

## **PENGARUH PEMASANGAN TIGA TIPE SENSOR PLAT ORIFICE (KONSENTRIK, EKSENTRIK, SEGMENTAL) PADA PENGUKURAN ALIRAN**

### ***THE INFLUENCE OF INSTALLING THREE TYPES OF ORIFICE PLATE SENSORS (CONCENTRIC, ECCENTRIC, SEGMENTAL) ON FLOW MEASUREMENT***

**Rut Ratuk, V. Vekky R. Repi**

Program Studi Fisika Teknik, Universitas Nasional, Jakarta.

Email: vekky\_repi@civitas.unas.ac.id

#### **ABSTRAK**

Perhitungan laju aliran fluida dengan pembacaan tekanan yang hilang pada pipa yang direstriksi merupakan teknik yang paling umum digunakan dalam pengukuran aliran dalam industri. Plat *orifice* merupakan salah satu sensor yang dapat digunakan untuk membuat beda tekanan antara sisi *upstream* dan *downstream*. Pengaruh pengukuran aliran dengan menggunakan tiga tipe sensor plat *orifice* dapat dicapai bila input yang diberikan pada fluida yang berupa aliran meningkat dan berdampak pada nilai akhir dari sensor *orifice* tersebut yang berupa *pressure loss*. Dari penggunaan ketiga tipe sensor *orifice* konsentrik, eksentrik dan segmental, diperoleh sensor yang paling tepat digunakan pada fluida yang berupa air adalah sensor plat *orifice* dengan tipe konsentrik, dengan menghasilkan *pressure loss* yang lebih kecil dan ditandai oleh koefisien relatif yang cukup baik. Dari hasil percobaan penggunaan sensor plat *orifice* dengan tipe konsentrik menghasilkan output *pressure loss* berkisar 192.6 (Psi) – 119.6 (Psi).

**Kata kunci:** Sistem pengukuran, laju aliran, *pressure loss*, sensor *orifice*, konsentrik, eksentrik, segmental

## **ABSTRACT**

*The calculation of fluid flow rate by measuring pressure loss in a restricted pipe is the most commonly used technique for flow measurement in the industry. The orifice plate is one of the sensors that can create a pressure difference between the upstream and downstream sides. The impact of flow measurement using three types of orifice plate sensors can be observed when the input provided to the fluid, in the form of increased flow, affects the final output of the orifice sensor, which is the pressure loss. Among the three types of orifice sensors—concentric, eccentric, and segmental—the most suitable sensor for water is the concentric orifice plate sensor, which produces a smaller pressure loss and is characterized by a relatively good coefficient. The experiment results using the concentric orifice plate sensor yielded output pressure losses ranging from 192.6 Psi to 119.6 Psi.*

**Keywords:** *Measurement system, flow rate, pressure loss, orifice sensor, concentric, eccentric, segmental.*

## 1. PENDAHULUAN

Industri proses memegang posisi penting di sektor-sektor seperti minyak bumi, farmasi, pembangkit listrik, pengolahan makanan, dan lain-lain. Parameter fisik yang sering digunakan untuk memantau proses di industri antara lain adalah pengukuran laju aliran. Pengukuran aliran banyak dilakukan dalam sistem pompa (Melzer et al., 2020), tumpahan minyak laut (A.B. & Ovinis, 2020), reaktor air bertekanan (Orea et al., 2020), reaktor pengolahan air limbah (Kiss & Patziger, 2018), pembangkit listrik tenaga air (Adamkowski et al., 2019), dan banyak lagi. Aliran material dalam suatu proses atau sistem dapat diukur dengan berbagai metode, tergantung pada jenis material dan kondisinya, jenis aliran, volume, jangkauan, tekanan, suhu, akurasi, dan kontrol yang diperlukan. Pengetahuan tentang parameter-parameter ini sangat penting untuk memilih metode pengukuran aliran yang paling sesuai untuk aplikasi tertentu dalam kondisi spesifik.

Pengetahuan tentang jenis aliran dalam sebagian besar aplikasi, baik laminar (*Reynolds number* < 2000) atau turbulen (*Reynolds number* > 4000), sangat penting. *Flowmeters* tipe obstruksi (berbasis tekanan) bekerja berdasarkan prinsip percepatan fluida

dengan mengubah alirannya. Fluida dipercepat secara linier saat melewati penyempitan dalam pipa, yang mengakibatkan perubahan kecepatan, dan penurunan tekanan melintasi penyempitan diukur menggunakan pemancar tekanan diferensial. *Pelat orifice*, tabung *Venturi* (Santhosh & Roy, 2012b), aliran *nozzle*, V-kerucut dan irisan segmental bekerja berdasarkan prinsip ini (LaNasa & Upp, 2014). Kecepatan fluida sebanding dengan laju aliran volumetrik yang diberikan, dengan asumsi luas penampang yang diketahui dan kerapatan fluida yang konstan.

Setiap perangkat yang mampu mengukur kecepatan fluida secara langsung dapat menghitung laju aliran volumetrik fluida dalam pipa. *Flowmeter* berbasis kecepatan diklasifikasikan menjadi *flowmeter* magnetik, *flowmeter vortex* (LaNasa & Upp, 2014), dan *ultrasonic flowmeters* (Santhosh & Roy, 2012a).

Selain aplikasinya yang luas, pengukur aliran ini dapat digunakan untuk berbagai jenis cairan dan pada suhu tinggi. Pengukur aliran jenis lubang ini digunakan dalam injektor jet mesin roket untuk membentuk karakteristik jet yang diperlukan (Tharakan & Rafeeqe, 2016), pengukuran volume air yang diekstraksi dari sumur untuk keperluan irigasi (Su et al., 2021), memantau

pernapasan pasien saat menggunakan ventilasi buatan (Tardi et al., 2015), dan meter aliran juga digunakan dibanyak industri seperti farmasi, pengolahan makanan, pembangkit listrik, dan instalasi pengolahan air limbah (Vemulapalli & Venkata, 2022).

Perbedaan tekanan dari *plat orifice* digunakan oleh transmitter untuk mengkonversi tekanan menjadi sinyal elektronik yang akan diteruskan ke sistem pengendalian selanjutnya. Salah satu hal mendasar yang harus diperhatikan dalam pemasangan *plat orifice* adalah pemilihan tipe *plate orifice* yang tepat.

