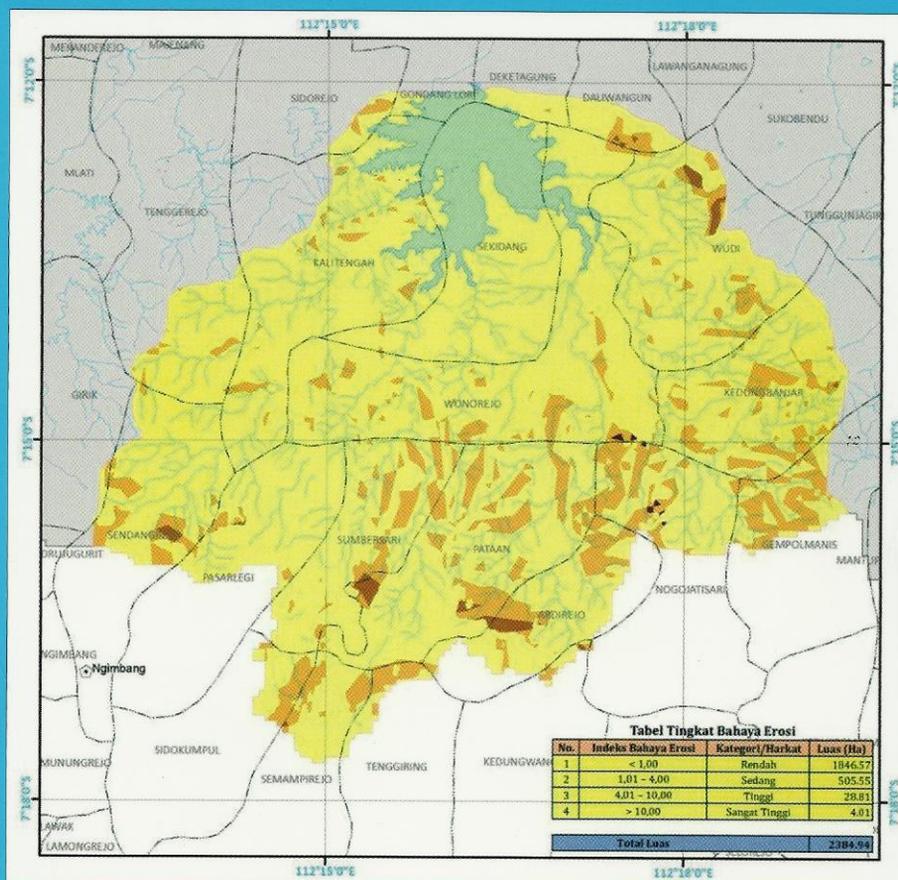


# JURNAL

## SUMBER DAYA AIR



JSDA	Vol. 8	No. 1	Hal. 1 - 94	Bandung Mei 2012	ISSN 1907 - 0276
------	--------	-------	----------------	---------------------	---------------------

Terakreditasi LIPI No. 202/AU1/P2MBI/08/2009

Vol. 8 No. 1, Mei 2012

ISSN 1907-0276

Terakreditasi LIPI

No. 202/AU1/P2MBI/08/2009

# JURNAL

## SUMBER DAYA AIR

**Pelindung**

DR. Ir. Mohamad Hasan, Dipl. HE.

**Pembina**

Ir. Bambang Hargono, Dipl. HE, M.Eng.

**Penanggung Jawab**

Ir. Nur Fizili Kifli, MT.

**Redaktur**

Dra. Conny Amalia

**Ketua Dewan Penyunting**

Prof. (R) Ir. Nana Terangna Ginting, Dipl. EST.

**Dewan Penyunting**

Prof. (R) Drs. Erman Mawardi, Dipl. AIT. (Peneliti Bidang Teknik Hidraulik)

Dr. Simon S. Brahmana, CES, DEA (Peneliti Bidang Teknik Lingkungan SDA)

Dr. Ir. Wanny K. Adidarma, M.Sc. (Peneliti Bidang Teknik Hidrologi)

Dr. (Eng.) Fitri Riandini, S.Si, MT. (Peneliti Bidang Teknik Rawa/Pantai)

Ir. Iskandar A. Yusuf, M.Sc. (Peneliti Bidang Teknik Lingkungan SDA)

Drs. Waluyo Hatmoko, M.Sc. (Peneliti Bidang Teknik Konservasi & Tata Air)

Drs. Tontowi, M.Sc. (Peneliti Bidang Teknik Lingkungan SDA)

**Mitra Bestari**

Dr. Ir. Sri Legowo, M.Sc. (Bidang Teknik Sipil – ITB)

Dr. (Eng.) Ir. Priana Sudjono, MS. (Bidang Teknik Lingkungan – ITB)

Dr. (Eng.) Totok Suprijo, M.Si. (Bidang Oceanografi – ITB)

**Sekretariat Redaksi**

Dra. Aidillisyah Luthan

Rina Diani, S.Sos.

Anjelita, S.Sos.

Haryadi, S.ST.

Yohanna Prita Amelia, S.Sos.

**Alamat Redaksi/Penerbit :**

**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA AIR**

**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN**

**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM**

Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung 40135

Tlp. : (022) 2501083, 2504053

Fax. : (022) 2500163

PO BOX : 841

Email : [jurnal@pusair-pu.go.id](mailto:jurnal@pusair-pu.go.id)

<http://www.pusair-pu.go.id>

**BIS**  
PROPERTY

# JURNAL

## SUMBER DAYA AIR

---

### DAFTAR ISI

Kajian Validitas Berbagai Metode Hidrograf Satuan Sintetik dalam Aplikasinya untuk Daerah Aliran Sungai Tak Terukur <i>Ariani Budi Safarina</i>	1 – 14
Pemodelan Dua Dimensi Hidrodinamika untuk Mengestimasi Potensi Energi Arus Laut di Selat Sunda, Selat Bali dan Selat Sape <i>Juventus Welly, Fitri Riandini, Teti Kurniati</i>	15 – 26
Pintu Sorong Tonjol Berbahan Fiberglass Sebagai Inovasi Alat Ukur Debit dalam Operasi Irigasi <i>Hanhan A. Sofiyuddin, M. Muqorrobin, Dadan Rahmandani, Ahmad Tusi, Budi I. Setiawan</i>	27 – 38
Estimasi Laju Erosi pada Beberapa Daerah Tangkapan Air Waduk di Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo dengan Sistem Informasi Geografi <i>Sri Mulat Yuningsih, Bayu Raharja, Irfan Sudono, Fauzi</i>	39 – 52
Potensi Beban Pencemaran Nitrogen, Fosfat, Kualitas Air, Status Trofik dan Stratifikasi Waduk Riam Kanan <i>Simon S. Brahmana, Firdaus Achmad</i>	53 – 66
Persepsi Masyarakat Terhadap Penerapan Teknologi Tepat Guna Bidang Sumber Daya Air (TTG-BSDA) (Studi Kasus Kabupaten Pacitan, Gunung Kidul dan Bantul) <i>Fanani Aziz Alwi, Wildan Herwindo</i>	67 – 80
Penilaian Tingkat Pencemaran Air S. Bengawan Solo dengan Menggunakan Indeks Kimia-Fisika <i>Armaita Sutriati</i>	81 – 94

## PINTU SORONG TONJOL BERBAHAN FIBERGLASS SEBAGAI INOVASI ALAT UKUR DEBIT DALAM OPERASI IRIGASI

Hanhan A. Sofiyuddin<sup>1</sup>, M. Muqorrobin<sup>2</sup>, Dadan Rahmandani<sup>3</sup>, Ahmad Tusi<sup>4</sup>, Budi I. Setiawan<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Balai Irigasi, Pusat Litbang Sumber Daya Air

