Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 14, No. 3, Tahun 2026
Online: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm

STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK HIDRAULIK PADA *TRIANGULAR SHARP-CRESTED WEIR* DENGAN VARIASI SUDUT BUKAAN *NOTCH*

***Farrel Muhammad Irvianto[1], Khoiri Rozi[2]**
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
[2]Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059
*E-mail: farrelirvianto@students.undip.ac.id

Abstrak

Pengukuran debit yang akurat pada saluran terbuka sangat penting untuk menjaga stabilitas aliran yang melalui bendungan. Namun, variasi geometri *notch* pada *weir* sering kali memicu turbulensi yang mengurangi efektivitas aliran. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi parameter *head* terhadap debit yang dihasilkan, pengaruh bukaan *notch* terhadap efektivitas pengaliran, serta mengkaji persamaan empiris debit aliran yang dapat digunakan sebagai referensi rancang bangun serta pengoperasian bendungan yang efektif dan seakurat mungkin. Analisis hidrolika didasarkan pada karakteristik hubungan tinggi muka air (*head*) dan debit, serta evaluasi terhadap discharge coefficient sebagai indikator konversi energi potensial menjadi kinetik. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental pada base modul HM150 laboratorium dengan menguji lima variasi geometri *sharp-crested weir*, yaitu *triangular* 90º dan *triangular* 60º *notch weir*. Pengujian dilakukan pada variasi *head*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan discharge baik teoritis maupun eksperimental dengan *head* menciptakan kurva nonlinier yang meningkat, variasi *triangular* 90º *notch* memiliki koefisien debit tertinggi secara keseluruhan, dan persamaan empiris debit yang memiliki karakteristik tren yang selaras dengan persamaan teoritis, meskipun terdapat perbedaan pada nilai konstanta multiplikatif dan pangkatnya.

Kata kunci: *discharge coefficient*; persamaan empiris; persamaan teoritis; *sharp-crested weir*; variasi *notch*

Abstract

Accurate discharge measurement in open channels is crucial for maintaining flow stability through a dam. However, geometric variations of notches on weirs often trigger turbulence, which reduces flow effectiveness. This study aims to identify the *head* parameters against the resulting discharge, the effect of notch openings on flow effectiveness, and to examine the empirical equations of flow discharge that can serve as a reference for effective and highly accurate dam design and operation. The hydraulic analysis is based on the characteristics of the relationship between water level (*head*) and discharge, as well as an evaluation of the discharge coefficient as an indicator of the conversion of potential energy into kinetic energy. This research was conducted experimentally on the HM150 laboratory base module by testing five geometric variations of sharp-crested weirs, specifically the *triangular* 90° and *triangular* 60° notch weirs. Testing was carried out across various *head* levels. The results showed that the relationship between discharge (both theoretical and experimental) and *head* creates a rising non-linear curve, the *triangular* 90° notch variation possesses the highest overall discharge coefficient, and the empirical discharge equations exhibit trend characteristics that align with the theoretical equations, despite differences in the values of the multiplicative constants and exponents.

Keywords: *discharge coefficient; empirical equation; notch variation; sharp-crested weir; theoretical equation*

1. Pendahuluan

Weir (ambang) pada bangunan bendung memiliki peran krusial dalam mengatur debit aliran, menaikkan muka air, dan mendistribusikan air untuk kebutuhan irigasi, domestik, maupun pembangkit listrik [1]. Salah satu parameter utama dalam efisiensi desain bendung adalah koefisien debit (C_d), yaitu perbandingan antara debit aktual dan teoritis yang nilainya sangat dipengaruhi oleh variasi geometri seperti bentuk puncak, lebar, dan sudut kemiringan ambang.

Pada aplikasinya, seperti pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), geometri bukaan bendung secara langsung memengaruhi karakteristik profil aliran, koefisien debit, pola turbulensi di kolam olak, hingga efisiensi ekstraksi energi mekanis pada turbin [2]. Namun, banyak desain bendung saat ini belum optimal dalam mempertimbangkan pengaruh variasi geometri tersebut, yang berpotensi memicu ketidaktepatan pengukuran debit serta penurunan efisiensi sistem.