Hal yang perlu dipertimbangkan dalam perhitungan aliran dengan *plat orifice* `antara lain adalah bilangan Reynolds, jenis fluida, kecepatan aliran, gravitasi spesifik, densitas, viskositas, tekanan, diameter dan jenis pipa, serta *beta ratio* dari *plat orifice* (Vemulapalli & Venkata, 2022), (Medeiros et al., 2006).

Perubahan yang terjadi pada *pressure loss* ketika *input flow* meningkat, perubahan yang terjadi pada *beta ratio* ketika *input flow* meningkat, dan perubahan yang terjadi pada bilangan *Reynolds* ketika *input flow* meningkat, semuanya memiliki pengaruh terhadap nilai koefisien korelasi.

*Flowmeter orifice* adalah salah satu pilihan utama untuk pengukuran aliran karena kesederhanaannya, kekuatannya, dan kemampuannya untuk bertahan dalam kondisi cuaca ekstrem. Selain itu, alasan luasnya penggunaan *flowmeter orifice* adalah karena dapat digunakan untuk berbagai jenis fluida dan pada suhu tinggi.

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh pemasangan tiga jenis sensor *plat orifice* pada aliran tertentu. Penelitian mencakup tiga jenis sensor *plat orifice*, yaitu tipe konsentrik, eksentrik, dan segmental.

## 2. DASAR TEORI

Analisis fluida didasarkan pada pola gerak fluida dan gaya yang terkait dengan pola gerak tersebut. Secara umum, analisis yang tepat terhadap pola gerak aliran fluida untuk gaya dan kecepatan sering kali sulit dilakukan karena kompleksitas efek viskositas terhadap aliran. Oleh karena itu, penyederhanaan dari persamaan gerak dan persamaan kontinuitas diperlukan untuk mendapatkan solusi aliran.

Pendekatan yang umum digunakan adalah analisis satu dimensi yang mampu memberikan solusi umum yang memadai untuk banyak permasalahan aliran. Dalam analisis aliran satu dimensi, tekanan sering kali dianggap sebagai

gaya total per satuan luas, dan kecepatan dianggap sebagai kecepatan rata-rata di sepanjang aliran, bukan distribusi tekanan atau kecepatan pada penampang pipa. Pada aliran tunak (*steady state*), kecepatan dan tekanan hanya berubah sepanjang jarak searah dengan arah aliran. Dalam analisis *transient*, kita dapat mengidentifikasi osilasi gerakan fluida dan fluktuasi tekanan saat operasi dimulai, seperti saat membuka katup, menggunakan pompa, dan situasi serupa. Untuk mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan, biasanya diperlukan analisis dalam 2 atau 3 dimensi, meskipun penggunaannya dalam praktik jarang dilakukan..

Fluida adalah zat yang pada kondisi keseimbangan statisnya tidak dapat menahan tegangan geser (*shear stress*), betapa pun kecilnya, atau zat yang terus menerus terdeformasi saat terkena tegangan geser. Fluida memiliki tahanan yang sangat rendah terhadap perubahan bentuknya, yang disebabkan oleh viskositas fluida. Fluida *Newtonian* adalah contoh sifat fluida di mana tegangan geser berbanding lurus dengan laju deformasi atau laju regangan gesernya (Tanaka et al., 2017), (Almusallam et al., 2020).

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots [1]$$

dengan:

$\tau$  adalah tegangan geser (*shear stress*),

$y$  adalah jarak tegak lurus arah aliran,

$u$  adalah kecepatan aliran,

$\mu$  adalah viskositas (faktor konstanta perbandingan),

$x$  adalah jarak arah aliran

Aliran fluida *newtonian* dengan profil kecepatan yang terbentuk saat dinding 2 bergerak, sementara dinding 1 diam, dalam sebuah pipa. Secara fisik, fluida dapat diklasifikasikan menjadi cairan (Tod, 2002), gas (Ettouney & El-Rifai, 2011), dan uap, masing-masing dengan karakteristik uniknya (Cantwell, 2019), (Bonzanini et al., 2019).

Analisis secara teoritis saja biasanya tidak memberikan hasil yang optimal dalam persoalan hidraulik. Oleh karena itu, untuk mengatasi persoalan-persoalan praktis, kita menggunakan persamaan yang telah diperoleh secara empiris. Sebagai contoh, dalam mencari kerugian aliran. Gerakan fluida dijelaskan menggunakan beberapa persamaan, seperti persamaan energi dan persamaan kontinuitas.

Besar kecepatan pada titik  $P = V_1$  dan pada titik  $Q = V_2$ .  $A_1$  dan  $A_2$  adalah luas penampang. Aliran tegak lurus garis-garis arus pada titik  $P$  dan titik  $Q$  seperti pada Gambar 1. Jumlah massa yang

menembus tiap penampang haruslah sama.

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt}$$

sehingga

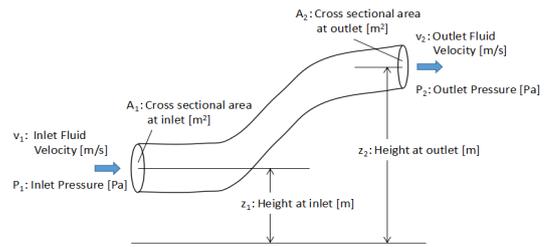
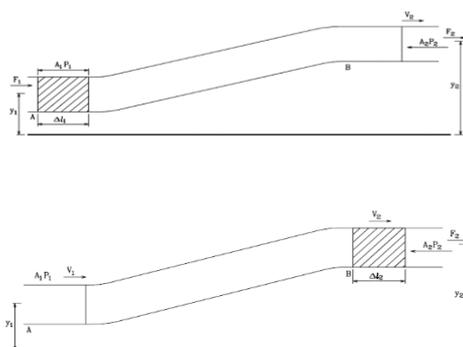
$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \dots\dots\dots [2]$$

Apabila fluida tak mampu mampat (*incompressible*), maka  $\rho_1 = \rho_2$ , dan  $AV = \text{tetap}$ , sehingga:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots [3]$$

Hubungan persamaan [3] diperoleh jumlah aliran dalam suatu sistem tidak berubah terhadap fungsi waktu, sehingga jumlah aliran di tiap bagian suatu sistem adalah konstan.

Aplikasi hukum kekekalan massa pada gerak fluida memberikan persamaan kontinuitas. Persamaan ini memberikan hubungan antara rapat massa  $\rho$ , kecepatan  $V$ , dan luas penampang  $A$ . Sebagai contoh, aliran yang tidak dapat dimampatkan (*incompressible*) dan tidak kental.