Jl. Cut Meutia, Bekasi

<sup>4</sup> Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

<sup>5</sup> Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor

Email: hanhan.ahmad@gmail.com

Diterima: 7 November 2011; Disetujui: 25 Januari 2012

### ABSTRAK

*Pengaturan dan pengukuran debit di jaringan irigasi sangat diperlukan untuk meningkatkan pemerataan dan keterjaminan air. Hal ini banyak terkendala pintu air dan alat pengukur debit yang berada dalam kondisi yang rusak. Pintu air yang umumnya terbuat dari besi banyak mengalami kerusakan karena korosi ataupun pencurian. Alat ukur debit umumnya tidak akurat karena kondisi pengaliran alat ukur seringkali tidak memenuhi syarat dan banyak yang dibongkar karena dianggap menghalangi aliran. Dilatarbelakangi hal tersebut, penelitian dilakukan untuk menghasilkan inovasi pintu air yang dapat berfungsi sebagai bangunan pengatur dan pengukur. Pintu air dibuat dari bahan fiberglass/Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) yang lebih ringan dan tahan korosi dibandingkan besi. Bentuk pintu air ini berupa pintu sorong tonjol sehingga dapat digunakan sebagai alat ukur. Pengujian hidrolis dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran dan rumus debit yang dapat digunakan. Pengujian menghasilkan koefisien kontraksi sebesar 0,867 dengan tingkat kesalahan (Mean Absolute Percentage Error/MAPE) sebesar 3,8% untuk aliran sempurna dan 10,4% untuk aliran tidak sempurna. Hasil ini menunjukkan bahwa pintu sorong tonjol ini layak untuk digunakan sebagai alat ukur. Untuk kemudahan operasional di lapangan, petugas dapat dilengkapi dengan grafik debit atau kalkulator debit berbentuk program Java yang dapat dioperasikan pada telepon genggam yang memiliki fasilitas Java MIDP 2.0.*

**Kata kunci:** Pintu sorong tonjol, fiberglass, alat ukur debit, kalibrasi, perhitungan debit

### ABSTRACT

*Discharge regulation and measurement in the irrigation scheme are needed to improve water distribution equity and reliability which are often constrained by damaged sluice gates and discharge measuring devices. Sluice gates which are generally made of iron are often damaged because of corrosion or theft. Whereas the discharge measuring devices are often inaccurate because the required flow condition is often eligible and demolished since in the opinion of the farmers these devices are blocking the water flow. In order to solve this problem, a research was conducted to create sluice gates that can be both, a discharge regulator and measuring device. These gates are made of fiberglass/Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP), which is lighter and more corrosion resistant than steel. The shape of this gate is a rounded sluice gate so that it can be used as a measuring device. Tests were then conducted to determine the hydraulic characteristics of flow and discharge formulas that can be used. These tests resulted a contraction coefficient of 0,867 with error rate (Mean Absolute Percentage Error/MAPE) of 3,8% for free flow and 10,4% for submerged flow or an average of 8,71%. This indicates that this rounded sluice gate is feasible to be used as a measuring device. For operational convenience in the field, operators can be equipped with discharge charts or discharge calculators in Java programs that can be operated on a Java MIDP 2.0 cell phone.*

**Keywords:** Rounded sluice gate, fiberglass, discharge measuring device, calibration, discharge calculation

### PENDAHULUAN

Pemberian air pada lahan irigasi teknis yang ada di Indonesia, dengan luas areal irigasi nasional sebesar 7,4 juta Ha (KEPMEN PU NO 390/KPTS/M/2007), umumnya menggunakan sistem irigasi permukaan dan pengendalian pemberian air dilakukan menggunakan pintu air irigasi dan saluran pembuang (drainase). Pengaturan dan pengukuran debit di jaringan

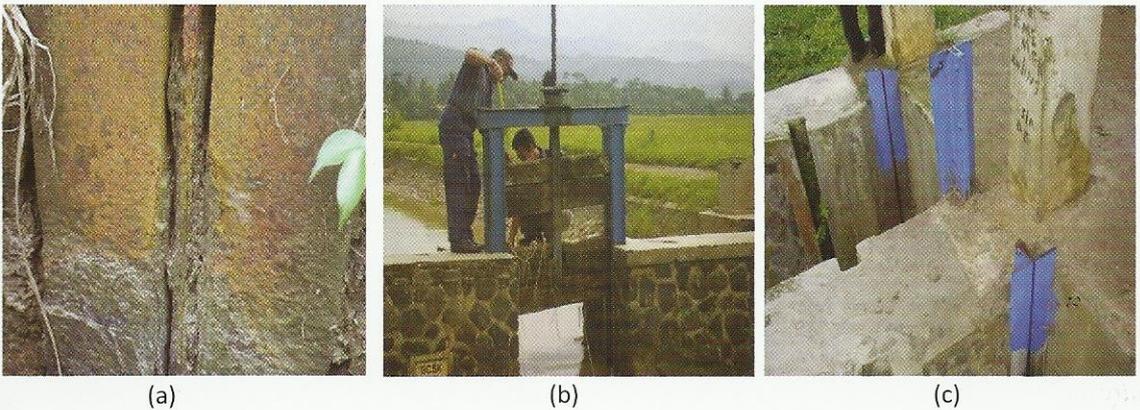
irigasi sangat diperlukan untuk meningkatkan pemerataan dan keterjaminan air. Dengan dilakukannya pengaturan debit yang tepat dan pengukuran debit yang akurat, alokasi air ke setiap bangunan sadap dapat disesuaikan dengan rencana yang telah ditetapkan sehingga terjadi pemerataan dan konflik antara daerah hulu dan hilir dapat diminimalisir. Untuk dapat menghasilkan pengaturan air secara baik tentunya memerlukan kondisi pintu air dalam kondisi yang baik pula.

Kendala pembagian air yang terjadi di lapangan umumnya diakibatkan pintu air yang rusak dan alat ukur debit yang tidak memadai selain karena kurangnya tenaga operasional di lapangan dan faktor-faktor lainnya. Pintu air yang ada saat ini umumnya terbuat dari besi dan kayu. Pintu besi rawan korosi sehingga cepat rusak dan seringkali macet bila tidak dioperasikan dalam jangka waktu lama. Selain itu karena harga jual besi yang cukup menarik, pintu besi banyak hilang karena pencurian.

Alat ukur pun umumnya dalam keadaan tidak memenuhi syarat ataupun rusak. Alat ukur yang banyak terpasang di lapangan adalah ambang lebar, *romijn*, *long throat flume* dan *cipoletti*. Alat-alat ukur tersebut memiliki ambang yang sering dirusak oleh petani karena dianggap menghambat aliran terutama pada saat debit dan muka air di saluran rendah. Selain itu, dalam penerapannya sering terjadi ketidaktepatan alat ukur debit

karena kesalahan penempatan, kesalahan konstruksi dan pemeliharaan yang kurang baik sehingga persyaratan teknis tidak terpenuhi (Pusposutarjo, 2001).

Untuk mengatasi hal tersebut, Balai Irigasi, Puslitbang SDA, Balitbang, Kementerian PU bekerjasama dengan Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor melakukan penelitian untuk menghasilkan inovasi pintu air yang dapat berfungsi sebagai bangunan pengatur dan pengukur. Bahan yang digunakan adalah *fiberglass* yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan besi, diantaranya: ringan, mudah dibentuk, memiliki kekuatan yang tinggi (tergantung rasio beratnya), memiliki stabilitas dimensi yang baik, tahan terhadap panas, dingin, lembab, serta korosi dan murah. Pintu air berbentuk pintu sorong tonjol sehingga dapat difungsikan sebagai alat ukur.



**Gambar 1** Tipe Kerusakan di Lapangan (a) Korosi pada Daun Pintu Besi; (b) Pelapukan pada Daun Pintu Kayu; (c) Pencurian dengan Cara Memotong Alur Skoneng

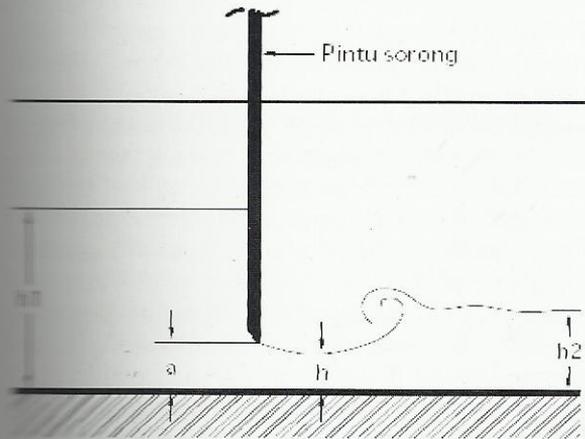


**Gambar 2** Alat Ukur Cipoletti (a) dan Ambang Lebar (b) yang Dirusak Karena Dianggap Menghambat Aliran

**TINJAUAN PUSTAKA**

**Pintu Sorong**

Dalam Kriteria Perencanaan Irigasi Bagian Bangunan/KP-04 (Direktorat Irigasi, 2010), pintu sorong merupakan pintu pembilas bawah yang dapat digunakan sebagai pengatur tinggi muka air di saluran ataupun untuk pengaturan air masuk ke tersier. Skema aliran air (kondisi aliran sempurna) pada pintu sorong adalah seperti Gambar 3.