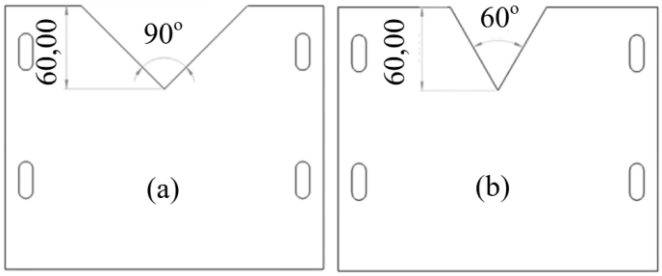
Guna mengatasi permasalahan tersebut, penelitian skala laboratorium ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental untuk menganalisis hubungan antara variasi geometri sudut *triangular notch weir* terhadap nilai C_d serta performa aliran secara keseluruhan [3]. Penelitian ini menggunakan *sharp-crested weir* karena dapat mengurangi gesekan

yang terjadi pada aliran sehingga kondisinya mendekati ideal [4]. Hasil kajian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi desain *weir* yang lebih optimal demi meningkatkan akurasi pengukuran serta efisiensi hidrolis bendung.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Model Uji

Pada studi eksperimental ini menggunakan dua buah model uji *weir* dengan ketebalan pelat masing-masing 2 mm, yang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Model Uji (a) *Triangular Weir* 90°, (b) *Triangular Weir* 60° (satuan dalam mm)

2.2 Persamaan Analitis

Persamaan analitis yang digunakan untuk menghitung debit teoritis pada *triangular weir* adalah sebagai berikut.

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot tan\frac{\theta}{2} \cdot H^{\frac{5}{2}} \qquad (1) \qquad [5]$$

Dengan penurunan persamaan sebagai berikut:

$tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{(b/2)}{h}$

$b = 2h \cdot tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$

$dA = b \cdot dh$

$= 2h \cdot tan\left(\frac{\theta}{2}\right).dh$

$dQ = v \cdot dA$

$= \sqrt{2g(H-h)} \cdot 2h \cdot tan\left(\frac{\theta}{2}\right).dh$

$Q = \sqrt{2g} \cdot 2tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^H h(H-h)^{\frac{1}{2}}.dh$

Integrasi parsial $\int u\,dv = uv - \int v\,du$

$u = h$, maka $du = dh$

$dv = (H-h)^{\frac{1}{2}}\,dh$, maka $v = -\frac{2}{3}(H-h)^{\frac{3}{2}}$

$=\sqrt{2g} \cdot 2tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int h(H-h)^{1/2}dh = \left[-\frac{2}{3}h(H-h)^{3/2}\right]_0^H - \int_0^H -\frac{2}{3}(H-h)^{3/2}dh$

$=\sqrt{2g} \cdot 2tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(0+\frac{2}{3}\right)\int_0^H (H-h)^{3/2}dh$

$=\sqrt{2g} \cdot 2tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{2}{3}\left[-\frac{2}{5}(H-h)^{5/2}\right]_0^H$

$=\sqrt{2g} \cdot 2tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{2}{3}\left(0-\left(-\frac{2}{5}H^{5/2}\right)\right)$

$= 2\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\sqrt{2g} \cdot \left(\frac{4}{15}H^{5/2}\right)$

$= \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot tan\frac{\theta}{2} \cdot H^{\frac{5}{2}} \qquad (1)$

Persamaan (1) menunjukkan bahwa besar debit aliran secara teoritis sangat dipengaruhi oleh konstanta gravitasi, sudut bukaan bentuk *notch*, dan tinggi muka air di atas ambang pangkat lima per dua. Rumus ini diturunkan secara matematis melalui pendekatan kalkulus. Prosesnya dimulai dengan mengidentifikasi hubungan geometri segitiga untuk menentukan elemen luas aliran, yang kemudian dikalikan dengan kecepatan aliran sesaat berdasarkan tinggi tekannya. Untuk mendapatkan total debit secara keseluruhan, persamaan elemen kecil tersebut diintegrasikan dari dasar hingga batas atas tinggi air menggunakan metode integrasi parsial, yang pada akhirnya membuktikan keabsahan rumus utama dengan konstanta pengali delapan per lima belas tersebut.Persamaan analitis untuk geometri setengah lingkaran atau *semi-circular weir* pada Persamaan (1) masih mempertahankan bentuk integral karena variasi lebar bukaan basahnya bersifat non-linier terhadap perubahan tinggi muka air. Berbeda dengan *notch* segiempat yang memiliki hubungan lebar fungsi linear yang konstan sehingga dapat disederhanakan secara aljabar, penampang segitiga memiliki batas dinding yang

eksponen di mana lebar efektif bendung berubah secara kontinu membentuk fungsi trigonometri akar kuadrat dan ketinggian air [6]. Akibatnya, fungsi luas penampang basah yang kompleks tersebut tidak dapat diintegrasikan secara analitis langsung menjadi satu rumus aljabar tunggal yang sederhana tanpa kehilangan akurasi geometrisnya, sehingga proses integrasi numerik pada batas atas tinggi muka air eksperimen tetap harus dilakukan untuk memperoleh nilai debit teoritis yang presisi.