**Gambar 1. Fluida mengalir dari ujung A ke ujung B karena adanya beda tekanan. (Gentle et al., 2001), (Bernoulli's Principle : Basic Formula for Pump Head Calculation - Chemical Engineering Reviewer, n.d.)**

Gambar 1 menunjukkan bagian fluida sepanjang  $\Delta \ell_1$  terdorong ke kanan oleh gaya  $F_1 = A_1 P_1$  yang ditimbulkan tekanan  $P_1$ . Setelah selang waktu  $\Delta t$  kemudian, kita dapatkan ujung kanan sudah bergerak sejauh  $\Delta \ell_2$ . Gaya  $F_1 = A_1 P_1$  melakukan kerja  $W_1 = + A_1 P_1 \Delta \ell_1$ , sedangkan gaya  $F_2 = A_2 P_2$  melakukan kerja sebesar  $W_2 = - A_2 P_2 \Delta \ell_2$ . Jadi kerja total yang dilakukan adalah sebesar  $\Delta W = A_1 P_1 \Delta \ell_1 - A_2 P_2 \Delta \ell_2$ . Jika fluida bersifat *incompressible* maka, volume  $A_1 \Delta \ell_1 = A_2 \Delta \ell_2$ . Jika  $m$  adalah massa dari fluida dalam volume ini, energi kinetik total adalah sama dengan jumlah perubahan energi kinetik dan energi potensial. Jadi karena  $\Delta W = \Delta E$ , maka:

$$(P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g y_1) = (P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g y_2) \dots\dots\dots [4]$$

dapat disederhanakan dengan mengambil sembarang di dua tempat, maka dapatlah ditulis secara umum:

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g y = \text{konstan} \dots\dots\dots [5]$$

Persamaan [5] merupakan Persamaan *Bernoulli*, yang memberi hubungan antara tekanan  $P$ , kecepatan aliran  $V$ , dan ketinggian/elevasi  $y$ . Di mana pada persamaan [5],  $\rho$  adalah masa jenis fluida dan  $g$  adalah percepatan gravitasi, sebesar 32.2 ft/ s<sup>2</sup> atau 9.8 m/s<sup>2</sup>.

Terjadi *irreversibilitas* pada aliran *steady incompressible* di dalam pipa yang merupakan energi yang hilang dari aliran, di mana energi ini tidak dapat diperoleh kembali. Kehilangan ini penting untuk aliran di dalam pipa, karena untuk dapat mentransmisikan fluida mencapai jarak tertentu diperlukan tekanan minimum yang bergantung pada faktor kehilangan energi selama perjalanannya.

**Major loses / friction loses pada aliran**

Kehilangan energi karena gesekan antara dinding sebelah dalam pipa dengan fluida dapat didekati dengan menggunakan persamaan Darcy Weisbach (Haktanir & Ardiçlioğlu, 2004), (Choo et al., 2021):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \dots\dots\dots [6]$$

dengan:

$h_f$  adalah energi yang hilang sepanjang aliran,

$L$  adalah panjang pipa (ft.),

$D$  adalah diameter pipa sebelah dalam (diameter dalam) (ft.),

$V$  adalah kecepatan aliran rata-rata (ft./s),

$f$  adalah faktor friksi dari pipa,

$g$  adalah percepatan gravitasi, sebesar 32.2 ft/ s<sup>2</sup> atau 9.8 m/s<sup>2</sup>

Faktor friksi  $f$  pada persamaan Darcy Weisbach sangat penting untuk aliran ini, yaitu faktor yang menghasilkan kehilangan energi *drop* yang sesuai dengan hasil.

Faktor friksi adalah faktor tak berdimensi, maka parameter – parameternya dapat dibuat atau digabungkan menjadi parameter tak berdimensi yaitu adalah bilangan *Reynolds* dengan hubungan seperti pada persamaan (7) (Valdés et al., 2014).

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} \dots\dots\dots [7]$$

Kekasaran dinding bagian dalam pipa sukar ditentukan secara teori karena sangat kompleks dalam menentukan faktor friksi. Maka kekasaran dinding pipa dicari dengan cara percobaan, dimana dengan percobaan itu didapat harga faktor friksi dari  $f$  untuk bilangan *Reynolds* tertentu  $R$ . Kemudian hasil percobaan ini dimasukkan dalam

percobaan Colebrook (Wu et al., 2019), (Haktanir & Ardiçlioğlu, 2004).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.86 \ln \left( \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots [8]$$

Dari persamaan Colebrook didapat harga absolut kekasaran dinding pipa untuk bermacam-macam bahan pipa.

Percobaan *Colebrook* ini sesuai dengan persamaan diatas dan dipakai sebagai dasar diagram *Moody* untuk faktor friksi sebagai fungsi dari bilangan *Reynolds* dan kekasaran relatif dinding pipa. Ada dua macam pola aliran fluida, yaitu aliran laminar dan aliran turbulen . Aliran laminar terjadi pada bilangan *Reynolds* kurang dari 2000, sedangkan aliran turbulen pada bilangan *Reynolds* lebih dari 4000. Di antara kedua nilai itu terjadi aliran transisi laminar turbulen, yaitu antara  $2000 < R > 4000$  (Gao & Wu, 2019), (Brkić & Praks, 2018).

**Energi yang hilang dalam aliran laminar**

Faktor gesekan dengan dinding pipa tidak berpengaruh dalam aliran laminar, karena dalam aliran laminar terbentuk lapisan laminar atau lapisan tipis yang menutupi tonjolan-tonjolan dinding pipa bagian dalam. Sehingga, kekasaran dinding pipa tidak mempengaruhi nilai faktor gesek atau

faktor friksi. Lapisan laminar menutupi seluruh tonjolan dinding pipa dengan lengkap, dan pipa dengan dinding bagian dalam yang halus memiliki faktor gesek yang sama dengan pipa lainnya.

