/detik), A = luas penampang (cm²), g = percepatan grafitasi (cm/detik²), dan Q = debit (cm³/det). Perbedaan energi sebelum penyempitan dan energi setelah penyempitan dikenal sebagai kehilangan energi, yaitu $\Delta E = E_1 - E_2$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Profil aliran melalui penyempitan (Ven Te Chow,1992)

Dari Gambar 2.6 diperoleh persamaan besarnya kehilangan energi sebagai berikut :

$$\Delta E = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} - y_3 - \frac{v_3^2}{2g} \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan ΔE = kehilangan energi (cm), y_1 = tinggi air sebelum penyempitan (cm), y_3 = tinggi air pada penyempitan (cm), v_1 = kecepatan air sebelum penyempitan (cm/det), dan v_3 = kecepatan air pada penyempitan (cm/det). Kecepatan dapat diturunkan dari persamaan sebelumnya, sehingga Persamaan (2.17) menjadi :

$$\Delta E = y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_3 - \frac{Q^2}{2gA_3^2} \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan A_1 = luas penampang titik 1 dan A_3 = luas penampang titik 3

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pembuatan saluran

Penelitian dilakukan terhadap saluran terbuka yang pada bagian tertentu terdapat penyempitan. Pada bak penampung awal terdapat pintu air dan alat ukur debit Thomson diletakkan di depan pintu air. Bak awal dan bak akhir dihubungkan dengan saluran terbuka yang berbentuk persegi dan bentuk trapezium. Di tengah saluran bentuk persegi juga ditempatkan pintu air. Penyempitan saluran dibuat dengan menebalkan dinding saluran sepanjang 40 cm sehingga tercapai lebar 21,5 cm, 16,5 cm, dan 10,5 cm.

B. Pengujian

Variasi penyempitan dalam penelitian adalah 16 cm, 10 cm, 5 cm. pengukuran yang dilakukan meliputi pengukuran debit, dan pengukuran ketinggian air pada tiap titik pada variasi penyempitan 16 cm, 10 cm, dan 5 cm..

1. Pengukuran debit air

Debit yang diukur menggunakan kombinasi bukaan pintu dan tinggi permukaan air pada alat ukur debit segitiga dengan variasi tinggi air 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm, 9 cm, 10 cm, 11 cm. Langkah pertama yaitu menentukan tinggi air pada alat ukur kemudian air dari bak penampung pertama dibiarkan sesaat melalui saluran sampai bak terakhir. Air yang telah lewat dibiarkan sesaat sampai tinggi air pada alat ukur konstan, kemudian dilakukan pengukuran waktu yang diperlukan untuk memenuhi bejana berkapasitas 23 liter. Pengukuran dilakukan 6 kali dan debit rerata dihitung dengan persamaan :

$$Q_n = \frac{V_n}{T_n} \dots\dots\dots (2.19)$$

dengan Q = debit (liter/detik), V = volume (liter), T = waktu (detik), dan n = nomor percobaan. Dari beberapa pengukuran debit untuk ketinggian tersebut akan dapat diketahui hubungan antara tinggi muka air pada alat ukur dengan debit yang terjadi.

2. Pengukuran ketinggian air pada penyempitan

Ketinggian air diukur pada tiga variasi debit dan penyempitan. Debit melalui saluran yang mengalami penyempitan adalah 5.51×10^{-4} m³/detik, 2.6×10^{-3} m³/detik dan 1.26×10^{-3} m³/detik. Variasi penyempitan yang dipakai dalam penelitian ini adalah 16 cm, 10 cm, 5cm

3. Perhitungan luas penampang

Luas penampang yang diukur pada penelitian ini adalah luas penampang sepanjang penyempitan, yaitu :

$$A = b \times h \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan A = luas penampang air terukur (m²), b = lebar penampang , dan h = tinggi muka air pada titik yang ditinjau.

4 Perhitungan bilangan froude

Perhitungan ini berguna untuk menentukan jenis aliran apakah aliran kritis, subkritis atau superkritis dengan menggunakan persamaan :

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan F = bilangan froude, v = kecepatan rata-rata (m/det), G = percepatan gravitasi (m²/detik), dan D = kedalaman hidraulis (m).