Gambar 3 Skema Pengujian Hidrolis Pintu Sorong Tonjol

Persamaan debit yang dapat digunakan dalam perencanaan dan pengukuran debit adalah sebagai berikut (Bos, 1989):

$$Q = C_d \cdot B \cdot a \cdot \sqrt{2gh_1} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- C<sub>d</sub> : koefisien debit (dalam KP-04 C<sub>d</sub> untuk aliran sempurna diberi simbol μ)
- a : bukaan pintu (m)
- B : lebar pintu (m)
- g : percepatan gravitasi (9,81 m<sup>3</sup>/s)
- h<sub>1</sub> : tinggi muka air di hulu pintu (m)
- Q : debit (m<sup>3</sup>/s).

Dalam KP-04 (Direktorat Irigasi, 2010), persamaan yang digunakan pada dasarnya sama dengan persamaan 1. Namun C<sub>d</sub> dihitung dengan mengalikan koefisien debit pada aliran sempurna μ dengan faktor koreksi pada aliran tidak sempurna (K).

Pengujian hidrolis dan kalibrasi pintu sorong sebagai alat ukur debit telah dilakukan diantaranya oleh Henry (1970) dalam Bos (1989). Kalibrasi dilakukan pada pintu sorong berambang tetap dan koefisien debit (C<sub>d</sub>) disajikan dalam bentuk grafik (biasa disebut sebagai nomogram Henry). Nomogram Henry kemudian dikembangkan dalam bentuk persamaan oleh Swamee (1992). Namun demikian, persamaan dan koefisien debit yang dikembangkan merupakan

persamaan empiris yang penggunaannya terbatas pada bentuk pintu sorong dengan ambang tajam (Bos, 1989).

Yen et.al. (2001) dan Lin et.al. (2002) telah melakukan studi komprehensif mengenai karakteristik aliran dengan mengembangkan persamaan koefisien debit (C<sub>d</sub>) berdasarkan persamaan energi dan momentum (persamaan 2 s.d. 6). Dalam persamaan tersebut, C<sub>d</sub> merupakan fungsi dari koefisien kontraksi (C<sub>c</sub>), tinggi muka air di hulu, tinggi muka air di hilir dan lebar pintu. Karena persamaan ini menggunakan C<sub>c</sub> sebagai salah satu parameternya, persamaan debit ini dapat digunakan untuk berbagai bentuk pintu sorong asalkan C<sub>c</sub> yang bersesuaian digunakan. Pada aliran sempurna (*free flow*), C<sub>d</sub> dihitung menggunakan persamaan 2 dan pada aliran tidak sempurna (*submerged flow*) dihitung menggunakan persamaan 3.

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+\eta}} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_d = C_c \frac{\left[ \xi \cdot \sqrt{\xi^2 - \left(\frac{1}{\eta^2} - 1\right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)} \right]^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{1+\eta}} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- C<sub>c</sub> : koefisien kontraksi
- a : bukaan pintu (m)
- h<sub>1</sub> : tinggi muka air di hulu pintu (m)
- h<sub>2</sub> : tinggi muka air di hilir pintu (m)

λ, η dan ξ merupakan parameter yang dihitung menggunakan persamaan 4, 5 dan 6.

$$\lambda = \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta = \frac{C_c \cdot a}{h_1} \dots\dots\dots (5)$$

$$\xi = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^2 + 2(\lambda - 1) \dots\dots\dots (6)$$

Dalam aliran pintu sorong, koefisien kontraksi merupakan perbandingan antara bukaan pintu (a) dan tinggi air pada bagian kontraksi di hilir pintu (h). Namun demikian, pengukuran koefisien kontraksi secara langsung sulit dilakukan terutama pada aliran tidak sempurna.

Pola pengaliran pada pintu sorong sangat dipengaruhi oleh bentuk bagian ambang dari pintu sorong. Ambang pintu sorong yang tajam menyebabkan koefisien kontraksi yang lebih kecil dibandingkan ambang pintu yang diberi bulatan seperti pada pintu sorong tonjol yang

dikembangkan Soeherman dan Memed (1990). Bentuk ambang yang membulat menyebabkan aliran terjadi dalam bentuk *streamline* yang lebih teratur sehingga koefisien kontraksi lebih besar. Selain itu, bentuk bagian bawah pintu yang membulat dapat berfungsi sebagai *anti-vortex* yang dapat mengurangi kemungkinan terjadinya pusaran air (*vortex*) dan mengurangi ombak pada aliran di hilir pintu yang dapat mengurangi ketelitian pengukuran. Roth dan Hager (1999) dalam uji coba hidrolis yang dilakukannya menemukan bahwa *anti-vortex* dapat mengurangi amplitudo ombak di hilir pintu hingga 50% dibandingkan pintu sorong yang tidak dilengkapi *anti-vortex*.

### Bahan Komposit *Fiberglass*

Smith dan Jayad (2006) menyatakan bahwa bahan komposit merupakan sebuah sistem material yang tersusun atas kombinasi dari dua atau lebih bahan penyusun mikro atau makro dengan lapisan pemisah diantara mereka yang berbeda dalam bentuk maupun susunan kimiawinya dan tidak larut atau dapat dipecahkan secara esensial antara satu dengan bahan penyusun lainnya. Beberapa jenis bahan komposit yang penting dalam dunia keteknikan dan kehidupan kita adalah beton, *fiberglass* (*Glass Fiber Reinforced Plastic/GFRP*), Aspal, Kayu, dan sebagainya.

*Fiberglass* atau *Glass Fiber Reinforced Plastic/GFRP* adalah bahan paduan atau campuran beberapa bahan kimia (bahan komposit) resin dan serat kaca yang bereaksi dan mengeras dalam waktu tertentu. Serat kaca (*glass fiber*) direkatkan dengan suatu matriks yang awalnya berbentuk cair. Jenis matriks ini banyak, namun yang umum dipakai adalah *polyester resin* dan *epoxy resin*. Kedua bahan ini mempunyai perbedaan dalam hal harga dan kekuatan polimer yang dihasilkan. *Polyester resin* memiliki harga yang murah dibandingkan dengan *epoxy resin*, tetapi kekuatannya tidak sekuat *epoxy resin*. Penggunaan bahan *polyester resin*, biasa digunakan untuk pembuatan komponen perahu, panel bangunan, panel struktur mobil, dan lain-lain. Sedangkan *epoxy resin* sedikit lebih mahal tetapi memiliki kekuatan yang baik dan memiliki nilai susut yang kecil dibandingkan dengan *polyester resin*. Namun demikian, *polyester resin* lebih mudah pengerjaannya terutama bila dilakukan secara manual.

Kekuatan bahan *fiberglass* tergantung pada kandungan serat gelas yang menyusun bahan tersebut. Secara umum, semakin besar persentase berat kandungan serat, maka semakin kuat. Jarak peletakan secara paralel antar serat juga akan mempengaruhi kekuatan mekanik bahan.

### Pengukuran dan Perhitungan Debit

Pengukuran dan penghitungan debit umumnya dilakukan menggunakan tabel atau grafik debit. Ketelitian penghitungan sangat terbatas dengan resolusi parameter dalam tabel maupun grafik debit tersebut. Sebagai contoh pada buku panduan untuk pengamat dan juru yang dikembangkan oleh Dinas Pekerjaan Umum Jawa Barat (1984), tabel debit pintu sorong aliran sempurna dikembangkan dengan nilai bukaan dan tinggi air di hulu tiap 2 cm. Sama halnya dengan grafik debit pintu sorong tonjol yang dikembangkan oleh Soeherman dan Memed (1990), grafik debit dikembangkan dengan nilai bukaan pintu tiap 10 cm. Apabila bukaan pintu berada di antara nilai yang tertera, interpolasi dilakukan. Hasil interpolasi dapat saja berbeda bila debit dihitung menggunakan rumus teoritisnya.