Nilai faktor gesek untuk aliran laminar hanya bergantung pada bilangan *Reynolds* saja, sesuai dengan hasil percobaan yang ditampilkan pada Diagram *Moody*. Nilai faktor gesek untuk aliran laminar dapat dihitung atau diturunkan dari persamaan (9) dan (10) *Hagen-Poiseuille* (Foucault & Szeger, 2019).

$$V = \frac{\Delta p R^2}{8\mu L} \dots\dots\dots [9]$$

$$\text{Head loses } h_f = \frac{\Delta p f}{\gamma} \dots\dots\dots [10]$$

sementara faktor gesek adalah sebesar:

$$f = \frac{64}{R} \dots\dots\dots [11]$$

**Energi yang hilang dalam aliran turbulen**

Bila bilangan *Reynolds* melampaui batas minimum *R* untuk daerah aliran turbulen, lapisan sub-laminar di dalam pipa yang kasar dapat diabaikan. Setiap tonjolan kekasaran pipa menyebabkan terjadinya turbulensi. Aliran menjadi turbulen penuh pada daerah ini, dan faktor gesek *f* menjadi konstan meskipun bilangan *Reynolds* semakin besar. Ini berarti bahwa

viskositas fluida tidak mempengaruhi faktor gesek  $f$  pada aliran turbulen penuh. Jadi untuk pipa kasar energi yang hilang dapat ditulis:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots [12]$$

dengan,

$f$  adalah konstanta gesek untuk kekasaran relatif pipa tertentu.

Untuk pipa yang halus, faktor gesek  $f$  tidak konstan seperti pada pipa kasar, tetapi fungsi dari bilangan *Reynolds*. Blasius mengoreksi secara percobaan dan memajukan formula empirisnya untuk faktor gesek yang berlaku pada  $R \pm 100.000$ . Formula Blasius (Jaguaribe, 2022):

$$f = \frac{0,316}{R^{1/4}} \dots\dots\dots [13]$$

Jadi pada aliran turbulen terdapat  $f$  yang berlainan untuk kekasaran relatif tertentu.

**Energi yang hilang sepanjang pipa**

Instalasi pipa yang sebenarnya terdiri dari pipa lurus dan sambungan-sambungan seperti *fitting* T (*tee*), atau L (*elbow*), *valve*, dan bentuk lainnya. Oleh karena itu, perlu untuk membahas tahanan gesekan melalui sambungan-sambungan tersebut (Jaguaribe, 2022), (Jaguaribe, 2022), (Xu et al., 2021). Energi yang hilang karena tahanan gesek pada sambungan-sambungan tersebut

secara konvensional disebut *minor losses*. Energi yang hilang di sini sebagian besar dicari secara percobaan, kemudian dinyatakan dalam perbandingan dengan kuadrat kecepatannya.

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots [14]$$

**Energi yang hilang karena pembesaran dan pengecilan diameter pipa**

Bila aliran fluida melalui suatu perubahan diameter pipa seperti pembesaran (*expander*) dan pengecilan (*reducer*) diameter pipa, maka terjadi suatu kehilangan energi karena adanya turbulensi.

Kehilangan energi yang dihasilkan oleh pengurangan kecepatan ( $V_2 - V_1$ ) karena pembesaran diameter pipa dari  $D_1$  ke  $D_2$ , dinyatakan dengan:

$$h_f = [1 - (\frac{D_1}{D_2})^2] \frac{V_1^2}{2g} = K \frac{V_1^2}{2g} \dots\dots\dots [15]$$

Harga  $K$  didapatkan dari percobaan dan teori yang dibandingkan (Warnecke et al., 2021), (Mika & Sołek, 2019).

Energi yang hilang pada pengecilan diameter pipa dirumuskan oleh Marrison (Brightmore, 1907), sebagai berikut:

$$h_f = K \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots [16]$$

dengan  $C_e$  = koefisien kontraksi.

Selain percobaan yang dilakukan oleh Marriman, Weisbach dan Brightmore (Brightmore, 1907) juga memberikan formula yang berbeda untuk menghitung kehilangan energi akibat penyempitan atau pengecilan pipa ini. Brightmore menyatakan bahwa energi yang hilang pada penyempitan pipa kira-kira 70% dari penurunan energi pada pembesaran pipa. Sedangkan Weisbach menyatakan bahwa koefisien kontraksi merupakan fungsi dari perbandingan luas penampang (Wong, 1996),

Perbedaan hasil faktor  $K$  disebabkan karena kondisi pipa yang sebenarnya sulit untuk ditentukan, seperti esentriksitas penampang, kekasaran dinding pada penyempitan pipa, dan sebagainya. Dalam praktiknya, nilai  $K$  disesuaikan dengan pabrik pembuat pipa, seperti yang dilakukan Weisbach untuk pabrikan Crane Co dan lain sebagainya.

### **Energi yang hilang pada *inlet* and *outlet* pipa.**

Kehilangan energi dalam aliran terjadi pada *inlet* dan *outlet* pipa. Energi yang hilang pada *inlet* digunakan untuk mempercepat fluida dari kecepatan rendah dalam reservoir ke kecepatan dalam pipa, ditambah dengan terjadinya turbulensi pada *inlet* pipa. Kecepatan fluida sebelum memasuki *inlet* pipa sangat rendah dan dalam beberapa kasus

dapat dianggap mendekati nol, karena penampang reservoir jauh lebih besar daripada penampang pipa. Praktiknya, kecepatan fluida dalam pipa tidak selalu sama dengan teori ini karena adanya penurunan energi pada *inlet* (Alawee et al., 2020).

### **Laju Aliran Melalui Lubang Restriksi Pada Pipa.**

Fluida yang mengalir dalam suatu pipa dan menuju lubang restriksi mengalami kenaikan tekanan, yang kemudian turun secara tiba-tiba setelah melewati lubang restriksi tersebut. Tekanan kembali naik dan mencapai titik maksimum pada jarak sekitar  $\pm 8$  kali diameter pipa. Namun, tekanan ini tidak mencapai tingkat semula sebelum lubang restriksi. Penurunan tekanan ( $\Delta P$ ) meningkat ketika laju aliran naik, dan akan hilang ketika tidak ada aliran. Perubahan tekanan yang terjadi berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran, sehingga jika semua faktor dalam aliran fluida tetap atau konstan, maka  $\Delta P$ -nya berbanding lurus dengan kuadrat laju alirannya (Ebrahimi et al., 2017), (Campos et al., 2014).

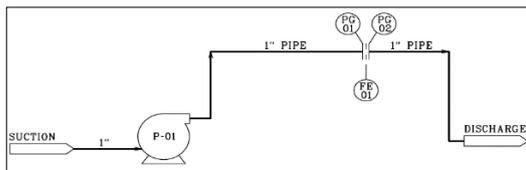
## **3. METODE EKPERIMEN**

### **Perencanaan Miniatur Sistem**

Miniatur sistem yang dibuat terdiri dari komponen-komponen pompa air,

rangkaian sistem perpipaan, sensor plat *orifice*, *pressure gauge*, seperti terlihat pada gambar 1.

