

**PEMODELAN DAN PENGUJIAN MODEL DINAMIS SALURAN  
TERBUKA HIDROLIK YANG MENGGUNAKAN WEIR  
SEGITIGA**

**Andreas Setiawan<sup>[1]</sup> , F Dalu Setiaji<sup>[2]</sup>**

<sup>[1]</sup>Fakultas Sains dan Matematika, UKSW, *e-mail*: andre\_fsm@yahoo.com

<sup>[2]</sup>Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer, UKSW, *e-mail*: fdsetiaji@yahoo.com

**INTISARI**

Saluran terbuka merupakan saluran hidrologi yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Namun karena sifatnya terbuka maka karakteristik hidrologinya relatif rumit. Beberapa persamaan praktis, misalnya persamaan Henderson dan Chezy, dapat digunakan untuk memprediksi debit aliran pada saluran terbuka. Namun persamaan tersebut tidak dapat memberikan pengamatan respon dinamis saluran. Pada penelitian ini, dengan metode bondgraph, telah dibangun model dinamis saluran terbuka menggunakan weir segitiga, yang hasilnya berbentuk suatu persamaan non-linear. Hasil pengukuran ketinggian permukaan air dalam saluran terbuka, menunjukkan adanya perbedaan maksimum sekitar 7% pada kondisi stasioner, jika dibandingkan dengan hasil simulasi model. Pada saat peralihan (transient), bentuk kurve ketinggian permukaan air terhadap waktu antara model dan hasil pengukuran juga menunjukkan kesesuaian yang cukup baik.

**Kata kunci:** saluran terbuka, weir segitiga, debit, model dinamis, bond

## 1. PENDAHULUAN

Dalam bidang hidrologi terdapat dua macam saluran jika dilihat dari jenisnya, yaitu saluran terbuka dan saluran tertutup. Perbedaan mendasar dari dua jenis saluran tersebut adalah adanya permukaan bebas pada saluran terbuka, sedangkan pada saluran tertutup seluruh penampang dilewati cairan sehingga tidak ada permukaan bebas. Dengan demikian saluran terbuka pada umumnya mempunyai permukaan bebas yang terhubung langsung dengan atmosfer, sehingga memiliki karakteristik aliran yang lebih kompleks karena banyaknya variabel yang terlibat. Meski pun demikian, model saluran terbuka lebih banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari mulai dari selokan rumah tangga hingga kanal sungai, baik yang alami maupun buatan. Pemilihan saluran terbuka seringkali didasarkan pada proses pembangunannya yang sederhana dan biaya yang relatif murah dibandingkan saluran tertutup.

Salah satu parameter pengukuran hidrologi yang penting adalah debit aliran. Dalam sebuah saluran tertutup dengan distribusi kecepatan yang seragam, misalnya pada pipa, maka cukup mudah untuk memperhitungkan debit alirannya. Namun tidak demikian halnya dengan saluran terbuka, salah satunya akibat distribusi kecepatan yang tidak seragam. Kerumitan akan bertambah jika saluran terbuka tersebut terbentuk secara alami, misalnya sungai dengan struktur yang berkelok, kemiringan yang berubah dan faktor penghambat yang beraneka ragam. [1],[2],[3].

Metode pengukuran sederhana yang sering dilakukan adalah dengan memasang sebuah penghalang atau *weir* yang memiliki ukuran tertentu dan dipasang melintang pada saluran terbuka. Salah satu fungsi *weir* adalah untuk mengukur debit cairan yang mengalir pada saluran, melalui pengukuran tinggi permukaan cairan pada *weir*. Beberapa peneliti telah menyampaikan persamaan untuk memprediksi debit pada sebuah *weir*. Misalnya, persamaan Henderson yang memberikan relasi antara debit dan tinggi cairan untuk penampang saluran terbuka secara umum: [4]

$$Q = \sqrt{2g} \int_0^h b(y) y^{1/2} dy \quad (1)$$

dimana untuk *weir* berbentuk segitiga maka persamaan tersebut menjadi :

$$Q_{Henderson} = C_d \frac{2}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2} \quad (2)$$