Ketelitian penghitungan dapat ditingkatkan dengan melakukan penghitungan langsung menggunakan rumus debit. Namun demikian, penghitungan langsung debit pintu sorong sangat sulit dilakukan di lapangan karena cukup rumit. Untuk mempermudah, penghitungan dapat dibantu dengan menggunakan program kalkulator debit.

Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan aplikasi yang disusun pada platform Java MIDP. Penghitungan dapat dilakukan di lapangan karena aplikasi ini dapat dijalankan pada perangkat portabel (telepon seluler) yang memiliki fasilitas java MIDP. Java MIDP merupakan platform pemrograman yang dikembangkan oleh Sun Microsystems untuk perangkat portabel (Topley, 2010). Aplikasi yang dikembangkan menggunakan Java MIDP sangat populer seiring maraknya penggunaan perangkat portabel terutama telepon seluler. Hampir seluruh telepon seluler pada saat ini memiliki fasilitas untuk Java MIDP.

## METODOLOGI

### Pembuatan Pintu Air

Komposisi pintu air berbahan GFRP dibuat menggunakan bahan serat gelas (kasar dan halus) yang banyak ditemui dipasaran, seperti jenis *Woven Roving (WR)* dan *Chopped Strand Mat (CSM)* dengan bobot 450 dan 300 gr/m<sup>2</sup>. Perbandingan resin dengan serat fiber adalah 40:60. Perletakan serat gelas diatur secara simetris dengan posisi sudut ikatan yang digunakan dalam WR adalah 90<sup>0</sup> dan CSM dengan pola acak, sehingga diharapkan pintu memiliki sebaran kekuatan secara merata di seluruh bagian pintu. Komposisi campuran matrik (*polymer*) untuk pembuatan *fiberglass* adalah menggunakan dua buah jenis tipe *isophthalic polyester resin* dan *orthophthalic polyester resin*, katalis, akselerator, erosi (pengisi) dan pigmen warna.

**Pengujian Hidrolis Pintu Air**

Pengujian hidrolis dilakukan untuk mengetahui koefisien aliran dalam rumus debit pintu sorong tonjol. Uji hidrolis dilakukan pada pintu air berbahan *fiberglass* dengan lebar pintu efektif 50 cm dan tambahan tonjolan di bawah pintu berupa setengah lingkaran dengan diameter sebesar 20 cm. Pintu dipasang dalam saluran dengan tinggi saluran 60 cm dan lebar saluran 50 cm dengan pergerakan dalam arah vertikal (skema pada Gambar 4).

Hasil pengujian yang didapatkan digunakan untuk perhitungan debit aliran dalam pengoperasian pintu. Pengujian dilakukan baik kondisi aliran sempurna maupun tidak sempurna. Data yang diamati adalah data tinggi air dan bukaan pintu. Pengambilan data tinggi air dilakukan pada di hulu dan hilir pintu menggunakan *point gauge* dengan ketelitian hingga 0,1 mm. Pengujian hidrolis dilakukan pada 3 bukaan pintu, yaitu 2,5, 5 dan 7,5 cm.

Sebagai acuan, debit yang mengalir dihitung menggunakan ambang tajam (lebar 80 cm). Persamaan yang digunakan untuk menghitung debit pada ambang tajam ini adalah sebagai berikut:

$$Q = C_w B H^{3/2} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan:

- Q : debit (m<sup>3</sup>/s);
- C<sub>w</sub> : koefisien debit aliran ambang lebar;
- B : lebar ambang (m);
- H : tinggi muka air dari ambang (m).

$$C_w = 1,785 \left( \frac{0,00295}{H} + 0,237 \frac{H}{H_d} \right) (1 + \epsilon) \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

- H : tinggi muka air dari ambang (m);
- H<sub>d</sub> : tinggi ambang (m);
- ε : angka koreksi, dimana ε = 0 bila H<sub>d</sub> ≤ 1,00 m dan ε = 0,55(H<sub>d</sub>-1) bila H<sub>d</sub> ≥ 1,00 m.

Persamaan 8 berlaku bila B ≥ 0,50 m; 0,3 ≤ H<sub>d</sub> ≤ 2,5; 0,3 ≤ H ≤ H<sub>d</sub>; H ≤ 0,8; H ≤ B/4.

Optimasi dilakukan untuk mencari nilai koefisien kontraksi (C<sub>c</sub>) yang optimal berdasarkan data hasil pengujian. Debit terukur pada ambang tajam dibandingkan dengan debit yang dihitung menggunakan persamaan 2 s.d. 6. Langkah optimasi yang dilakukan adalah seperti pada Gambar 5.

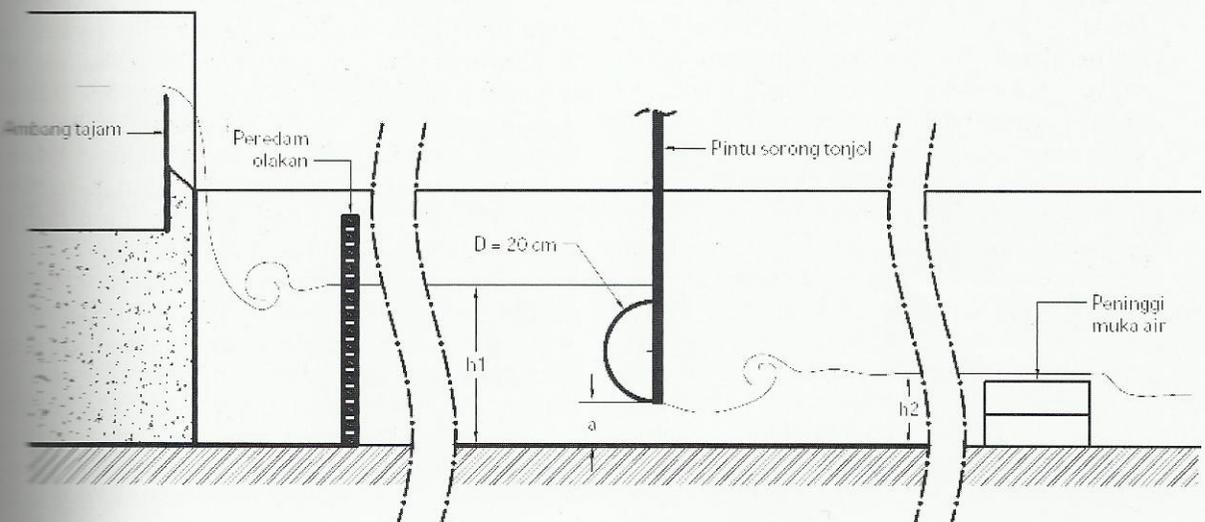
Optimasi dilakukan dengan menggunakan metode *Generalized Reduced Gradient* menggunakan bantuan *addin Solver* dalam Microsoft Excell untuk meminimalisir *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$APE = \frac{|Q_{A_t} - Q_{P_t}|}{Q_{A_t}} \times 100 \dots\dots\dots(9)$$

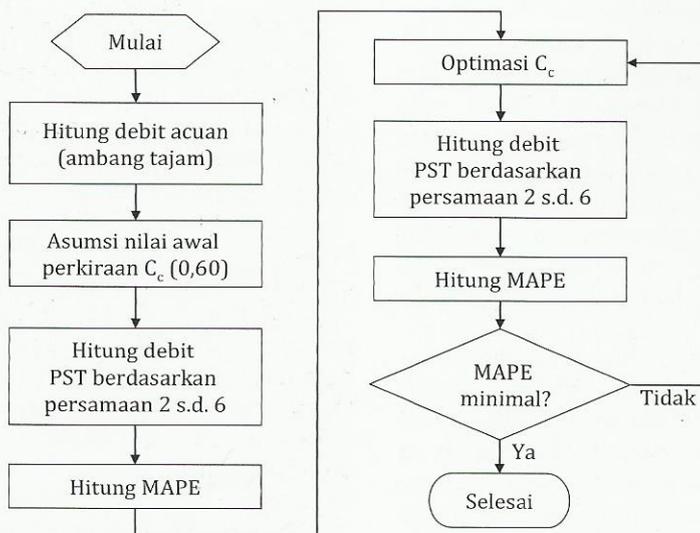
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n APE \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