Fluida yang dialirkan adalah air pada temperatur 26.7°C. Volume aliran pada miniatur sistem relatif meningkat. Jarak *upstream* dan *downstream* sudah diketahui yaitu, 22.291" untuk *Upstream* dan 8.37" untuk *downstream*. Jenis *tap* adalah *vena contracta taps*, dengan jarak dari *plat orifice* adalah 1 × diameter pipa (1") pada sisi *upstream* dan 0,4" pada sisi *downstream*.



**Gambar 1. P & ID Miniatur Sistem Pemipaan Pengukuran Aliran Air.**

**Tabel 1. Data Input**

<b>Fluid</b>	<b>Water</b>
<i>Maximum liquid flow</i>	30-125 Psig
<i>Normal liquid flow</i>	29-124 Psig
<i>Flow temperature</i>	26.7 degC
<i>Inlet pressure</i>	10 psig
<i>Differential range</i>	231.405 inH2O
<i>SG @ flow conditions</i>	0.9978
<i>SG @ base conditions</i>	1
<i>Viscosity @ FTP</i>	0.8563 cp
<i>Pipe inside diameter</i>	1.049 in
<i>Orifice diameter</i>	0.3937 in
<i>Base Pressure</i>	14.696 psia
<i>Base temperature</i>	59 degF
<i>Barometer pressure</i>	14.7 psia
<i>Element material</i>	Carbon steel
<i>Pipe material</i>	Carbon steel

Data-data dari pompa dan pipa sebagai masukan dalam melakukan pembuatan data *sheet*. Selanjutnya dengan mengacu pada data *sheet* tersebut dilakukan *sizing* dengan menggunakan *software INSTRUCALC ISO Flow Element, Release 4*. Dari hasil kalkulasi *sizing* tersebut *plat orifice* bisa difabrikasi. Pemilihan *pressure gauge* sebagai sensor yang akan mengukur beda tekanan antara sisi *upstream* dan sisi *downstream*-nya harus disesuaikan dengan tekanan aliran di dalam pipa pada kondisi tekanan maksimum.

Perhitungan jarak minimum *upstream* dan *downstream* pada sistem pengukuran aliran air di dalam pipa diperlukan untuk mendapatkan aliran yang laminar sehingga memberikan beda tekanan yang baik. Perhitungan jarak minimum *upstream*, untuk mendapatkan jarak minimum *upstream* dengan minor *loses* yang tidak mengganggu besar tekanannya maka dilakukan langkah-langkah perhitungan dengan mencari harga faktor friksi *f*. Harga *f* dicari untuk mendapatkan aliran di dalam pipa pada kondisi laminar yang artinya jumlah bilangan *Reynolds* harus = 2000 sehingga diperoleh  $f = 0.032$ .

Harga *K* dapat diperoleh dengan menggunakan diagram Moody, dimana untuk pipa 1 *inc schedule 40* dengan diameter dalam 1.049 *in* didapatkan

harga  $K = 0.68$ . Dengan  $D$  adalah diameter dalam pipa = 1.049 in, maka nilai  $L = 21.25D = 21.25 \times 1.049 = 22.291$  in (566.20 mm) ini adalah nilai minimum pipa lurus pada sisi *upstream* tanpa adanya *minor losses* yang disyaratkan, sehingga diperoleh jumlah bilangan *Reynolds* sebesar 2000.

Jarak minimum *downstream* didapatkan dengan *minor losses* yang tidak mengganggu besar tekanannya maka dilakukan langkah-langkah mencari nilai faktor friksi  $f$ . Harga  $f$  dicari untuk mendapatkan aliran didalam pipa pada kondisi laminar yang artinya jumlah bilangan *Reynolds* harus = 2000. Mencari harga koefisien resistansi  $K$  dapat diperoleh dengan menggunakan Diagram Moody, dimana untuk pipa 1 in *schedule* 40 dengan diameter dalam 1.049 in didapatkan harga  $K = 0.68$ .

Mencari jarak *minimum downstream*. Dengan  $D$  adalah diameter lubang *plat orifice* = 0.3914 in. Nilai  $L = 21.25D = 21.25 \times 0.3937 = 8.37$  in (212 mm) atau jika dibandingkan dengan diameter dalam pipa adalah sebesar  $8D$ . Ini adalah nilai minimum pipa lurus pada sisi *downstream* tanpa adanya *minor losses* yang disyaratkan, sehingga diperoleh jumlah bilangan *Reynolds* sebesar 2000.

Untuk tujuan analisa maka pada miniatur sistem aliran air diberikan *minor losses* yang berupa pemasangan *elbow* 90° yang jaraknya kurang dari jarak minimum, dan di berikan perubahan *flow* pada *input* dengan penambahan 5 (l/m) pada setiap kali percobaan.

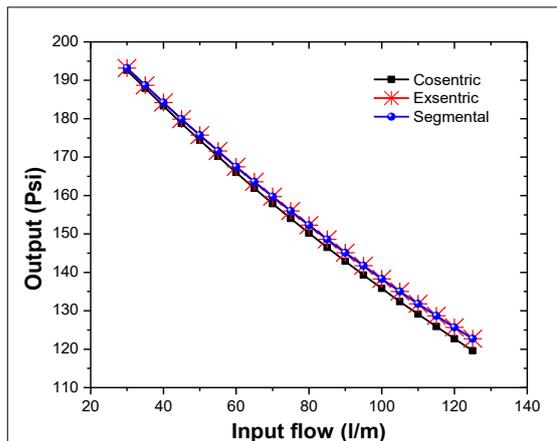
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Pengujian Miniatur Sistem

Hasil pengujian miniatur sistem berupa hasil pengukuran *loss pressure* pada pemasangan tiga tipe *plat orifice* yang sesuai dengan rekomendasi. Pengambilan data diambil dari suatu data yang telah tersedia, pada kondisi temperatur ruangan sebesar 27°C dan kelembaban (RH / *Relative Humidity*) sebesar 70% pada *Psychrometer*. Pada tabel 2, dengan *input flow* 125 l/m diperoleh *output maximum pressure loss* tertinggi pada jenis plat eksentrik dan segmentel sebesar 122.7 Psi, sedangkan konsetrik sebesar 119.6 Psi.