Kecepatan teoretis fluida pada setiap titik kedalaman di bawah tinggi muka air (*head*) dinyatakan melalui persamaan berikut.

$$v = \sqrt{2gH} \quad (2) \quad [7][8]$$

Kecepatan rata-rata fluida aktual yang mengalir di atas ambang dapat ditinjau dengan rasio antara debit aktual dengan luas penampang basah dengan persamaan sebagai berikut.

$$v = \frac{Q}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

Untuk mengamati kondisi aliran yang mengalir di atas *crest*, digunakan bilangan-bilangan nondimensional yaitu bilangan Froude, Weber, dan Reynolds. Ketiga bilangan tersebut berturut-turut merepresentasikan rasio antara dominasi dari variabel inersia dengan gaya gravitasi**,** gaya tegangan permukaan**,** dan gaya viskositas atau kekentalan [9]**.** Pada konteks aliran yang mengalir di atas *crest*, digunakan radius hidraulik sebagai panjang karakteristik untuk meninjau efek dari dinding *weir* yang mempengaruhi karakteristik aliran yang mengalir, dan kedalaman hidraulik untuk meninjau efek saluran yang berbentuk *non-rectangular* [10]. Persamaan radius hidraulik dan kedalaman hidraulik pada *triangular notch* adalah sebagai berikut.

$$R_h = \frac{H \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2} \quad (4) \quad [9]$$

$$y_h = \frac{H^2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (5) \quad [9]$$

Dengan persamaan bilangan Froude, Weber, dan Reynolds adalah sebagai berikut [9].

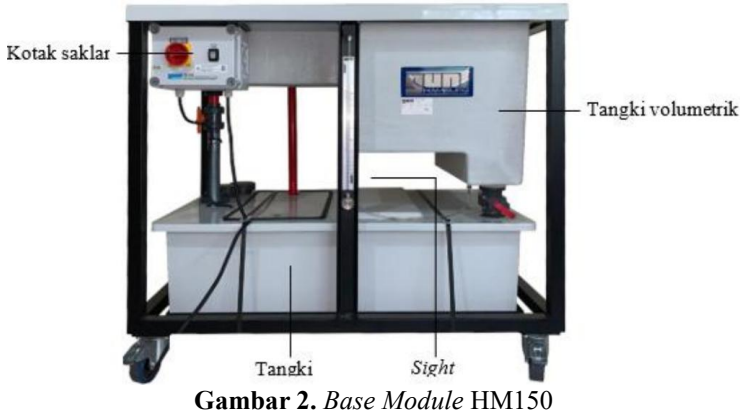
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times y_h}} \quad (5)$$

$$We = \frac{\rho \times v^2 \times R_h}{\sigma} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times R_h}{\mu} \quad (7)$$

2.3 Modul Pengujian

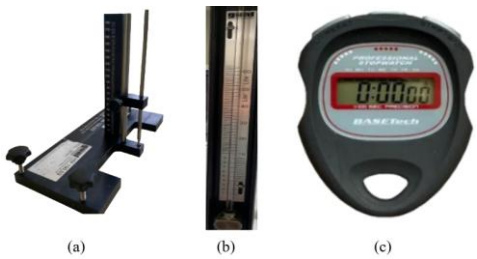
Untuk menguji plate *weir* ini menggunakan modul HM 150 seperti terlihat pada Gambar 2. Modul ini megandung storage *tank* sebagai sumber dan terdapat *submersible* pump untuk suplai fluida. Untuk suplai listrik modul ini membutuhkan 230 V~50Hz; dan daya 0,45 kW. Pompa *submersible* yang ada dalam *source tank* menghasilkan *head* sebesar 7 m dan debit 150 L/m^3.



Gambar 2. *Base Module* HM150

2.4 Alat Ukur

Pengukuran parameter hidrolis dalam pengujian laboratorium ini didukung oleh tiga alat ukur utama yang disusun secara berurutan pada Gambar 3 dari kiri ke kanan, yaitu *water level gauge*, *remote sight gauge*, dan *stopwatch*. Di sisi kiri, *water level gauge* berfungsi untuk mengukur elevasi permukaan air secara akurat terhadap titik acuan tertentu guna menentukan nilai tinggi muka air atau *head* pada saluran terbuka. Di bagian tengah, *remote sight gauge* yang berupa kolom pipa berskala terhubung langsung ke *volumetric tank* untuk menunjukkan volume air yang ditampung dari aliran pompa. Terakhir, di sisi kanan, *stopwatch* digunakan untuk menghitung durasi waktu yang dibutuhkan fluida dalam mengisi tangki tersebut, sehingga kombinasi data dari ketiga alat ukur ini secara keseluruhan dapat digunakan untuk menentukan laju aliran atau debit aktual volume air yang keluar melewati *weir*.