**PEMODELAN DAN PENGUJIAN MODEL DINAMIS SALURAN TERBUKA  
HIDROLIK YANG MENGGUNAKAN WEIR SEGITIGA**

*Andreas Setiawan, F Dalu Setiaji*

---

Pendekatan lain didasarkan pada kenyataan bahwa zat cair yang melalui saluran terbuka akan menimbulkan tegangan geser (tahanan) pada dinding saluran, yang diimbangi oleh komponen gaya berat zat cair. Dalam aliran seragam, komponen gaya berat dalam aliran seimbang dengan tahanan geser, yang nilainya tergantung pada kecepatan aliran. Chezy mengasumsikan tegangan geser sebanding dengan kuadrat kecepatan sehingga diperoleh kecepatan aliran :

$$v = C\sqrt{RS_0} \quad (3)$$

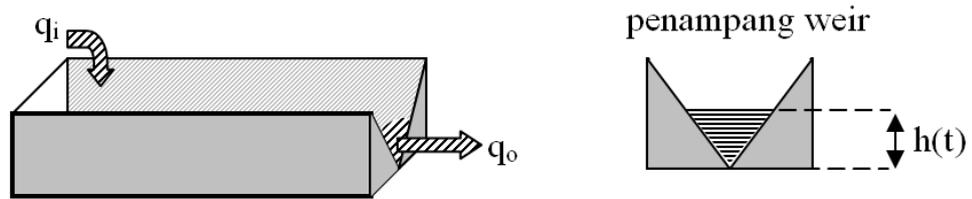
Persamaan (3) tersebut dinamakan persamaan Chezy, dengan  $C$  adalah koefisien Chezy,  $R$  adalah jejari hidrolis,  $S_0$  adalah kecuraman *weir*. [5]

Kedua persamaan di atas banyak dimanfaatkan untuk perhitungan debit saluran terbuka. Namun karena ditujukan untuk keperluan praktis maka perhitungan debit menggunakan asumsi bahwa kecepatan adalah seragam dan aliran sudah dalam keadaan tunak.

Sedangkan pada makalah ini akan disampaikan konstruksi persamaan dinamis gayut waktu untuk saluran terbuka dengan *weir*, sehingga respon saluran terhadap perubahan debit dapat diamati. Model akan dibangun dengan memanfaatkan metode *Bondgraph*, dilanjutkan dengan simulasi model dan pengujian pada saluran terbuka yang direalisasikan.

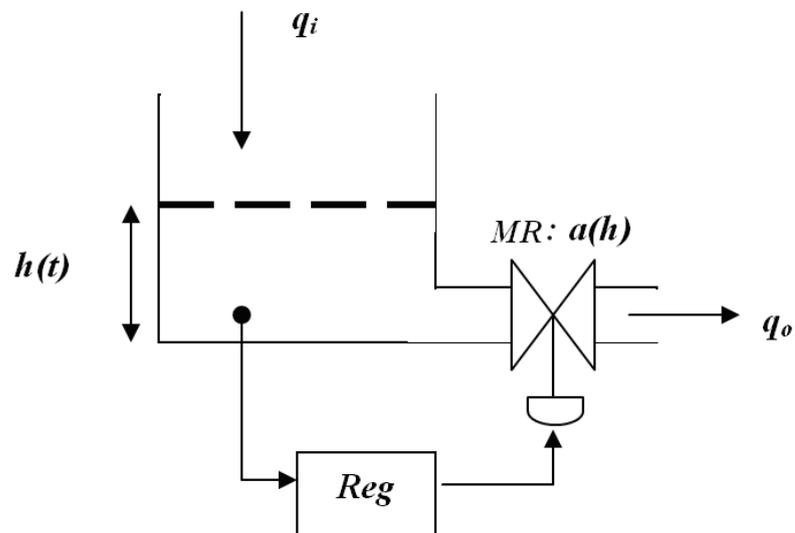
## **2. PEMBENTUKAN MODEL**

Pada saluran terbuka dengan menggunakan *weir* maka luas penampang saluran buangan akan terus berubah sesuai dengan fungsi ketinggian permukaan cairan,  $h$ , seperti tampak pada Gambar 1. Model tangki yang identik untuk membantu pembentukan model ditampilkan pada Gambar 2. Luas penampang saluran pembuangan identik dengan sebuah katup yang terkontrol oleh  $h$ , yang berubah terhadap waktu.