**Tabel 2. Data Input - Output Sensor Plat Orifice**

No.	Input Flow (l/m)	Output max. pressure loss (Psi)		
		Konsentrik	Eksentrik	Segmental
1	39	192.6	193.2	193.2
2	35	187.9	188.7	188.7
3	40	183.3	184.2	184.2
4	45	178.8	179.9	179.9
5	50	174.4	175.7	175.7
6	55	170.2	171.6	171.6
7	60	166	167.5	167.5
8	65	161.9	163.6	163.6
9	70	157.9	159.7	159.7
10	75	154	156	156
11	80	150.2	152.3	152.3
12	85	146.5	148.6	148.6
13	90	142.9	145.1	145.1
14	95	139.3	141.7	141.7
15	100	135.8	138.3	138.3
16	105	132.4	135	135
17	110	129.1	131.8	131.8
18	115	125.9	128.7	128.7
19	120	122.7	125.7	125.7
20	125	119.6	122.7	122.7



**Gambar 2. Perbandingan input flow – output pressure loss**

### Hasil Analisis dari ketiga Sensor Plat Orifice

Hasil pengujian miniatur sistem pada tabel 2 dan gambar 2 dan berupa hasil pengukuran *pressure loss* terhadap *flow* pada pemasangan tiga tipe *plat orifice* yang sesuai dengan rekomendasi diatas menghasilkan analisis bila *input flow* pada miniatur tersebut meningkat maka

*pressure loss* yang dihasilkan akan kecil, dan sebaliknya bila *input flow* pada miniatur tersebut menurun maka *pressure loss* yang dihasilkan akan membesar ini berhubungan dengan prinsip Bernoulli yang mengatakan bahwa pada suatu aliran fluida, peningkatan pada kecepatan fluida akan menimbulkan penurunan tekanan pada aliran tersebut. Bila *input flow* pada miniatur tersebut meningkat maka dapat berdampak pula pada nilai *beta ratio* ( $d/D$ ) yang mempunyai rentang ideal antara 0.2 – 0.65, karena dengan pemberian *input* yang meningkat pada pipa akan menghasilkan permintaan ruang atau diameter pipa dan diameter dari *orifice* yang besar pula. Karena *beta ratio* adalah perbandingan antara diameter bor dari sensor *plat orifice* dan diameter dalam dari pipa.

Untuk memahami efek kerja rasio beta dilakukan oleh banyak peneliti. Michael Reader-Harris et al. (Reader-Harris et al., 2012) telah melaporkan bahwa aliran melalui pelat yang bersih dan terkontaminasi memiliki lokasi vena-contracta dan nilai koefisien pelepasan yang berbeda. Variasi diameter pipa atau diameter lubang memiliki dampak signifikan terhadap kinerja *flowmeter*.

Pada tekanan diferensial melintasi lubang menurun ketika *beta ratio* meningkat dan koefisien pelepasan

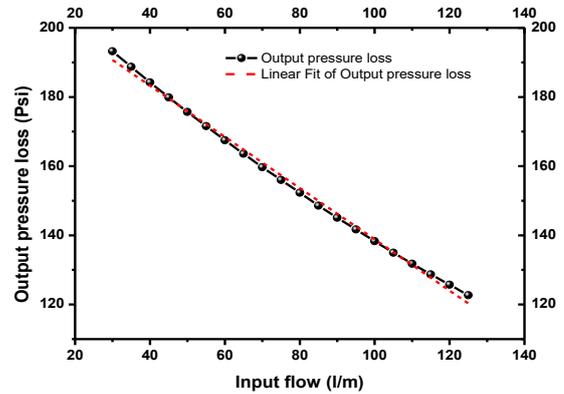
meningkat. Selanjutnya, juga diamati bahwa kehilangan tekanan berkurang dengan meningkatnya *beta ratio*. Juga ditemukan bahwa rasio bervariasi berdasarkan aplikasi (Vemulapalli & Venkata, 2022)

Untuk menghindari gangguan ini, pipa lurus panjang di hulu dan hilir harus digunakan, tetapi ini akan meningkatkan biaya pemasangan. Oleh karena itu untuk menghindari hal ini, *flow conditioner* adalah alternatif terbaik. Dengan porositas 51,58% dan lokasi hulu lima kali diameter pipa memberikan hasil yang cukup besar untuk koefisien pelepasan yang diukur.

Menurut standar ISO, lengkungan lurus yang sesuai pada pipa hulu dan hilir diperlukan untuk menjaga aliran yang sepenuhnya terbentuk. Panjang yang dibutuhkan adalah 25D-40D di hulu elemen dan 4D-5D di hilirnya masing-masing (Vemulapalli & Venkata, 2022).

Stefano Malavasi et al. telah mempelajari pengaruh bilangan Reynolds, ketebalan, *beta ratio*, jumlah lubang, dan distribusi lubang terhadap kehilangan tekanan pada *flowmeter orifice*. Bilangan Reynolds yang rendah mempengaruhi koefisien kehilangan tekanan sementara pada angka Reynolds yang tinggi, koefisien kehilangan tidak bergantung satu sama lain dengan catatan tidak terjadi kavitasasi pada perangkat

tersebut. Kehilangan tekanan merupakan fungsi dari *beta ratio* dan juga koefisien kehilangan menurun dengan peningkatan rasio ketebalan/diameter serta jumlah lubang (Malavasi et al., 2012).



Gambar 3. Perbandingan *Flow – Pressure loss* tipe segmental.

Hasil miniatur percobaan ini menghasilkan data bilangan Reynolds berkisar antara 1977 s/d 11521, dengan data bilangan Reynolds tersebut dapat disimpulkan bahwa, dengan memberikan *input* aliran yang meningkat dapat berdampak pula pada bilangan Reynolds dan pola aliran. Bilangan Reynolds yang mengatakan bahwa aliran yang mempunyai bilangan kurang dari 2000 disebut *laminer*, dan aliran yang mempunyai bilangan Reynolds di atas 4000 adalah turbulen, diantara dua nilai bilangan tersebut terjadi aliran transisi laminer turbulen, yaitu antara  $2000 < R < 4000$ . *Pressure loss* yang terjadi pada miniatur percobaan ini dapat pula dihasilkan karena faktor gesek antara pipa dan fluida serta kecepatan aliran yang

mengalir di dalamnya atau dapat di sebut juga dengan faktor gesek.