- APE : *Absolute Percentage Error* (%)
- MAPE : indeks error/ *Mean Absolute Percentage Error* (%)
- Q<sub>A</sub> : debit acuan (m<sup>3</sup>/s)
- Q<sub>P</sub> : debit pintu terhitung (m<sup>3</sup>/s)
- n : jumlah pengukuran



**Gambar 4** Skema Pengujian Hidrolis Pintu Sorong Tonjol



Gambar 5 Diagram Alir Pengujian Hidrolis dan Optimasi Rumus Debit Pintu Sorong Tonjol

## HASIL PENELITIAN

### Pengembangan Pintu Air

Dalam penelitian ini dikembangkan pintu *fiberglass* berukuran kecil untuk pintu sadap tersier dan pintu berukuran besar untuk pintu air di jaringan utama. Pintu air yang dikembangkan yaitu:

- Pintu air tipe 500, produknya disebut PU.FIGASI.01.500, dengan dimensi 58 cm (lebar) x 75 cm (tinggi) dan tebal 1,2 cm. Pintu air berukuran kecil untuk pintu sadap tersier. Pergerakan dilakukan secara manual. Buka pintu dikunci dengan menggunakan pen pengunci. Desain pintu seperti pada Gambar 6.
- Pintu air tipe 1200, produknya disebut PU.FIGASI.01.1200, dengan dimensi 128 cm (lebar) x 180 cm (tinggi) dan tebal 2 cm, Pintu air berukuran besar dapat digunakan untuk sadap sekunder. Pergerakan dilakukan dengan menggunakan sistem mekanik. Desain pintu seperti pada Gambar 7.

Pintu air tipe pertama (a) dianjurkan untuk digunakan pada jaringan irigasi tersier. Karena cukup ringan (18 kg untuk pintu berukuran lebar 50 cm), pergerakan pintu dapat dilakukan secara manual. Pergerakan manual ini sangat mudah dan cepat untuk dilakukan oleh petugas penjaga pintu air ataupun petani. Pegangan tangan pintu didesain berlekuk mengikuti bentuk tangan sehingga diharapkan nyaman dioperasikan. Apabila diperlukan pengaturan debit yang presisi, pergerakan pintu dapat diganti dengan sistem mekanis ulir.

Pintu air tipe kedua (b) dianjurkan untuk digunakan sebagai pintu air di jaringan irigasi sekunder atau utama. Untuk memenuhi kekuatan

mekanis yang diperlukan, pintu air didesain tebal 3 cm. Pergerakan dilakukan menggunakan sistem mekanis karena pintu cukup berat (46 kg untuk ukuran pintu lebar 100 cm).

Pada pintu ini direncanakan memiliki dua fungsi, yaitu pengatur pembagian air (*regulator*) dan pengukur aliran (*measurement*). Pada pintu ini memiliki tambahan bentuk tonjolan setengah lingkaran yang terletak di bagian bawah pintu dengan diameter 20 cm. Tonjolan ini dibuat dengan sistem *knock down* untuk mempermudah proses pembuatan dan pemasangan pintu. Ini merupakan pengembangan dari pintu sorong dan *Crump de Gruyter*. Tonjolan ini dapat menyebabkan aliran dapat mengalir dalam bentuk *streamline* yang teratur sehingga koefisien kontraksi diharapkan mendekati nilai 1.

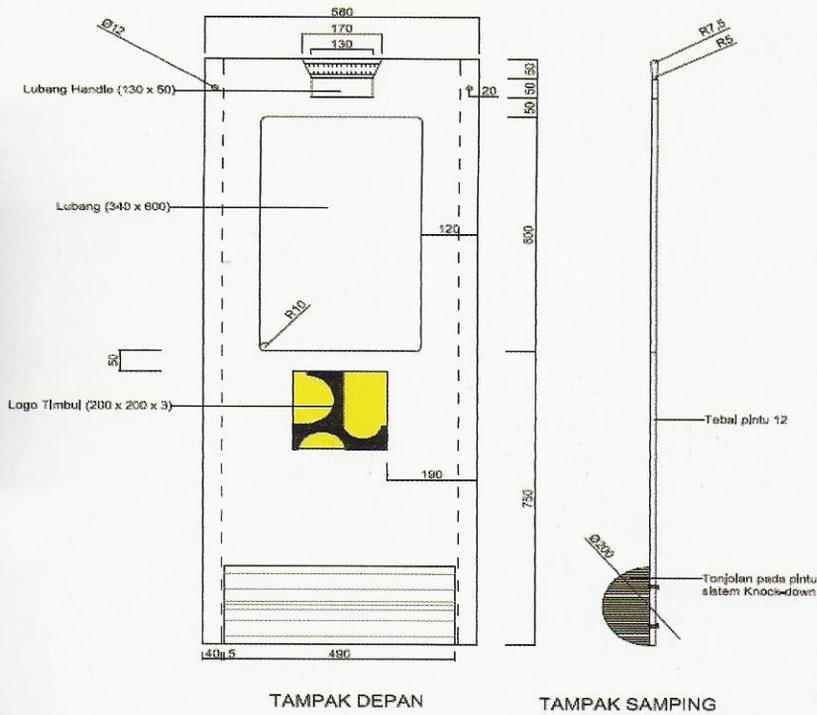
Balai Irigasi melakukan uji coba penerapan pintu GFRP pada dua lokasi yang berbeda yaitu di DI Cimanuk dan DI Jatiluhur. Uji coba di DI Cimanuk dilakukan pada bangunan sadap sekunder di BCMK 23. Di Sub-Sekunder Bongas, Sekunder Kandang Haur, DI Jatiluhur, lokasi penerapan berada di empat pintu sadap tersier (BB1, BB2, BB3, dan BB4) dan dua pintu sadap sekunder (BKHR 6 dan BKHR 7).

Berdasarkan pengamatan dan wawancara dengan Penjaga Pintu Air (PPA), pengoperasian pintu *fiberglass* di tersier lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan pintu air besi. Hal tersebut dikarenakan berat daun pintu yang ringan dan tidak menggunakan sistem mekanis (pada pintu air di sadap tersier). Selain itu, pemeliharaan pintu yang lebih mudah karena pintu tidak mengalami korosi.

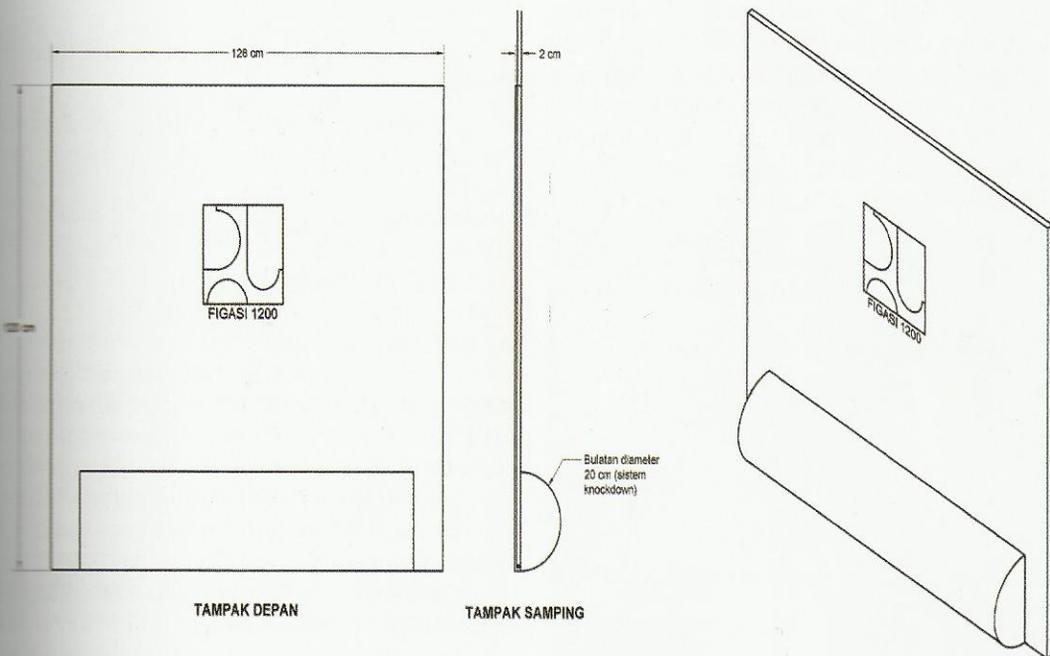
Seperti halnya pintu besi, pembuatan pintu air *fiberglass* memerlukan keahlian tertentu. Bahan *fiberglass* yang dibuat akan memiliki kualitas yang