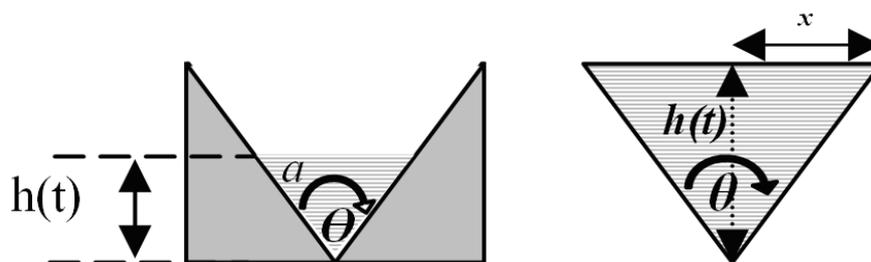


Gambar 1. Saluran terbuka dengan weir.

Luasan  $a$  adalah luas penampang weir yang dilewati oleh air dengan setinggi  $h$ . Fungsi  $a(h)$  dapat diturunkan dengan menghitung luas penampang seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Model saluran terbuka dengan Modulated Resistor MR.



Gambar 3. Perhitungan luas penampang  $a(h)$ .

$$\begin{aligned}
 x(t) &= h(t) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \\
 a(h) &= 2 \times \frac{h(t) \times x(t)}{2} = h^2(t) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Pada makalah ini digunakan weir yang memiliki sudut  $\theta = 90^\circ$ , sehingga:

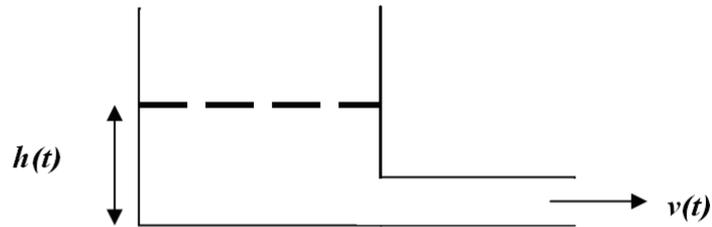
**PEMODELAN DAN PENGUJIAN MODEL DINAMIS SALURAN TERBUKA  
HIDROLIK YANG MENGGUNAKAN WEIR SEGITIGA**

*Andreas Setiawan, F Dalu Setiaji*

---

$$a(h) = h^2(t) \tag{5}$$

Selanjutnya sebelum melakukan pemodelan, diperlukan persamaan debit,  $q_R$ , yang melewati penampang  $a$ . Untuk itu dapat digunakan persamaan kekekalan energi seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Konversi energi potensial menjadi energi kinetik.

*Energi awal = Energi akhir*

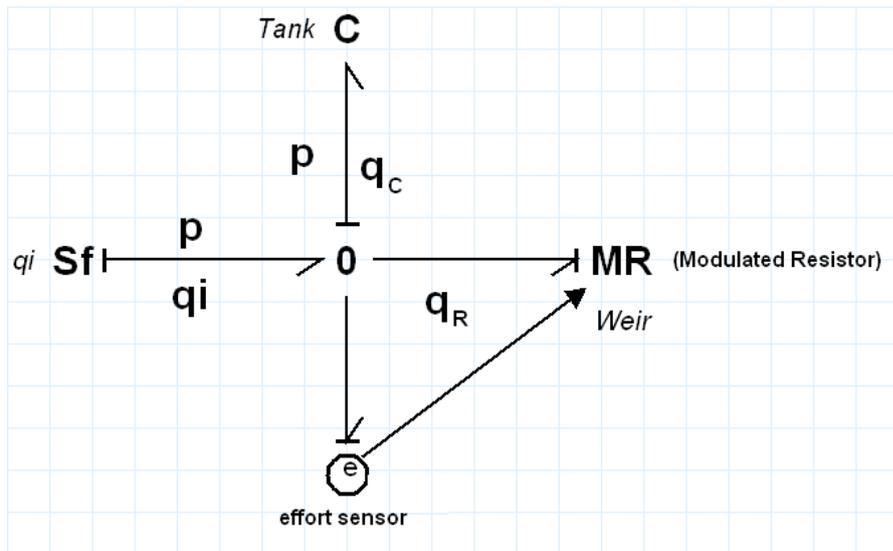
$$mgh(t) = \frac{1}{2}mv^2(t)$$

$$v(t) = \sqrt{2gh(t)}$$

$$\begin{aligned} q_R &= a(h)v(t) \\ &= a(h)\sqrt{2gh(t)} \end{aligned} \tag{6}$$