Studi tentang koefisien *pressure loss* yang melalui lubang plat umumnya dilakukan pada angka Reynolds yang tinggi dalam orde  $10^5$ . Dalam penelitian yang dilakukan oleh Emrah Ozahi, penurunan *pressure loss* pada bilangan

Reynolds, sedang yaitu  $2500; \leq Re_m \leq 9500$  (Özahi, 2015)

Gambar 3, keluaran *pressure loss* yang di hasilkan oleh ketiga tipe sensor *plat orifice* didalam miniatur sistem pemipaan ini menghasilkan nilai koefisien relatif yang sama yaitu,  $R^2 = 0.9965$ .

**Tabel 3. Hasil Perhitungan Statistik dari Tipe Plat Orifice**

<i>Output pressure loss</i>	<i>Concentric</i>		<i>Eccentric</i>		<i>Segmental</i>	
	<i>Value</i>	<i>Standard error</i>	<i>value</i>	<i>Standard error</i>	<i>value</i>	<i>Standard error</i>
<i>Intercept</i>	212.0547	0.87421	212.9059	0.8559	212.9059	0.8559
<i>Slope</i>	-0.75674	0.01034	-0.74072	0.01035	-0.74072	0.01035
<i>Adj. R-Square</i>	0.99665		0.9963		0.9963	

Data koefisien relatif dapat juga menghasilkan nilai korelasi yang sangat erat didapatkan dari data yaitu  $R = 0.99$ . Ini membuktikan bahwa ada hubungan yang erat antara pemberian input flow dengan output yang berupa *pressure loss* pada percobaan ini.

Maka dapat di analisa bahwa, penggunaan sensor *plat orifice* tipe eksentrik dan segmental tidak bisa di berlakukan pada fluida air, seperti yang dilakukan pada analisis miniatur sistem pemipaan ini, karena fluida yang di pakai pada analisis ini tidak sesuai dengan tipe yang seharusnya dipakai untuk pengukuran pada sensor *plat orifice* tipe eksentrik dan segmental.

## 5. KESIMPULAN

Studi tentang pengaruh penggunaan ketiga jenis sensor plat orifice telah dilakukan dalam. Data *output* dari miniatur sistem pemipaan terhadap ketiga sensor *plat orifice* terlihat menghasilkan tren yang sama, tren yang sama ini dilihat dari data antara *flow* dengan *pressure loss* yang di gambarkan pada grafik. Untuk tipe konsentrik dengan *input flow* berkisar  $30(l/m) - 125 (l/m)$  menghasilkan *output pressure loss* berkisar  $192.6 (Psi) - 119.6 (Psi)$ , dengan koefisien relatif  $R^2 = 0.9965$ . Untuk tipe eksentrik dengan *input flow* berkisar  $30(l/m) - 125 (l/m)$  menghasilkan *output pressure loss* berkisar  $193.2 (Psi) - 122.7$

(Psi), dengan koefisien relatif  $R^2 = 0.9965$ . Untuk tipe *Segmental* dengan *input flow* berkisar 30(l/m) – 125 (l/m) menghasilkan *output pressure loss* berkisar 193.2 (Psi) – 122.7 (Psi), dengan koefisien relatif  $R^2 = 0.9965$ . Dari data percobaan penggunaan sensor *plat orifice* yang paling tepat dalam percobaan ini, yang menggunakan media air sebagai fluidanya adalah sensor *plat orifice* dengan tipe konsentrik yang menghasilkan *output pressure loss* berkisar 192.6 (Psi) – 119.6 (Psi).

Penelitian selanjutnya perlu dilakukan untuk dengan memperhatikan kebocoran pada tiap-tiap sambungan pipa juga harus minimalisasi semaksimal mungkin untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat. Penggunaan tipe *plat orifice* yang sesuai dengan jenis fluida pada suatu aliran menghasilkan data luaran yang akurat. Analisis lebih lanjut, perlu dilakukan untuk mengetahui *flow* dan *pressure loss* dengan variasi pipa bercabang banyak.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Univeritas Nasional atas dukungan dana penelitian skema Stimulus Universitas Nasional Jakarta.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- A.B., O., & Ovinis, M. (2020). A review of in-situ optical flow measurement techniques in the Deepwater Horizon oil spill. *Measurement*, 153, 107396. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107396>
- Adamkowski, A., Janicki, W., Krzemianowski, Z., & Lewandowski, M. (2019). Flow rate measurements in hydropower plants using the pressure-time method – Experiences and improvements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68(June 2018), 101584. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101584>
- Alawee, W. H., Almolhem, Y. A., Yusuf, B., Mohammad, T. A., & Dhahad, H. A. (2020). Variation of Coefficient of Friction and Friction Head Losses Along a Pipe with Multiple Outlets. *Water*, 12(3), 844. <https://doi.org/10.3390/w12030844>
- Almusallam, A. S., Daffallah, I. E., & Benyahia, L. (2020). Modeling the Deformation of Shear Thinning Droplets Suspended in a Newtonian Fluid. *Applied Rheology*, 30(1), 151–165. <https://doi.org/10.1515/arh-2020-0113>

- Bernoulli's principle : Basic formula for pump head calculation - Chemical Engineering Reviewer.* (n.d.). Retrieved October 31, 2023, from <https://chemical-engineering-review.com/en/bernoullis-principle/>
- Bonzanini, A., Picchi, D., Ferrari, M., & Poesio, P. (2019). Velocity profiles description and shape factors inclusion in a hyperbolic, one-dimensional, transient two-fluid model for stratified and slug flow simulations in pipes. *Petroleum*, 5(2), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.005>
- Brightmore, A. W. (1907). Loss Of Pressure In Water Flowing Through Straight And Curved Pipes. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 169(1907), 315–336. <https://doi.org/10.1680/imotp.1907.17203>
- Brkić, D., & Praks, P. (2018). Accurate and Efficient Explicit Approximations of the Colebrook Flow Friction Equation Based on the Wright  $\omega$ -Function. *Mathematics*, 7(1), 34. <https://doi.org/10.3390/math7010034>
- Campos, S. R. V., Baliño, J. L., Slobodcicov, I., Filho, D. F., & Paz, E. F. (2014). Orifice plate meter field performance: Formulation and validation in multiphase flow conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 58, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.018>
- Cantwell, B. J. (2019). A universal velocity profile for smooth wall pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 878, 834–874. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.669>
- Choo, Y.-M., Kim, J.-G., & Park, S.-H. (2021). A Study on the Friction Factor and Reynolds Number Relationship for Flow in Smooth and Rough Channels. *Water*, 13(12), 1714. <https://doi.org/10.3390/w13121714>
- Ebrahimi, B., He, G., Tang, Y., Franchek, M., Liu, D., Pickett, J., Springett, F., & Franklin, D. (2017). Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. *International Journal of Thermal Sciences*, 114, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.001>
- Ettouney, R. S., & El-Rifai, M. A. (2011). Sensitivity of orifice meter gas flow computations. *Journal of Petroleum*