Gambar 3. Alat Ukur Pengujian Laboratorium (a) *Water Level Gauge*, (b) *Remote Sight Gauge*, dan (c) *Stopwatch*

2.5 Metode Analisis Data Eksperimental

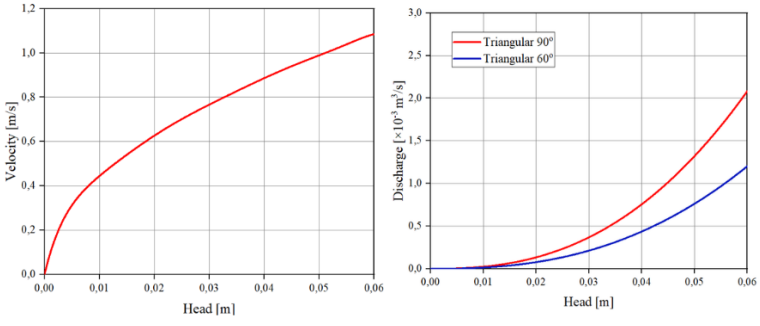
Penelitian oleh Shokrana et al., [11] melakukan *curve fitting* pada sebaran titik data eksperimental untuk membentuk suatu persamaan eksponensial empiris yang mampu menggambarkan hubungan non-linier antara laju aliran (*discharge*) dan tinggi muka air (*head*). Evaluasi tingkat akurasi dan kesesuaian model fiting ini diukur menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1, menunjukkan bahwa kurva pangkat empiris yang diusulkan sangat representatif dan akurat dalam memprediksi karakteristik laju aliran berdasarkan variasi *head* yang terjadi.

Penentuan nilai C_d secara keseluruhan dapat diperoleh secara langsung dari kemiringan garis (*slope*) regresi linear antara debit aktual hasil pengujian laboratorium dan debit teoritis [12]. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip teoritis bahwa debit aktual merupakan hasil perkalian antara debit teoritis dengan nilai koefisien debitnya. Metode statistik yang diterapkan adalah *Regression Through the Origin* (RTO), yaitu model regresi linear yang memaksa nilai intersep berada di titik nol (0,0) agar dapat merepresentasikan hubungan fisik yang akurat, di mana jika debit teoritis bernilai nol, maka debit aktual juga pasti bernilai nol. Melalui metode RTO ini, nilai kemiringan garis (*slope*) yang dihasilkan secara otomatis merepresentasikan nilai *discharge coefficient* global dari sistem *weir* tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pendekatan Analitis

Gambar 4a dan 4b menyajikan grafik hubungan nonlinier karakteristik hidrolika aliran terhadap tinggi muka air atau *head* pada pengujian *triangular notch weir*. Pada Gambar 4a, grafik hubungan antara kecepatan aliran dan *head* menunjukkan tren kenaikan berbentuk kurva akar pangkat dua yang melandai seiring bertambahnya tinggi air, mengonfirmasi keselarasan perilaku aliran eksperimental dengan prinsip dasar hukum Torricelli mengenai tinggi tekan. Sementara itu, Gambar 4b membandingkan pengaruh variasi sudut bukaan notch terhadap debit aliran di berbagai tingkat *head*, yang memperlihatkan bahwa variasi takik *Triangular* 90° menghasilkan laju debit eksponensial yang jauh lebih besar dan kurva yang lebih curam dibandingkan dengan variasi *Triangular* 60° akibat luas penampang basah yang lebih lebar pada tinggi *head* yang sama.

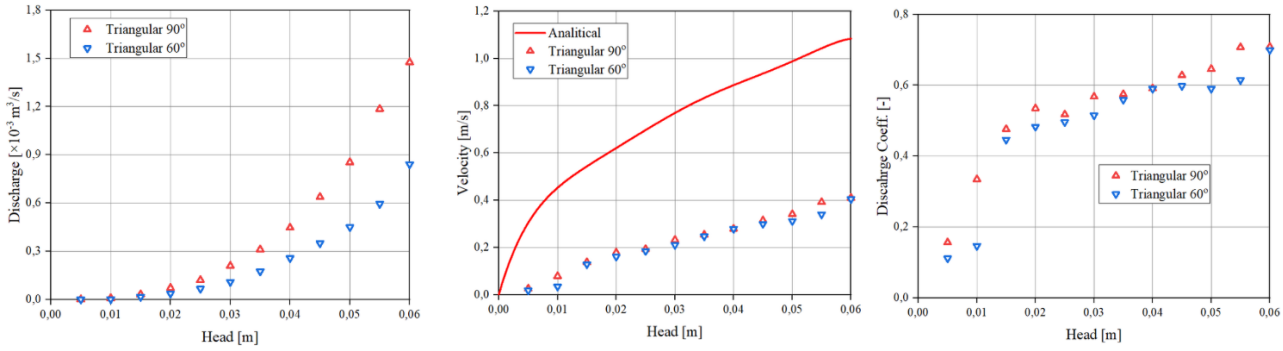


(a) (b)