Pada makalah ini fluktuasi  $h$  dianggap tidak terlalu besar, sehingga tekanan pada dasar tangki relatif sama dengan tekanan pada penampang *weir*. Untuk membentuk *bondgraph* digunakan komponen: *Source flow* yaitu  $S_f:q_i$ , *Storage elements*  $C:C_1$  dan *Resistive elements*  $R:R_1$ . [6]

Karena tekanan serba sama maka *junction* antara tank ( $C$ ) dan *weir* ( $R$ ) adalah paralel (0). Diagram *bondgraph* ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Bondgraph untuk saluran terbuka

Resistive element  $R$  dimodifikasi menjadi *Modulated Resistor* (MR) karena dalam kasus saluran terbuka dengan *weir* maka nilai resistans akan berubah sebagai fungsi  $h$ .

*Effort sensor* digunakan untuk mendeteksi perubahan *effort* dalam hal ini adalah tekanan  $p$ . Hal ini diperlukan karena luas penampang  $a$  merupakan fungsi  $h$  dimana perubahan  $h$  sama dengan perubahan tekanan  $p$  (*effort*).

Dari *bondgraph* di atas dapat dibentuk model matematis saluran terbuka. Karena keluaran yang dicari adalah  $h$  yang berada di lengan  $C$  maka langkah pemodelan dapat diawali dengan mencari nilai  $q_C$ .

Karena jenis *junction* adalah paralel (0) maka persamaan *effort* dalam hal ini *flow* berbentuk:

$$\begin{aligned} q_i &= q_C + q_R \\ q_C &= q_i - q_R \\ &= q_i - a(h)\sqrt{2gh(t)} \end{aligned} \tag{7}$$

Pada kasus *flow storage* maka hubungan *effort* dan *flow* berbentuk:

$$e = \frac{1}{\beta} \int f \Rightarrow \dot{e} = \frac{1}{\beta} f \tag{8}$$

Dalam hal ini  $e:p$ ,  $f:q_i$  dan  $\beta:C$  sehingga:

$$\dot{e} = \frac{1}{\beta} f$$

$$\dot{p} = \frac{1}{C} q_i \quad \text{dimana} \quad p = \frac{\rho g A h(t)}{A} = \rho g h(t)$$

$$\rho g \frac{d}{dt} h(t) = \frac{1}{\frac{A}{\rho g}} \left[ q_i - a(h) \sqrt{2gh(t)} \right]$$

$$\frac{d}{dt} h(t) = \frac{1}{A} \left[ q_i - a(h) \sqrt{2gh(t)} \right]$$

$$\frac{d}{dt} h(t) = \frac{1}{A} \left[ q_i - a(h) \sqrt{2gh(t)} \right] \quad \text{dimana} \quad a(h) = h^2(t) \quad (9)$$