5 Perhitungan energi spesifik

Dari hasil pengukuran ketinggian air yang terjadi pada penyempitan, selanjutnya energi spesifik dapat dihitung dengan persamaan :

$$E = \frac{Q^2}{2gA^2} + h \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Perhitungan dilakukan terhadap h rerata sebelum penyempitan dan pada penyempitan sehingga kehilangan kehilangan energi dihitung dengan persamaan :

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan rumus :

$$\Delta E = y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_3 - \frac{Q^2}{2gA_3^2} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan y_1 , y_3 adalah tinggi air sebelum dan pada penyempitan yang diukur beberapa kali.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Kalibrasi Alat Ukur Debit Thomson

C merupakan koefisien alat ukur debit Thomson. Koefisien debit Thomson dilapangan dapat dilihat pada Tabel 1 dan besarnya nilai C rata-rata adalah 1,39. Sebagai contoh untuk $H = 4$ dengan volume 23 liter, diperoleh nilai C sebagai berikut :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0.023}{41.688} = 5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik} \quad \rightarrow$$

$$C = \frac{Q}{H^{5/2}} = \frac{5.51 \times 10^{-4}}{0.04^{5/2}} = 1.721$$

Tabel 4.1. Kalibrasi debit Thomson dengan volume tampungan 0.023m³

No	H	Waktu (detik)						Waktu	Debit m ³ /det	Koefisien
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆			
1	4	42.71	40.93	41.31	41.90	41.84	41.44	41.688	5.51x10 ⁻⁴	1.721
2	5	27.62	27.41	27.35	27.53	28.32	28.27	27.750	8.28x10 ⁻⁴	1.481
3	6	17.60	18.69	18.41	18.41	18.31	17.56	18.183	1.26x10 ⁻³	1.428
4	7	9.00	9.94	9.8	8.78	9.06	8.69	9.211	2.50x10 ⁻³	1.928
5	8	8.88	8.84	8.84	8.81	8.75	9.01	8.855	2.60x10 ⁻³	1.436
6	9	7.06	7.72	7.25	7.13	7.21	7.03	7.233	3.17x10 ⁻³	1.304
7	10	6.56	6.34	6.50	6.16	6.25	6.38	6.365	3.61x10 ⁻³	1.141
8	11	5.15	5.28	5.15	4.15	5.10	5.31	5.185	4.43x10 ⁻³	1.103
9	12	4.81	4.63	4.75	4.78	4.69	4.78	4.7400	4.85x10 ⁻³	0.972
C terpakai = 1.39										

B Ketinggian Air

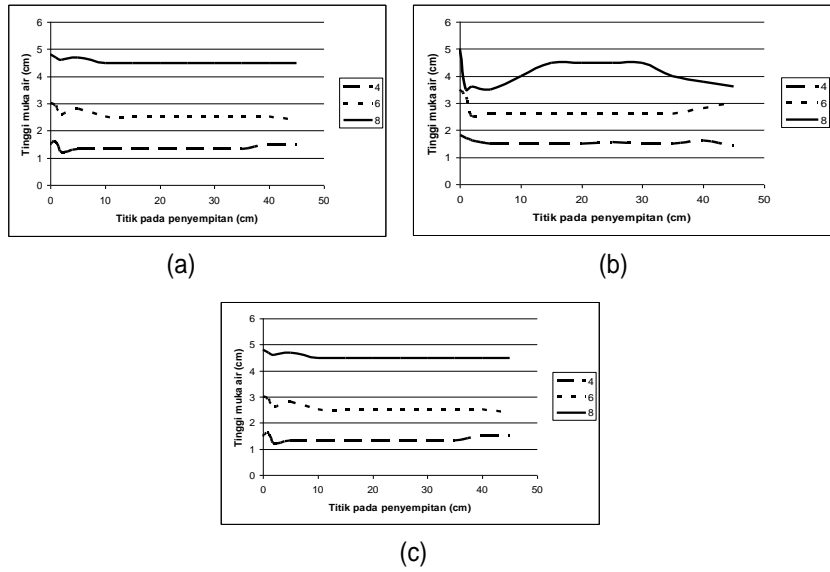
Hasil pengukuran ketinggian air (*cm*) dapat dilihat pada Tabel 4.2. Angka 4, 6, 8 menunjukkan ketinggian muka air pada alat ukur debit Thomson. Satuan yang digunakan dalam grafik tersebut adalah centi meter. Angka 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 menunjukkan jarak titik yang ditinjau pada penyempitan.