baik (dalam hal bentuk dan kekuatan) bila komposisi campuran bahan dan proses pembuatannya tepat. Sebagai contoh bila proses peletakan resin antar lapisan serat kaca terlalu cepat, akumulasi panas yang ditimbulkan saat pengeringan di setiap lapisan dapat mengurangi kualitas resin sehingga kekuatan optimal bahan

tidak akan tercapai. Dengan demikian walaupun dapat dikerjakan dengan perangkat sederhana, pembuatan pintu disarankan untuk dilakukan di bengkel khusus yang memiliki kemampuan yang baik dalam pembuatan bahan *fiberglass*, terutama untuk pembuatan pintu *fiberglass* yang memiliki tebal lebih dari 1 cm.



Gambar 6 Desain Pintu Air PU.FIGASI.01.500 (Satuan dalam mm)



Gambar 7 Desain Pintu Air PU.FIGASI.01.1200 (Satuan dalam cm)



**Gambar 8** Uji Coba Penerapan Pintu *Fiberglass*: (a) BCMK 23 Ki (Di Cimanuk, Garut); (b) Sub-Sekunder Gabus (Sekunder Kandang Haur, Di Jatiluhur, Patrol)

### Pengujian Hidrolis Pintu Air

Pengujian hidrolis dilakukan terhadap 33 kondisi pengaliran pintu sorong tonjol, yaitu 15 kondisi pengaliran pada aliran sempurna dan 18 kondisi pada aliran tidak sempurna. Dari optimasi yang dilakukan didapatkan nilai koefisien kontraksi ( $C_c$ ) adalah sebesar 0,867. Indeks error (MAPE) yang didapatkan dari pengujian ini adalah sebesar 3,8% untuk aliran sempurna dan 10,4% untuk aliran tidak sempurna. Data pengukuran dan optimasi yang dilakukan terdapat pada Tabel 1.

## PEMBAHASAN

### Koefisien Kontraksi

Nilai koefisien kontraksi pintu sorong tonjol yang didapatkan dari hasil optimasi lebih besar dari nilai kontraksi pintu sorong ambang tajam dalam literatur. Hal ini dikarenakan koefisien kontraksi sangat dipengaruhi oleh bentuk ambang bawah pintu. Pada pintu sorong dengan ambang bawah tajam Bos (1989) menganjurkan nilai sekitar 0,624 – 0,628. Pada pintu yang bagian ambang bawah tidak tajam seperti pada pintu radial, Webby (1999) dalam Yen et.al. (2001) mendapatkan nilai koefisien kontraksi yang lebih besar yaitu sebesar 0,648 – 0,724. Pada literatur yang sama (Yen et.al., 2001) dalam uji coba hidrolis yang dilakukan pada pintu sorong yang pada bagian bawah dilengkapi lidah berbentuk  $\frac{1}{4}$  lingkaran (diameter 8 cm) didapatkan nilai koefisien kontraksi sebesar 0,65. Pada penelitian ini, tonjolan pada ambang bawah pintu berdiameter lebih besar sehingga memungkinkan aliran mengalir dalam *streamline* yang lebih teratur. Hal ini mengakibatkan *vena contracta* pada hilir pintu menjadi lebih besar sehingga koefisien kontraksi lebih besar pula.

Koefisien kontraksi yang lebih besar berdampak positif terhadap karakteristik hidrolis pintu air. Hal ini tergambar dalam rumus debit yang digunakan. Koefisien kontraksi merupakan

faktor pengali. Dengan nilai koefisien kontraksi yang lebih besar, debit yang dialirkan pun lebih besar dibandingkan bila nilai koefisien kontraksi lebih kecil. Dengan demikian, pintu sorong tonjol dapat mengalirkan debit yang lebih besar dibandingkan pintu sorong berambang tajam yang memiliki lebar dan bukaan sama.

Selain itu berdasarkan kajian yang dilakukan oleh Lin et.al. (2002), pintu air yang memiliki koefisien kontraksi yang lebih besar cenderung berada pada kondisi aliran sempurna dibandingkan pintu dengan koefisien kontraksi lebih kecil. Pengukuran debit pada aliran sempurna cenderung lebih akurat dibandingkan pengukuran pada aliran tidak sempurna. Berdasarkan hasil perhitungan, pengukuran pada aliran sempurna menghasilkan indeks error 2,7 kali lebih rendah dibandingkan pengukuran pada aliran tidak sempurna.

### Pengukuran Debit Menggunakan Pintu Sorong Tonjol

Untuk mengetahui debit yang mengalir, parameter yang diukur pada pintu sorong tonjol ini adalah:

- Bukaan pintu (a)
- Lebar pintu (B)
- Tinggi muka air di hulu ( $h_1$ )
- Tinggi muka air di hilir pintu ( $h_2$ )
- Koefisien kontraksi ( $C_c$ )

Data a,  $h_1$  dan  $h_2$  diukur setiap pengukuran debit dilakukan sedangkan data B dapat diukur hanya sekali.  $C_c$  jika memungkinkan perlu dikalibrasi ulang pada setiap bangunan agar dicapai tingkat ketelitian yang tinggi. Namun bila dapat diasumsikan kondisi bangunan dan hidrolis aliran menyerupai kondisi dalam pengujian ini, nilai koefisien kontraksi sebesar 0,867 dapat digunakan pada pintu dengan tonjolan berdiameter 20 cm. Nilai koefisien kontraksi tersebut menghasilkan ketelitian yang cukup baik pada rentang  $h_1/a$  1,7 – 20,1.

**Tabel 1** Data Hasil Pengujian dan Optimasi

Ambang Tajam			Pintu Sorong Tonjol						APE (%)
Tinggi Limpasan H (m)	C	Q (l/s)	Bukaan Pintu a (m)	Tinggi Air Hulu $h_1$ (m)	Tinggi Air Hilir $h_2$ (m)	Aliran	Cd	Q (l/s)	
0,050	1,867	16,70	0,025	0,132	0,031	Sempurna	0,803	16,16	3,24
0,063	1,861	23,54	0,025	0,233	0,031	Sempurna	0,829	22,16	5,90
0,071	1,860	28,14	0,025	0,314	0,031	Sempurna	0,838	26,01	7,59
0,078	1,859	32,39	0,025	0,439	0,031	Sempurna	0,846	31,04	4,20
0,072	1,859	28,73	0,050	0,104	0,035	Sempurna	0,728	26,01	9,51
0,082	1,859	34,92	0,050	0,158	0,035	Sempurna	0,768	33,80	3,23
0,092	1,860	41,51	0,050	0,198	0,035	Sempurna	0,785	38,68	6,83
0,098	1,861	45,66	0,050	0,274	0,035	Sempurna	0,805	46,68	2,23
0,105	1,862	50,67	0,050	0,313	0,035	Sempurna	0,812	50,33	0,70
0,115	1,864	58,15	0,050	0,398	0,035	Sempurna	0,823	57,50	1,13
0,092	1,860	41,51	0,075	0,125	0,070	Sempurna	0,703	41,29	0,56
0,102	1,861	48,50	0,075	0,157	0,070	Sempurna	0,729	47,97	1,11
0,110	1,863	54,37	0,075	0,202	0,070	Sempurna	0,754	56,28	3,51
0,120	1,865	62,03	0,075	0,237	0,070	Sempurna	0,768	62,09	0,09
0,130	1,868	70,05	0,075	0,286	0,070	Sempurna	0,782	69,50	0,79
0,033	1,890	9,06	0,025	0,100	0,086	Tidak Sempurna	0,436	7,64	15,71
0,040	1,877	12,01	0,025	0,158	0,102	Tidak Sempurna	0,690	15,19	26,41
0,065	1,861	24,67	0,025	0,244	0,135	Tidak Sempurna	0,719	19,65	20,32
0,065	1,861	24,67	0,025	0,293	0,145	Tidak Sempurna	0,770	23,07	6,47
0,065	1,861	24,67	0,025	0,329	0,168	Tidak Sempurna	0,714	22,68	8,05
0,065	1,861	24,67	0,025	0,362	0,202	Tidak Sempurna	0,652	21,71	11,97
0,065	1,861	24,67	0,025	0,408	0,238	Tidak Sempurna	0,619	21,88	11,29
0,065	1,861	24,67	0,025	0,461	0,284	Tidak Sempurna	0,583	21,92	11,15
0,065	1,861	24,67	0,025	0,502	0,324	Tidak Sempurna	0,554	21,73	11,90
0,070	1,860	27,55	0,050	0,171	0,133	Tidak Sempurna	0,662	30,31	9,99
0,082	1,859	34,92	0,050	0,245	0,169	Tidak Sempurna	0,709	38,86	11,27
0,093	1,860	42,20	0,050	0,350	0,219	Tidak Sempurna	0,693	45,37	7,51
0,093	1,860	42,20	0,050	0,407	0,261	Tidak Sempurna	0,634	44,77	6,09
0,093	1,860	42,20	0,050	0,454	0,304	Tidak Sempurna	0,586	43,76	3,69
0,092	1,860	41,52	0,075	0,182	0,157	Tidak Sempurna	0,586	41,52	0,00
0,104	1,862	49,95	0,075	0,272	0,212	Tidak Sempurna	0,619	53,63	7,37
0,112	1,863	55,88	0,075	0,373	0,277	Tidak Sempurna	0,589	59,73	6,90
0,112	1,863	56,03	0,075	0,429	0,316	Tidak Sempurna	0,569	61,91	10,50
							MAPE (%)		7,19