- Science and Engineering*, 80(1), 102–106.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.11.005>
- Foucault, E., & Szeger, P. (2019). Unsteady flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69(April), 101607.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101607>
- Gao, J., & Wu, F. (2019). Investigation of flow through the two-stage orifice. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 117–127.  
<https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1561517>
- Gentle, R., Edwards, P., & Bolton, B. (2001). Fluid mechanics. In R. Gentle, P. Edwards, & B. B. T.-M. E. S. Bolton (Eds.), *Mechanical Engineering Systems* (pp. 112–168). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-075065213-1/50003-9>
- Haktanir, T., & Ardiçlioğlu, M. (2004). Numerical modeling of Darcy-Weisbach friction factor and branching pipes problem. *Advances in Engineering Software*, 35(12), 773–779.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2004.07.005>
- Jaguaribe, E. F. (2022). The Flat Plate Boundary Layer Equation under Blasius Restrictions with a Unique Solution. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(c), 1–9.  
<https://doi.org/10.1155/2022/9032974>
- Kiss, K., & Patziger, M. (2018). On the accuracy of three dimensional flow measurements at low velocity ranges in municipal wastewater treatment reactors. *Flow Measurement and Instrumentation*, 64(November 2017), 39–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.002>
- LaNasa, P. J., & Upp, E. L. (2014). *Fluid flow measurement: A practical guide to accurate flow measurement*. Butterworth-Heinemann.
- Malavasi, S., Messa, G., Fratino, U., & Pagano, A. (2012). On the pressure losses through perforated plates. *Flow Measurement and Instrumentation*, 28, 57–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.07.006>
- Medeiros, A. K. de A., Lima, J. F. de, Medeiros, G. G. de, Silva Junior, N. F. da, Felipe, R. N. B., & Felipe, R. C. T. dos S. (2006). Parameters for dimensional inspection of orifice plates and roughness of the straight stretches of the tubing . In *Brazilian*

- Archives of Biology and Technology* (Vol. 49, pp. 1–8). scielo .
- Melzer, S., Munsch, P., Förster, J., Friderich, J., & Skoda, R. (2020). A system for time-fluctuating flow rate measurements in a single-blade pump circuit. *Flow Measurement and Instrumentation*, 71(October 2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101675>
- Mika, Ł., & Sołek, M. (2019). Energy losses in contractions for the ice slurry considered as the Bingham fluid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1), 012057.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012057>
- Orea, D., Vaghetto, R., Nguyen, T., & Hassan, Y. (2020). Experimental measurements of flow mixing in cold leg of a pressurized water reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 140, 107137.  
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107137>
- Özahi, E. (2015). An analysis on the pressure loss through perforated plates at moderate Reynolds numbers in turbulent flow regime. *Flow Measurement and Instrumentation*, 43, 6–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.03.002>
- Reader-Harris, M., Barton, N., & Hodges, D. (2012). The effect of contaminated orifice plates on the discharge coefficient. *Flow Measurement and Instrumentation*, 25, 2–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.11.003>
- Santhosh, K. V., & Roy, B. K. (2012a). An Intelligent Flow Measurement Technique using Ultrasonic Flow Meter with Optimized Neural Network. *International Journal of Control and Automation*, 5(4), 185–195.  
<https://doi.org/10.7763/IJAPM.2012.V2.78>
- Santhosh, K. V., & Roy, B. K. (2012b). An intelligent flow measuring technique using venturi. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2196, 902–907.
- Su, M., Jiao, X., Li, J., Wu, S., & Wu, T. (2021). Accuracy and reliability analysis of pipe irrigation metering device for sandy water source. *Water (Switzerland)*, 13(7), 1–14.  
<https://doi.org/10.3390/w13070947>
- Tanaka, H., Shiomi, Y., & Ma, K.-F. (2017). Investigation of the fluid flow dynamic parameters for Newtonian and non-Newtonian materials: an approach to

- understanding the fluid flow-like structures within fault zones. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 151. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0737-9>
- Tardi, G., Massaroni, C., Saccomandi, P., & Schena, E. (2015). Experimental Assessment of a Variable Orifice Flowmeter for Respiratory Monitoring. *Journal of Sensors*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/752540>
- Tharakan, T. J., & Rafeeqe, T. A. (2016). The role of backpressure on discharge coefficient of sharp edged injection orifices. *Aerospace Science and Technology*, 49, 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.12.014>
- Tod, S. R. (2002). The effects of stress and fluid pressure on the anisotropy of interconnected cracks. *Geophysical Journal International*, 149(1), 149–156. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01626.x>
- Valdés, J. R., Rodríguez, J. M., Saumell, J., & Pütz, T. (2014). A methodology for the parametric modelling of the flow coefficients and flow rate in hydraulic valves. *Energy Conversion and Management*, 88, 598–611. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.057>
- Vemulapalli, S., & Venkata, S. K. (2022). Parametric analysis of orifice plates on measurement of flow: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101639. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.008>
- Warnecke, H., Kroner, C., Schumann, D., & Tränckner, J. (2021). Generation, validation and application of dynamic load profiles in flow measurement using cavitating Herschel–Venturi nozzles. *Flow Measurement and Instrumentation*, 82(May), 102068. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102068>
- WONG, T. S. W. (1996). Influence of upstream inflow on wave celerity and time to equilibrium on an overland plane. *Hydrological Sciences Journal*, 41(2), 195–205. <https://doi.org/10.1080/02626669609491492>
- Wu, H., Xu, Y., Wang, J., Zhang, T., & Wang, H. (2019). Study on the similarity of wet gas pressure drop in long-throat Venturi. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68(May), 101580. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102068>

nst.2019.101580

Xu, X., Fang, L., Li, A., Wang, Z., & Li, S. (2021). Numerical Analysis of the energy loss mechanism in cavitation flow of a control valve.

*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 174, 121331.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121331>