Ketinggian muka air sebelum masuk penyempitan adalah 2.2 cm pada debit aliran $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$, 3.8 cm pada debit $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$, dan 4.6 cm pada debit $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$. Ketinggian muka air pada debit $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$ mengalami kenaikan pada saat masuk penyempitan, dan mempunyai efek pembendungan yang disebabkan adanya perubahan penampang secara mendadak dan debit yang besar. Pada penyempitan 5 cm tinggi muka air mengalami penurunan karena penyempitan yang terjadi relatif kecil. Dari tabel ketinggian muka air dapat dibuat grafik profil aliran seperti pada Gambar 4.1.

Tabel 4.2. Ketinggian air untuk tiap variasi debit dan penyempitan

Debit (m^3/det)	Jarak titik tinjauan pada daerah penyempitan (cm)											
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	Penyempitan 16 cm = lebar saluran 10.5 cm											
5.51×10^{-4}	2	1.8	1.9	2	2	2	2	2	2	2	1.9	1.8
1.26×10^{-3}	3.6	3.8	3.5	3	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	2.9	2.8
2.60×10^{-3}	5.4	5.5	5.4	3.2	3.8	3.2	3	3.6	4.5	4.8	4	4.2
	Penyempitan 10 cm = lebar saluran 16.5 cm											
5.51×10^{-4}	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.55	1.5	1.5	1.6	1.4
1.26×10^{-3}	3.5	3.2	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.8	3
2.60×10^{-3}	5	3.5	3.6	3.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4	3.8	3.6
	Penyempitan 5 cm - lebar saluran 21.5 cm											
5.51×10^{-4}	1.5	1.6	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5	1.5
1.26×10^{-3}	3	2.9	2.6	2.8	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4
2.60×10^{-3}	4.8	4.7	4.6	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Dari hasil ketinggian air pada penyempitan dapat dihitung luas penampang pada tiap titik dengan variasi penyempitan dan variasi debit dan hasil perhitungan luas penampang ini dapat dilihat pada tabel 4.3 dengan luas penampang dalam cm^2 atau $\times 10^{-4} \text{ m}^2$.



Grafik 4.1. Profil aliran pada tiap variasi penyempitan (a) 16 cm, (b) 10 cm, (c) 5 cm

Tabel luas 4. 3. Luas penampang pada berbagai jarak pada daerah penyempitan

Debit	Jarak titik tinjauan pada daerah penyempitan (cm)											
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	Penyempitan 16 cm - lebar saluran 10.5 cm											
5.51x10 ⁻⁴	21	18.9	19.95	21	21	21	21	21	21	21	19.95	18.9
1.26x10 ⁻³	37.8	39.9	36.75	31.5	32.55	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	30.45	29.4
2.60x10 ⁻³	56.7	57.75	56.7	33.6	39.9	33.6	31.5	37.8	47.25	50.4	42	44.1
	Penyempitan 10 cm = lebar saluran 16.5 cm											
5.51x10 ⁻⁴	29.7	28.05	26.4	24.75	24.75	24.75	24.75	25.57	24.75	24.75	26.4	23.1
1.26x10 ⁻³	36.75	33.6	26.25	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	29.4	31.5
2.60x10 ⁻³	52.5	36.75	37.8	36.75	42	47.25	47.25	47.25	47.25	42	39.9	37.8
	Penyempitan 5 cm = lebar saluran 21.5 cm											
5.51x10 ⁻⁴	32.25	34.4	25.8	27.95	27.95	27.95	27.95	27.95	27.95	27.95	32.25	32.25
1.26x10 ⁻³	64.5	62.35	55.9	60.2	53.75	53.75	53.75	53.75	53.75	53.75	53.75	51.6
2.60x10 ⁻³	103.2	101.05	98.9	101.05	96.75	96.75	96.75	96.75	96.75	96.75	96.75	92.45

Luas penampang tanpa penyempitan pada lebar saluran 26,5 cm pada debit 2.6×10^{-3} , 1.26×10^{-3} , dan 5.51×10^{-4} m³/detik berturut-turut adalah 121.9, 58.3, dan 100.7 cm².