Gambar 4. Kurva Pendekatan Analitis (a) Grafik Kecepatan Teoritis sebagai Fungsi *Head* dan (b) Grafik Debit Teoritis sebagai Fungsi *Head*.

3.2 Hasil Pengujian Eksperimental

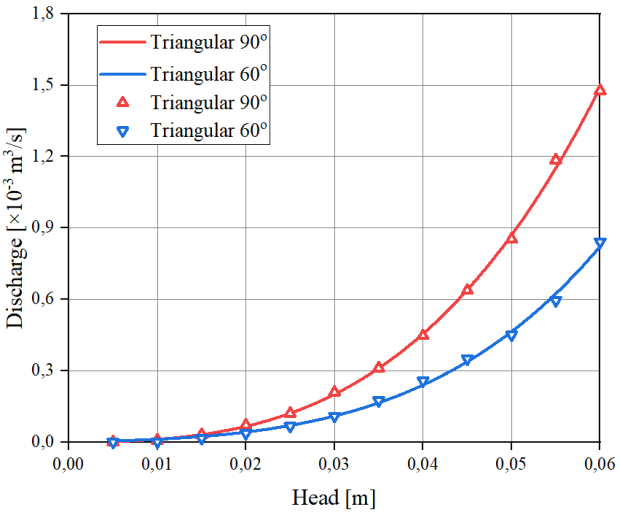
Analisis karakteristik aliran pada Gambar 5 menyajikan persebaran data eksperimental yang membandingkan karakteristik hidrolika aliran antara takik *triangular 90°* dan *triangular 60°* pada berbagai variasi tinggi muka air (*head*). Pada Gambar 5a, peningkatan *head* secara nonlinier mengeksponensialkan nilai debit aliran, di mana takik *triangular 90°* secara konsisten menghasilkan debit yang lebih tinggi dibandingkan *triangular 60°* pada setiap titik pembebanan. Tren serupa juga terlihat pada Gambar 5b, di mana kecepatan aliran meningkat seiring bertambahnya *head* dengan nilai kecepatan pada variasi sudut 90° sedikit berada di atas variasi 60°. Sementara itu, Gambar 5c menunjukkan bahwa nilai koefisien debit (*discharge coefficient*) kedua variasi mengalami kenaikan yang sangat signifikan pada rentang *head* rendah (di bawah 0,02 meter) sebelum akhirnya mulai bergerak melandai dan cenderung stabil pada rentang nilai 0,6 hingga 0,7 saat *head* mendekati 0,06 meter, dengan model *triangular 90°* secara umum mendominasi perolehan nilai koefisien tertinggi sepanjang pengujian.



Gambar 5. Grafik Data Eksperimental (a) Hubungan *Head* terhadap Debit (*Discharge*), (b) Hubungan *Head* terhadap Kecepatan (*Velocity*), dan (c) Hubungan *Head* terhadap Koefisien Debit (*Discharge Coefficient*).

3.3 Analisis Persamaan Empiris

Evaluasi karakteristik hidraulika makro pada seluruh variasi geometri *weir* dilakukan secara seragam melalui metode *curve fitting* non-linear fungsi pangkat. Berikut ini adalah kurva *discharge* aktual sebagai fungsi *head* dengan pendekatan *nonlinear curve fitting*.