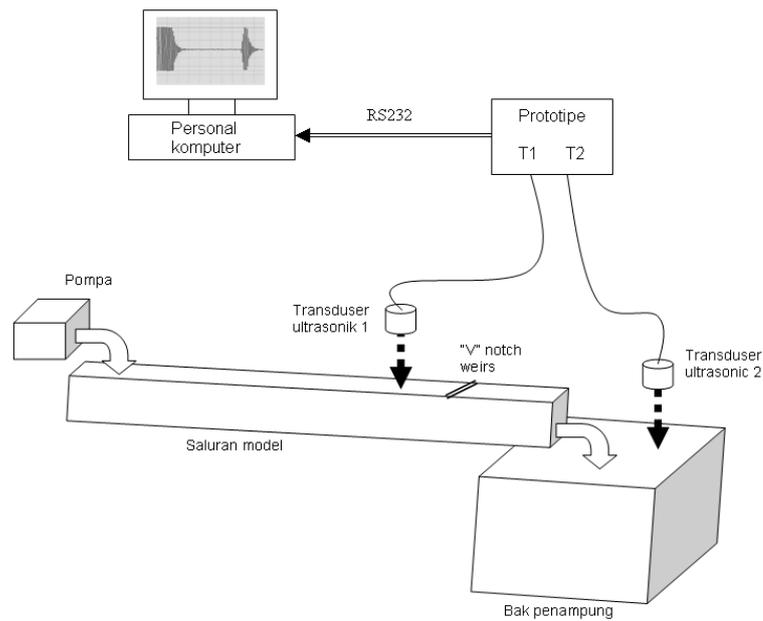
$$= \frac{1}{A} \left[ q_i - \sqrt{2g} h^2(t) h^{1/2}(t) \right]$$

$$\frac{d}{dt} h(t) = \frac{1}{A} \left[ q_i - \sqrt{2g} h(t)^{5/2} \right] \quad (10)$$

Jadi hasil pemodelan ketinggian air pada saluran dengan menggunakan metode *bondgraph* tersebut berbentuk sebuah fungsi non-linear karena adanya suku  $h^{5/2}$ .

### 3. PERCOBAAN

Untuk menguji model saluran terbuka tersebut, dilakukan percobaan dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik 200 kHz. Transduser ultrasonik T<sub>1</sub> digunakan untuk mengukur tinggi permukaan cairan (yaitu air),  $h$ , sedangkan T<sub>2</sub> digunakan untuk mengukur ketinggian bak penampung yang nantinya dikonversi menjadi debit  $q_i$ . Susunan percobaan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 6. Panjang model saluran terbuka adalah 150(cm) dengan ukuran penampang 10,5(cm)x11,8(cm). Dengan demikian luas penampang air yang berhubungan dengan udara, A, adalah 150(cm)x11,8(cm)=0,1770(m<sup>2</sup>). Model saluran terbuka yang direalisasikan cukup panjang sehingga pengukuran debit  $q_i$  dilakukan pada *outlet* saluran yang cukup dekat dengan *weir*, agar waktu tunda dari *inlet* dapat diabaikan.



Gambar 6. Susunan percobaan saluran terbuka dengan pengukuran menggunakan gelombang ultrasonik.

#### 4. HASIL DAN ANALISIS

Fungsi non-linear  $h$  disimulasikan di *Matlab* dengan menggunakan *s-function* dalam *Simulink*. Cuplikan bagian fungsi non-linear yang dimasukkan ke dalam *s-function* ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

```

%-----
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
% PARAMETER PROSES:
global TankArea Grav X_Init

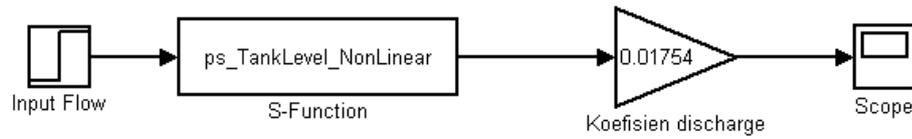
% process variables & calculation
global q_out h_level
h_level = x(1) ;
q_out = sqrt( 2 * Grav * h_level)*h_level*h_level;

sys = [ h_level ] ;
% end mdlOutputs
%=====
    
```