C. Angka Froud

Bilangan Froud dihitung dengan Persamaan (2.25) dengan $v = Q/A$, dan dengan menggunakan A sebagai perkalian kedalaman hidraulis (h) dengan lebar saluran pada penyempitan dan tanpa penyempitan (b), selanjutnya dapat dirumuskan :

$$F = \frac{Q}{A_n \sqrt{g \frac{A}{b_n}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Bilangan Froud pada saluran tanpa penyempitan 26.5 cm = 0.265m, untuk debit $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$, adalah :

$$F = \frac{2.6 \times 10^{-3}}{121.9 \times 10^{-4} \sqrt{9.81 \times \frac{121.9 \times 10^{-4}}{26.5 \times 10^{-2}}}} = 0,318 < 1 \rightarrow \text{aliran subkritis}$$

Bilangan Froud untuk debit $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$ dan 1.26×10^{-3} di titik 0 pada penyempitan 16 cm atau lebar saluran 10,5 cm adalah :

$$F = \frac{5.51 \times 10^{-4}}{21 \times 10^{-4} \sqrt{9.81 \times \frac{21 \times 10^{-4}}{10.5 \times 10^{-2}}}} = 0,592 < 1 \rightarrow \text{aliran subkritis}$$

$$F = \frac{1.26 \times 10^{-3}}{37.8 \times 10^{-4} \sqrt{9.81 \times \frac{37.8 \times 10^{-4}}{10.5 \times 10^{-2}}}} = 0,561 < 1 \rightarrow \text{aliran subkritis}$$

Dari ketiga hasil perhitungan di atas diketahui bahwa aliran yang terjadi adalah aliran subkritis.

D. Energi Spesifik

Perhitungan energi spesifik diselesaikan untuk masing-masing penyempitan saluran dan debit yang terjadi dan hasilnya dirangkum dalam Tabel 4.4.

Untuk penyempitan 16, 10, dan 5 cm dengan debit $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$ dan $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$ dapat dilihat bahwa pada awal tiap penyempitan energi spesifik mengalami peningkatan. Semakin besar penyempitan, energi yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini disebabkan karena muka air naik akibat efek pembendungan. Untuk debit $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$ diketahui bahwa pada awal penyempitan 16 cm dan 10 cm terjadi kenaikan energi spesifik sedang pada penyempitan 5 cm energi spesifik turun yang dikarenakan aliran mengalami penurunan.

Tabel luas 4.4. Hasil perhitungan energi spesifik

Debit	Energi spesifik di titik tinjauan pada daerah penyempitan (cm)											
	0	1	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Penyempitan 16 cm - lebar saluran 10.5 cm												
5.51×10^{-4}	0.023	0.022	0.023	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.023	0.022
1.26×10^{-3}	0.042	0.043	0.041	0.038	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.038	0.037
2.60×10^{-3}	0.065	0.065	0.065	0.063	0.060	0.063	0.065	0.060	0.060	0.062	0.060	0.059
Penyempitan 10 cm = lebar saluran 16.5 cm												
5.51×10^{-4}	0.020	0.019	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.017
1.26×10^{-3}	0.041	0.039	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.038
2.60×10^{-3}	0.063	0.061	0.060	0.061	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
Penyempitan 5 cm = lebar saluran 21.5 cm												
5.51×10^{-4}	0.016	0.017	0.014	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.016	0.016
1.26×10^{-3}	0.032	0.031	0.029	0.030	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.027
2.60×10^{-3}	0.051	0.050	0.050	0.050	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.047

Pada debit 2.6×10^{-3} m³/detik, energi spesifik pada saluran sebelum penyempitan dan pada penyempitan 10 cm di titik 45 adalah :

$$E = \frac{(2.6 \times 10^{-3})^2}{2 \times 9.81 \times (121.9 \times 10^{-4})^2} + 4.6 \times 10^{-2} = 0,0483 \text{ m}$$

$$E = \frac{(1.26 \times 10^{-3})^2}{2 \times 9.81 \times (37.8 \times 10^{-4})^2} + 3.6 \times 10^{-2} = 0,060 \text{ m}$$

Dari hasil ini tampak bahwa energi spesifik naik setelah melewati penyempitan, sebesar $\Delta E = 0,0483 - 0,060 = -0,0117 \text{ m}$ yang disebabkan aliran pada debit 2.6×10^{-3} m³/detik setelah masuk penyempitan 10 cm menjadi aliran superkritis.