Gambar 6. Grafik *Discharge* Aktual Sebagai Fungsi *Head* dengan Pendekatan *Nonlinear Curve Fitting*

Untuk memodelkan hubungan empiris antara tinggi muka air (*head*) dan debit aktual secara akurat, dilakukan analisis regresi nonlinier menggunakan persamaan *power law* pada Persamaan 7. Dalam persamaan ini, variabel *A* merupakan konstanta multiplikatif, *P* melambangkan nilai pangkat eksponensial empiris, dan *xc* berfungsi sebagai faktor koreksi pergeseran titik nol pada pembacaan instrumen *head*. Berdasarkan hasil *curve fitting* yang dirangkum dalam Tabel 1, kedua variasi geometri *weir* menunjukkan kesesuaian model yang sangat tinggi terhadap data eksperimen. Hal ini dibuktikan oleh perolehan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati sempurna, yaitu sebesar 0,999 untuk variasi *Triangular* 90°dan 0,997 untuk variasi *Triangular* 60°. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan.

$$Q_{actual} = a \cdot H^P \quad (7)$$

Tabel hasil analisis *nonlinear curve fitting* ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 1. Hasil Analisis *Nonlinear Curve Fitting* pada *Actual Discharge Weir*

Jenis *Weir*	*a*	*P*	R^2
Triangular 90º	5,32624	2,90907	0,999
Triangular 60º	3,44802	2,96892	0,996

Meskipun kedua jenis weir menunjukkan korelasi tren yang sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi yang sangat tinggi, parameter empiris yang dihasilkan memperlihatkan karakteristik nilai yang bervariasi akibat pengaruh geometri sudut bukaan. Pada variasi Triangular 90°, diperoleh nilai konstanta a sebesar 5,32624 dengan eksponen *P* senilai 2,90907 serta tingkat akurasi korelasi R kuadrat mencapai 0,999. Di sisi lain, variasi Triangular 60° menghasilkan nilai konstanta a sebesar 3,44802 dengan pangkat eksponensial *P* yang sedikit lebih tinggi yakni 2,96892 serta nilai R kuadrat sebesar 0,996. Perbedaan parameter empiris ini mengonfirmasi bahwa variasi sudut bukaan takik memengaruhi sensitivitas laju aliran terhadap perubahan tinggi tekan di atas bendung.

Secara keseluruhan, tingginya nilai koefisien determinasi pada kedua jenis weir membuktikan bahwa model persamaan empiris nonlinier yang terbentuk mampu merepresentasikan data pengujian laboratorium secara konsisten. Dengan nilai eksponen *P* yang berada di kisaran angka 2,9, hasil ini menunjukkan deviasi karakteristik terhadap persamaan teoritis murni akibat adanya faktor kontraksi dan rugi-rugi hidrolika pada aliran. Oleh karena itu, parameter konstanta dan eksponen hasil pendekatan kurva ini dapat diandalkan sebagai acuan kalibrasi untuk memprediksi debit aliran secara lebih presisi pada sistem saluran terbuka.

3.4 Analisis *Discharge Coefficient* Berbasis Regresi Linier

Hasil estimasi nilai koefisien debit global melalui metode pendekatan linearitas grafik debit aktual terhadap debit teoritis ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Hasil Analisis Regresi Linier pada *Actual Discarge Weir*

Geometri	Nilai *Slope* (Cd)	R^2
Triangular 90º	0,67815 ± 0,00582	0,99568
Triangular 60º	0,6381 ± 0,00688	0,99319

Analisis *discharge coefficient* dilakukan berbasis regresi linier untuk mengestimasi nilai koefisien debit global. Pendekatan ini dilakukan dengan memanfaatkan linearitas grafik yang mempertemukan data debit aktual hasil eksperimen langsung terhadap debit teoritis hasil perhitungan matematis. Melalui kemiringan garis regresi atau nilai *slope* yang terbentuk dari intersep nol, karakteristik efisiensi konversi energi potensial menjadi kinetik dari masing-masing geometri *weir* dapat ditentukan secara menyeluruh dan representatif.

Berdasarkan data yang dirangkum pada Tabel 2, hasil analisis menunjukkan tingkat akurasi pemodelan linier yang sangat kuat untuk kedua jenis geometri takik segitiga. Geometri *triangular* 90° menghasilkan nilai *slope* atau koefisien debit sebesar 0,67815 dengan nilai ketidakpastian plus minus 0,00582 serta didukung oleh koefisien determinasi yang sangat tinggi yaitu 0,99568. Sementara itu, geometri *triangular* 60° menghasilkan nilai koefisien debit global yang sedikit lebih rendah, yakni sebesar 0,6381 dengan nilai ketidakpastian plus minus 0,00688 dan tingkat korelasi linier sebesar 0,99319.

Perbedaan hasil parameter tersebut mengindikasikan secara objektif bahwa variasi takik *Triangular* 90° memiliki efisiensi pengaliran yang lebih optimal dibandingkan dengan variasi *Triangular* 60°. Nilai koefisien debit global yang lebih tinggi pada sudut 90° membuktikan bahwa kontraksi aliran dan rugi-rugi energi akibat turbulensi di sekitar ambang tajam cenderung lebih minim terjadi pada bukaan takik yang lebih lebar. Selain itu, nilai koefisien determinasi yang mendekati angka satu pada kedua pemodelan ini menegaskan bahwa pendekatan regresi linier antara debit aktual dan teoritis sangat valid untuk dijadikan acuan dalam memprediksi performa hidrolika sistem bendung.