Gambar 7. Cuplikan program dalam *s-function*

**PEMODELAN DAN PENGUJIAN MODEL DINAMIS SALURAN TERBUKA  
HIDROLIK YANG MENGGUNAKAN WEIR SEGITIGA**

Andreas Setiawan, F Dalu Setiaji



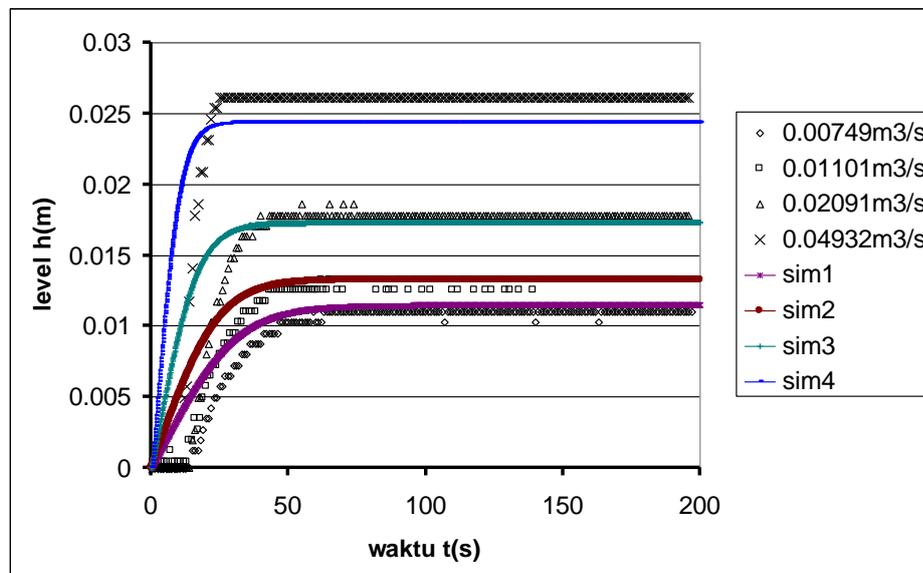
Gambar 8. Diagram blok Simulink untuk pengujian model.

Koefisien *discharge* dipilih sebesar 0,0175, karena dengan nilai tersebut telah didapatkan perbedaan terkecil antara hasil pengukuran dan hasil simulasi ketinggian permukaan air,  $h$ .

Pada percobaan dilakukan pengukuran  $h$  untuk empat nilai debit air yang berbeda, dengan maksud untuk mengetahui apakah model yang dibuat cukup akurat jika debit berubah-ubah. Hasil percobaan dan hasil dari model ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 9.

Tabel 1. Perbandingan hasil percobaan dan simulasi (pemodelan) ketinggian permukaan air,  $h$ , untuk beberapa nilai debit.

No.	debit(m <sup>3</sup> /s)	$h$ (m)		Perbedaan (%)
		Pengukuran	Pemodelan	
1	0,00749	0,011090	0,011457	3,310991
2	0,01101	0,013277	0,013268	0,065308
3	0,02091	0,017813	0,017275	3,018138
4	0,04932	0,026129	0,024349	6,809334



Gambar 9. Perbandingan kurva  $h(t)$  antara hasil percobaan dan simulasi, untuk empat nilai debit air yang berbeda.

## 5. PENUTUP

Dari hasil perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi ketinggian permukaan air,  $h$ , didapatkan perbedaan maksimal sekitar 7% pada keadaan tunak. Sedangkan pada keadaan peralihan (*transient*), gradien kurve  $h(t)$  antara model dan hasil pengukuran menunjukkan kesesuaian yang cukup baik. Perbedaan yang terjadi kemungkinan disebabkan oleh asumsi bahwa tekanan air adalah seragam pada seluruh penampang *weir*, sehingga untuk penelitian selanjutnya, faktor ini perlu diperhitungkan. Penyusunan *bondgraph* yang lebih lengkap, misalnya dengan menambahkan parameter *roughness coefficient*, kemungkinan dapat menghasilkan model yang lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Carlos A. Gonzalez, Hubert Chanson, **Experimental Measurements of Velocity and Pressure Distributions on a Large Broad-Crested Weir**, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 16, 2007.
- [2] Mahmoud F. Maghrebi, Majid Rahimpour, **A Simple Model for Estimation of Dimensionless Isovel Contours in Open Channels**, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol.16, 2005.
- [3] Richard W. Jones, **A Method for Comparing The Performance of Open Channel Velocity-Area Flow Meters and Critical Depth flow Meters**, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 13, 2002.
- [4] M. Hanif Chaudhry, *Open-Channel Flow 2<sup>nd</sup> ed.*, 2008, Springer, New York.
- [5] Bambang Triadmojo, *Hidraulika II*, 2003, Beta Offset, Yogyakarta.
- [6] Lennart Ljung, Torkel Glad, *Modeling of Dynamic Systems*, 1994, Prentice Hall, New Jersey.