Pada debit $1,26 \times 10^{-3}$ m³/detik, energi spesifik pada saluran sebelum penyempitan dan pada penyempitan 10 cm di titik 45 adalah :

$$E = \frac{(1.26 \times 10^{-3})^2}{2 \times 9.81 \times (100.7 \times 10^{-4})^2} + 3.8 \times 10^{-2} = 0,0388 \text{ m}$$

$$E = \frac{(1.26 \times 10^{-3})^2}{2 \times 9.81 \times (31.5 \times 10^{-4})^2} + 3 \times 10^{-2} = 0,0381 \text{ m}$$

Pada hasil ini tampak bahwa energi spesifik justru mengalami penurunan setelah melewati penyempitan, sebesar $\Delta E = 0,0388 - 0,0381 = 0,0007 \text{ m}$

yang disebabkan oleh aliran yang mengalami penurunan setelah melewati penyempitan .

Pada debit $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$, energi spesifik pada saluran sebelum penyempitan dan pada penyempitan 10 cm di titik 45 adalah :

$$E = \frac{(5.51 \times 10^{-4})^2}{2 \times 9.81 \times (58.3 \times 10^{-4})^2} + 2.2 \times 10^{-2} = 0,0225 \text{ m}$$

$$E = \frac{(5.51 \times 10^{-4})^2}{2 \times 9.81 \times (23.1 \times 10^{-4})^2} + 1.4 \times 10^{-2} = 0,017 \text{ m}$$

Pada hasil ini tampak bahwa energi spesifik juga mengalami penurunan setelah melewati penyempitan, sebesar $\Delta E = 0,0225 - 0,0170 = 0,0055 \text{ m}$ yang disebabkan oleh aliran yang mengalami penurunan setelah melewati penyempitan.

Menggunakan debit aliran $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$ pada penyempitan 16 cm diperoleh beda energi pada titik sebelum penyempitan dan titik sesudah penyempitan sebesar :

$$\Delta E = 0.038 + \frac{1.26 \times 10^{-3}}{0.01009^2 \cdot 2.9.81} - 0.032 - \frac{1.26 \times 10^{-3}}{0.00336^2 \cdot 2.9.81} = 0,0027 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan ΔE diketahui bahwa penurunan terbesar energi spesifik terjadi pada aliran dengan penyempitan 10 cm pada debit aliran $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$. Perhitungan ΔE sebelum dan setelah penyempitan dengan nilai penyempitan lainnya dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 4.5. ΔE sebelum dan sesudah penyempitan

Penyempitan	ΔE
Debit $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$	
16 cm	-0.0107 m
10 cm	0.003 m
5 cm	0.0013 m
Debit $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$	
16 cm	0.0007 m
10 cm	0.003 m
5 cm	0.0055 m
Debit $5.51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{detik}$	
16 cm	0.0005 m
10 cm	0.003 m
5 cm	0.0065 m

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil pengamatan dan analisis terhadap data pengukuran di saluran dapat disimpulkan bahwa aliran air melalui penyempitan akan mengalami perubahan ketinggian dan penyempitan saluran berpengaruh nyata terhadap perubahan energi spesifik. Dari pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa perubahan energi spesifik terbesar terjadi pada penyempitan 16 cm pada debit aliran $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$ sebesar -0.0107 m .

B. Saran

Untuk penyempurnaan dan pengembangan penelitian selanjutnya disarankan memperpanjang penyempitan pada saluran agar pengukuran dan perilaku aliran lebih mudah diamati sekaligus faktor kekasaran dan kemiringan saluran turut diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Budi Santoso, 1988, Hidrolika II, Biro penerbit UGM, Yogyakarta
Budi Suteja, 1998, Aliran melalui penyempitan saluran, Biro Penerbit UGM, Yogyakarta
Rangga raju, 1999, Aliran melaului saluran terbuka, Erlangga, Jakarta
Robert.J.Kodoatie, 2002, Hidrolika Terapan Aliran Pada Saluran Terbuka dan Pipa, Andi Yogyakarta.
Tracey, and Carter, 1961. Resistance Coeffisients and Velocity Distribution- Smooth Rectangular Channel. U.S. Geological Survey
Ven Te Chow, 1991, Aliran melalui saluran terbuka, Erlangga, Jakarta