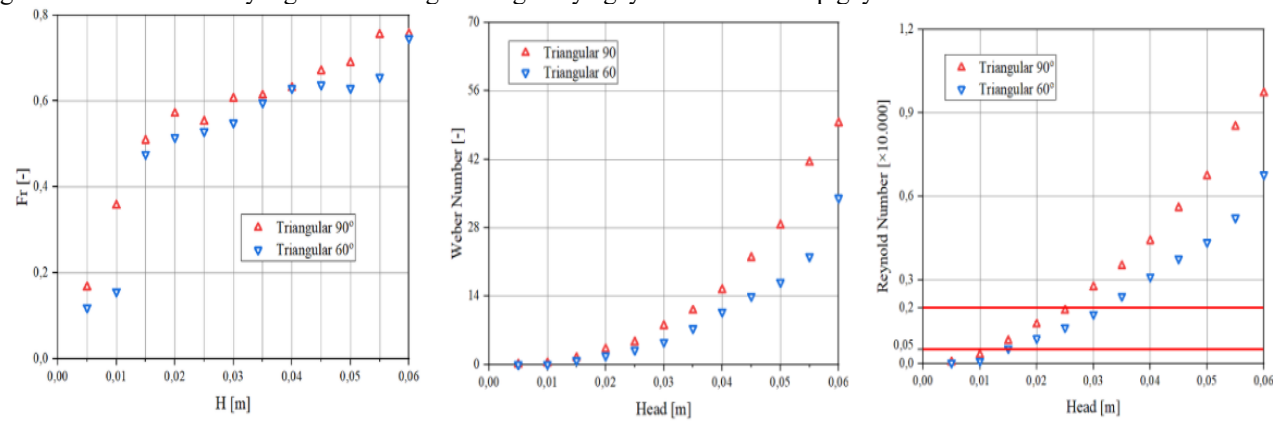
3.5 Analisis Kondisi Aliran Berbasis Bilangan Nondimensional

Gambar 7 menyajikan karakteristik bilangan nondimensional aliran yang melintasi ambang tajam segitiga dengan variasi takik *triangular* 90° dan *triangular* 60° sebagai fungsi dari tinggi muka air (*head*). Berdasarkan Gambar 7a, karakteristik Bilangan Froude menunjukkan tren peningkatan yang tajam pada fase awal pengujian saat *head* masih rendah, sebelum akhirnya bergerak melandai pada rentang head yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, nilai Bilangan Froude dari kedua variasi takik berada di bawah 1,0, yang menandakan bahwa aliran yang terjadi bersifat subkritis. Pada grafik ini terlihat bahwa variasi takik triangular 90º menghasilkan nilai Bilangan Froude yang lebih tinggi atau mendominasi di atas variasi triangular 60º pada sebagian besar titik pengamatan *head*. Hal ini menunjukkan pengaruh geometri bukaan terhadap karakteristik kecepatan dan kedalaman aliran pada penampang melintang saluran.

Pada Gambar 7b, karakteristik Bilangan Weber (We) menunjukkan tren kenaikan eksponensial yang searah dengan peningkatan *head* untuk kedua variasi geometri *weir*. Peningkatan ini menandakan bahwa pengaruh gaya inersia fluida berkembang jauh lebih dominan dibandingkan dengan gaya tegangan permukaan seiring menebalnya lapisan air di atas takik. Secara spasial, takik *triangular 90°* secara konsisten menghasilkan nilai Bilangan Weber yang lebih tinggi daripada variasi *triangular 60°* pada *head* yang sama. Kondisi tersebut mengonfirmasi adanya intensitas gaya inersia dan

momentum aliran yang lebih masif serta pembentukan pancaran bebas (*free nappe*) yang lebih kuat pada bukaan sudut yang lebih lebar.

Sementara itu, Gambar 7c memperlihatkan hubungan *head* terhadap Bilangan Reynolds (Re) yang merepresentasikan kondisi rezim kekentalan aliran fluida dengan pengali skala sebesar 10^4. Garis merah horizontal pada grafik membatasi zona transisi hidrolika, di mana nilai Bilangan Reynolds yang terus merangkak naik membuktikan perubahan rezim dari aliran laminar pada *head* sangat rendah menuju aliran turbulen sepenuhnya saat *head* melewati batas transisi. Nilai Bilangan Reynolds pada variasi *triangular 90°* yang secara konsisten berada di atas *triangular 60°* di sepanjang pengujian menegaskan bahwa friksi internal dan tingkat turbulensi aliran menjadi lebih aktif berkembang pada geometri bukaan takik yang besar seiring meningkatnya gaya inersia terhadap gaya viskos fluida.