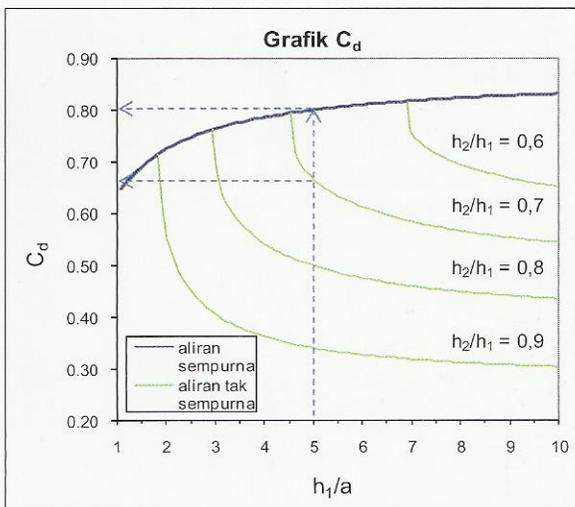
Pada dasarnya debit dapat dihitung dengan memasukkan parameter tersebut ke dalam persamaan debit (persamaan 1 s.d. 6). Namun persamaan tersebut diduga cukup rumit bila dikerjakan tanpa bantuan komputer dan perangkat lunak *spread sheet* (misalkan Microsoft Excell atau Open Office Calc), khususnya saat menghitung nilai koefisien pengaliran ( $C_d$ ). Perhitungan koefisien pengaliran pada aliran sempurna memerlukan setidaknya 5 tahap operasi perhitungan dan pada aliran tidak sempurna 24 tahap perhitungan. Oleh karena itu untuk kemudahan petugas pengukur, perhitungan dapat dibantu dengan menggunakan

alat bantu seperti grafik koefisien pengaliran, tabel atau grafik debit ataupun aplikasi kalkulator debit. Selain itu, satuan setiap variabel pengukuran pun sebaiknya diubah ke dalam bentuk yang umum digunakan di lapangan. Sebagai contoh, satuan debit sebaiknya l/s menyesuaikan dengan satuan debit yang umum digunakan dalam operasi irigasi di tersier. Satuan panjang sebaiknya diubah menjadi cm menyesuaikan dengan alat ukur (mistar, *peil schaal*, dan lain sebagainya) yang umum digunakan di lapangan.

a) Perhitungan debit menggunakan grafik koefisien pengaliran ( $C_d$ )

Koefisien pengaliran disajikan dalam bentuk grafik berdasarkan persamaan 2 s.d. 6 seperti pada Gambar 9. Debit kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Cara ini diduga lebih praktis karena perhitungan hanya dilakukan untuk menghitung debit menggunakan persamaan 1. Beberapa contoh perhitungan debit dengan menggunakan grafik  $C_d$  adalah sebagai berikut:

- i) Pada pintu sorong tonjol lebar 50 cm pada kondisi  $h_1 = 50$  cm dan  $a = 10$  cm pada kondisi aliran sempurna,  $h_1/a$  adalah sebesar 5 sehingga nilai  $C_d$  yang didapatkan yaitu 0,8. Dengan menggunakan rumus debit (persamaan 1) didapatkan debit yang mengalir sebesar 125 l/s.
- ii) Pada pintu sorong tersebut, bila terjadi aliran tidak sempurna misalkan pada saat  $h_2 = 35$  cm,  $h_1/h_2$  adalah sebesar 0,7 sehingga didapatkan nilai  $C_d$  berada diantara 0,60 dan 0,70. Dengan interpolasi didapatkan nilai  $C_d$  sebesar 0,66. Dengan menggunakan rumus debit (persamaan 1) didapatkan debit yang mengalir sebesar 103 l/s.



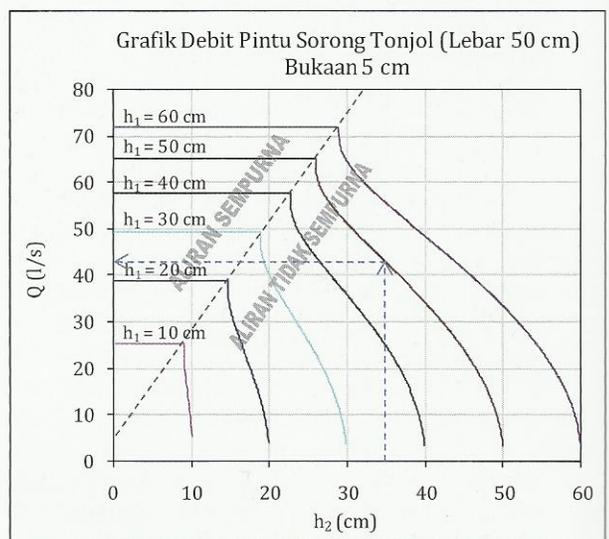
Gambar 9 Grafik Koefisien Pengaliran Pintu Sorong Tonjol

b) Perhitungan debit menggunakan grafik debit

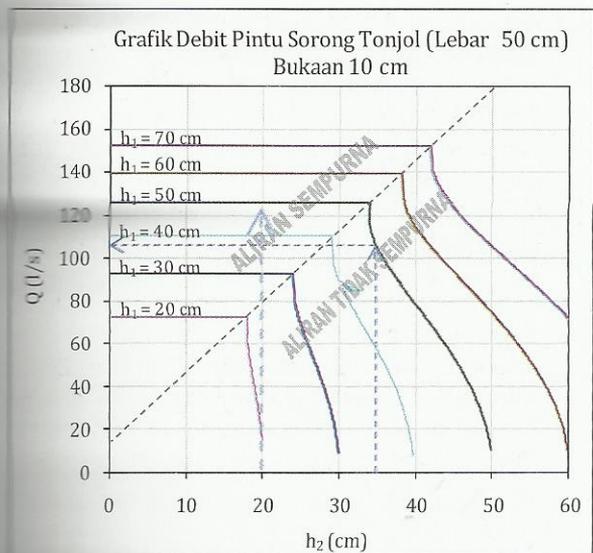
Grafik debit disusun berdasarkan persamaan 1 sampai dengan 6. Karena melibatkan 3 variabel yang berubah-ubah pada lebar pintu yang sama, grafik debit dikembangkan pada setiap bukaan pintu seperti pada Gambar 10 s.d. 12. Dengan demikian petugas lapangan dapat menghitung debit tanpa menggunakan alat bantu hitung. Namun demikian karena setiap bukaan dan lebar pintu

memerlukan grafik debit yang berbeda, petugas perlu dilengkapi banyak grafik. Selain itu karena tidak semua  $h_1$  tercantum dalam grafik, petugas perlu menginterpolasi sehingga ketelitian perhitungan dapat berkurang. Beberapa contoh perhitungan debit menggunakan grafik debit adalah sebagai berikut:

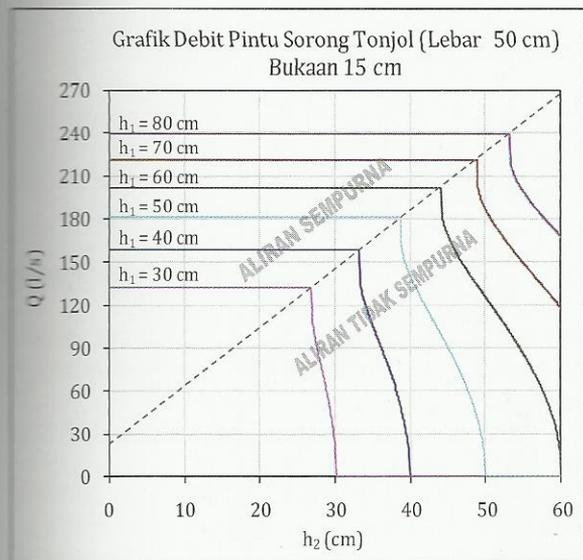
- i) Pada pintu sorong tonjol lebar 50 cm dengan kondisi  $h_1 = 50$  cm,  $h_2 = 20$  cm dan  $a = 10$  cm, perhitungan debit dapat menggunakan Gambar 11. Berdasarkan gambar tersebut didapatkan aliran terjadi pada kondisi aliran sempurna dengan debit sebesar 125 l/s.
- ii) Pada pintu sorong tersebut bila  $h_2 = 35$  cm, aliran terjadi pada kondisi aliran tidak sempurna dengan debit 104 l/s (Gambar 11).
- iii) Pada pintu sorong tersebut bila bukaan pintu sebesar 8 cm dengan  $h_1 = 50$  cm dan  $h_2 = 35$  cm, perhitungan debit dapat dilakukan dengan menginterpolasi karena grafik debit bukaan 8 cm belum tersedia. Interpolasi dilakukan dengan membaca 2 grafik debit yaitu grafik bukaan 5 cm (Gambar 10) dan bukaan 10 cm (Gambar 11). Pada bukaan 5 cm didapatkan debit sebesar 44 l/s dan pada bukaan 10 cm didapatkan debit 104 l/s. Dengan menginterpolasi secara linear, didapatkan debit sebesar 80 l/s. Rumus debit pintu air tidak berbentuk persamaan linear sehingga interpolasi menghasilkan nilai yang tidak tepat. Pada kondisi tersebut bila perhitungan debit dilakukan menggunakan persamaan 1 s.d. 6 didapatkan debit sebesar 76 l/s (selisih 4 l/s bila dihitung berdasarkan interpolasi grafik debit).



Gambar 10 Grafik Debit Pintu Sorong Tonjol Lebar 50 cm pada Bukaan 5 cm



Gambar 11 Grafik Debit Pintu Sorong Tonjol Lebar 50 cm pada Bukaannya 10 cm

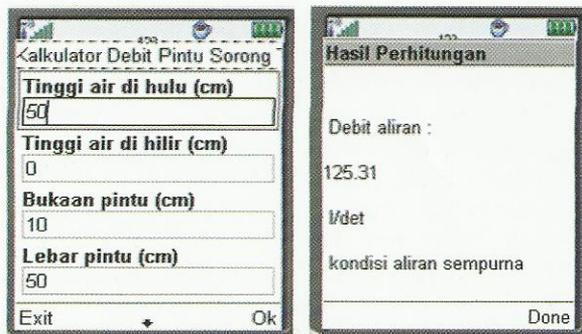


Gambar 12 Grafik Debit Pintu Sorong Tonjol Lebar 50 cm pada Bukaannya 15 cm

c) Perhitungan debit menggunakan kalkulator debit

Untuk kemudahan dan ketelitian, perhitungan debit dapat pula dilakukan menggunakan aplikasi kalkulator debit yang telah dikembangkan dalam bentuk *midlet* Java. Aplikasi ini dapat dioperasikan dengan menggunakan telepon genggam yang memiliki fasilitas java MIDP 2.0. Program didesain sederhana sehingga mudah dioperasikan. Tampilan program yang telah dikembangkan adalah seperti pada Gambar 13. Operator memasukkan parameter yang diukur lalu dengan menekan "OK" hasil pengukuran debit dan kondisi aliran dapat diketahui. Penggunaan metode perhitungan ini lebih dianjurkan dibandingkan dengan metode lainnya karena dapat dilakukan

secara langsung di lapangan, lebih mudah dan tingkat ketelitian perhitungan lebih tinggi.



Gambar 13 Tampilan Program Penghitung Debit

KESIMPULAN

Pintu sorong tonjol berbahan *fiberglass* telah dikembangkan dan diujicobakan di DI Cimanuk dan DI Jatiluhur. Hasil uji coba dan wawancara dengan pengguna menunjukkan bahwa pintu ini dapat menggantikan fungsi pintu air berbahan besi dan memberikan beberapa nilai tambah seperti tahan korosi dan ringan. Pembuatan pintu air *fiberglass* dapat dilakukan secara manual oleh petani, namun demikian untuk pintu berukuran besar, pembuatan sebaiknya dikerjakan di *workshop* khusus *fiberglass* yang saat ini banyak terdapat di lapangan.

Pintu sorong tonjol ini dapat digunakan sebagai alat ukur debit yang cukup akurat. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai koefisien kontraksi sebesar 0,867 dengan MAPE sebesar 3,8% untuk aliran sempurna dan 10,4% untuk aliran tidak sempurna. Pengukuran debit dapat dilakukan dengan mengukur tinggi muka air di hulu, tinggi muka air di hilir dan bukaan pintu.

Untuk kemudahan perhitungan debit di lapangan, petugas pengukur perlu diberi perlengkapan grafik koefisien pengaliran, grafik debit atau aplikasi kalkulator debit. Perhitungan yang akurat dapat dengan mudah dilakukan dengan menggunakan aplikasi kalkulator debit pada telepon genggam yang memiliki fasilitas java MIDP 2.0.

DAFTAR PUSTAKA

Bos, M.G. 1989. *Discharge measurement structures (Third Revision)*. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, Netherland.  
 Dinas Pekerjaan Umum. 1984. *Buku Saku Pengamat dan Juru Pengairan*. Dinas Pekerjaan Umum Propinsi Daerah Tingkat I Jawa Barat.  
 Direktorat Irigasi. 2010. *Kriteria Perencanaan Jaringan Irigasi Bagian Bangunan: KP-04*

- (Revisi 2010). Direktorat Irigasi, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Lin, Chih-Han, Yen, Jung-Fu dan Chang-Tai Tsai. 2002. Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(4): 249-252.
- Pusposutarjo, S. 2001. *Pengembangan Irigasi - Usaha Tani Berkelanjutan dan Gerakan Hemat Air*. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional.
- Roth, A. dan W. H. Hager. 1999. Underflow of standard sluice gate. *Experiments in Fluids*, 27: 339-350.
- Smith, W.F. dan H. Jayad. 2006. *Foundations of Materials Science and Engineering (4<sup>th</sup> edition)*. McGraw-Hill, USA.
- Soeherman dan M. Memed. 1990. *Pintu sorong tonjol sebagai Alat Pengukur dan Pengatur Debit*. Makalah dalam Seminar on Theory and Application on Hydraulic Phenomenon of Hydraulic Structure. Bandung, 22-27 Juni 1990.
- Swamee, P.K. 1992. Sluice-gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(1): 56-60.
- Topley, Kim. 2002. *J2ME™ in a Nutshell*. O'Reilly & Associates, USA.
- Yen, Jung-Fu, Chih-Han Lin, Chang-Tai Tsai. 2001. Hydraulic characteristics and discharge control of sluice gates. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 24(3): 301-310.