(a) (b) (c)

Gambar 7. Kurva Karakteristik (a) Grafik Hubungan Froude *Number* terhadap *Head*, (b) Grafik Hubungan Weber *Number* terhadap *Head*, dan (c) Grafik Hubungan Reynolds *Number* terhadap *Head* untuk Kedua Jenis *Notch*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai *head* berbanding lurus secara nonlinier dengan peningkatan debit aliran eksperimen pada kedua variasi geometri, di mana penampang *triangular* 90° secara konsisten menghasilkan kapasitas pengaliran dan kecepatan aliran yang lebih besar dibandingkan dengan *triangular* 60° pada tinggi tekan yang sama. Variasi sudut bukaan *notch* berpengaruh signifikan terhadap nilai koefisien debit global (C_d) serta karakteristik bilangan nondimensional (Froude, Weber, dan Reynolds) akibat perbedaan kontraksi aliran, gaya inersia, dan hambatan gesek dinding takik, dengan geometri Triangular 90° yang terbukti memiliki efisiensi pengaliran tertinggi sedangkan Triangular 60° menghasilkan nilai C_d terendah. Perumusan persamaan empiris menggunakan metode *nonlinear curve fitting* juga berhasil memprediksi karakteristik debit aktual secara sangat akurat pada alat uji, yang dibuktikan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang secara konsisten mencapai angka 0,99 atau lebih pada kedua jenis penampang yang diuji.

5. Daftar Pustaka

[1] J. Pyo, S.-S. Baek, A. Abbas, H. G. Kim, J. Lee, S. Kim, J. A. Chun, and K. H. Cho, “Improving reservoir water quality by optimizing weir operations with reinforcement learning and SWAT,” *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 25, no. 4, p. 100679, Dec. 2025.

[2] D. Anderson, H. Moggridge, P. Warren, and J. Shucksmith, “The impacts of ‘run-of-river’ hydropower on the physical and ecological condition of rivers,” *Water and Environment Journal*, vol. 29, no. 2, pp. 268–276, Jun. 2015.

[3] H. Sohrabzadeh Anzani, S. A. Kantoush, A. Mahdian Khalili, and M. Hamidi, “Energy Dissipation Assessment in Flow Downstream of Rectangular Sharp-Crested Weirs,” *Water (Basel).*, vol. 16, no. 23, p. 3371, Nov. 2024.

[4] A. Nicosia, C. Di Stefano, M. A. Serio, and V. Ferro, “Effect of the crest height on the stage-discharge formula of rectangular and triangular sharp-crested weirs under free-flow conditions,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 93, p. 102421, Oct. 2023.

[5] Š. Pospíšilík, Z. Zachoval, and P. Gabriel, “Flow over thin-plate weirs with a triangular notch – influence of the relative width of approach channel with a rectangular cross-section,” *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 72, no. 2, pp. 199–206, Jun. 2024.

[6] J. Li, Y. Li, J. Han, T. Guo, W. Dai, and J. Chen, “Stage-discharge relationship for free flow over partially contracted rectangular sharp-crested weirs: Experimental study and accuracy improvement,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 110, p. 103330, Aug. 2026.

[7] D. Alvaro-Berlanga, R. Planet, and A. Fernandez-Nieves, “Torricelli’s experiment and conservation of momentum,” *Am. J. Phys.*, vol. 92, no. 7, pp. 493–497, Jul. 2024.

[8] S. Salehi, K. Esmaili, and A. H. Azimi, "Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 66, pp. 99–110, Apr. 2019.
[9] P. J. Pritchard, "Pritchard-Fox-McDonalds_2011_8ed_Fluid-Mechanics (1)," Nov. 2010.
[10] R. M. Qasim, A. A. Mohammed, and I. A. Abdulhussein, "An Investigating of the Impact of Bed Flume Discordance on the Weir-Gate Hydraulic Structure," *HighTech and Innovation Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 341–355, Sep. 2022.
[11] M. S. Bin Shokrana and E. Ghane, "An Empirical V-notch Weir Equation and Standard Procedure to Accurately Estimate Drainage Discharge," *Appl. Eng. Agric.*, vol. 37, no. 6, pp. 1097–1105, 2021.
[12] R. V. Raikar, "Head discharge relationship for inclined non-rectangular notches," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 58, pp. 97–103, Dec. 2017.