

Peningkatan Kompetensi Pemodelan Dinamika Sistem Fisis melalui Integrasi Pendekatan *First Principles* dan *Bond Graph*

Eko Mursito Budi^{1,a)}, Estiyanti Ekawati^{1,b)}

¹Kelompok Keilmuan Instrumentasi dan Kontrol,
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} mursito@tf.itb.ac.id

^{b)} esti@tf.itb.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Kemampuan merepresentasikan berbagai fenomena fisis dalam persamaan bentuk persamaan matematis sangat penting dalam pengembangan keahlian bidang instrumentasi dan kontrol di Perguruan Tinggi. Karena itu, dilaksanakan berbagai pengembangan sistem pembelajaran pada kuliah Dinamika Sistem dan Simulasi pada tingkat sarjana Program Studi Teknik Fisika ITB. Salah satu pengembangan sistem pembelajaran tersebut adalah penggunaan metode Bond Graph untuk memodelkan interaksi fenomena fisis yang berbeda, contohnya sistem elektro-mekanik, sistem elektro-hidraulik dan sejenisnya. Pada penelitian ini dianalisis perkembangan kemampuan mahasiswa dalam pemodelan sistem dinamik dalam kurun waktu tiga tahun akademik dan metode pengajaran yang berbeda. Metode yang diperbandingkan adalah penggunaan (1) metode Bond Graph sepenuhnya, (2) metode First Principles dan identifikasi sistem dilanjutkan dengan metode Bond Graph. Perbandingan kemampuan mahasiswa dianalisis secara statistik melalui evaluasi langsung terhadap penyelesaian kasus pemodelan. Hasilnya ditriangulasi dengan evaluasi tak langsung mengenai persepsi mahasiswa terhadap pelaksanaan perkuliahan.

Kata-kata kunci: Pemodelan, Dinamika Sistem, First Principles, Bond Graph

PENDAHULUAN

Sesuai prinsip pendidikan berbasis luaran (*outcomes based education*), Program Studi Teknik Fisika ITB menetapkan bahwa salah satu profil lulusan program sarjananya adalah menjadi ahli instrumentasi dan kontrol. Untuk membangun kompetensi yang diperlukan bagi profesi tersebut, telah disusun kurikulum berdasar standar KKNi [1] dengan capaian pembelajaran (CP) seperti diberikan pada Tabel 1. Penguasaan kompetensi pengetahuan umum diberikan melalui beberapa kuliah yang tinggi muatan matematika maupun sains rekayasanya (Matematika Rekayasa, Termodinamika, Mekanika Teknik, dll.). Selanjutnya, ada tiga kuliah yang memberi keterampilan khusus instrumentasi dan kontrol (Metode Komputasi, Metode Pengukuran, Kontrol Otomatik). Di antara kedua kelompok tersebut, terdapat kuliah Dinamika Sistem dan Simulasi (DSS), yang mengemban tugas untuk memberi capaian pembelajaran P1, P2, dan K2. Namun, dalam perjalannya ditemukan bahwa capaian tersebut belum cukup, sehingga akhirnya ditambah lagi dengan K1.

Padatnya capaian pembelajaran yang diamanahkan pada kuliah DSS menunjukkan bahwa kuliah ini berperan penting sebagai jembatan penting antara pengetahuan umum dan keterampilan khusus. Karena itu, makalah ini menguraikan proses pengembangan metode pembelajaran kuliah tersebut di Program Studi Teknik Fisika ITB pada tahun akademik (TA) 2014-2015, TA 2015-2016 dan TA 2016-2017 serta analisis kinerjanya.

Tabel 1. Kompetensi dan Capaian Pembelajaran untuk Profil Ahli Instrumentasi dan Kontrol

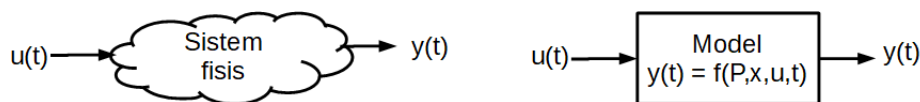
Aspek KKNI	Capaian Pembelajaran	Rangkaian kuliah
Pengetahuan umum	P1. Mampu mengaplikasikan prinsip matematika dalam rekayasa	Matematika Rekayasa I Matematika Rekayasa II Dinamika Sistem & Simulasi
	P2. Mampu mengaplikasikan prinsip sains (listrik, termal, mekanika, fluida) dalam rekayasa multi-disiplin	Rangkaian Listrik & Elektronika Termodinamika Mekanika Teknik Mekanika Fluida Dinamika Sistem & Simulasi
Keterampilan Khusus	K1. Mampu melaksanakan eksperimen untuk mengukur berbagai besaran fisis, menganalisis hasil, dan menyimpulkan	Metode Pengukuran Dinamika Sistem & Simulasi
	K2. Mampu melaksanakan simulasi sistem fisis, dan mengevaluasi hasil simulasi	Metode Komputasi Dinamika Sistem & Simulasi
	K3. Mampu mendesain sistem tertentu (instrumentasi dan kontrol) berdasar fenomena multifisis	Kontrol Otomatik

Uraian tersebut diorganisasikan dalam tiga bagian utama. Pada bab berikut, diuraikan pengembangan metode pembelajaran pada ketiga TA. Selanjutnya, kinerja pembelajaran dievaluasi melalui asesmen langsung, yaitu hasil tugas besar mahasiswa; serta melalui asesmen tidak langsung, yaitu persepsi mahasiswa terhadap pelaksanaan perkuliahan. Makalah ini diakhiri dengan kesimpulan yang merangkum pencapaian pembelajaran selama periode TA 2014-2015 sampai dengan TA 2016-2017.

METODE PEMBELAJARAN

Dalam konteks dinamika sistem, pemodelan adalah upaya merepresentasikan sistem fisis sebagai fungsi matematis yang menghubungkan tanggapan sinyal luaran terhadap sinyal masukan dalam domain waktu. Secara umum, fungsi matematis ini memiliki (Gambar 4) :

Variabel masukan (u), variabel luaran (y), maupun variabel keadaan internal (x)
Parameter sistem (P)



Gambar 4. Prinsip Pemodelan Sistem Dinamik

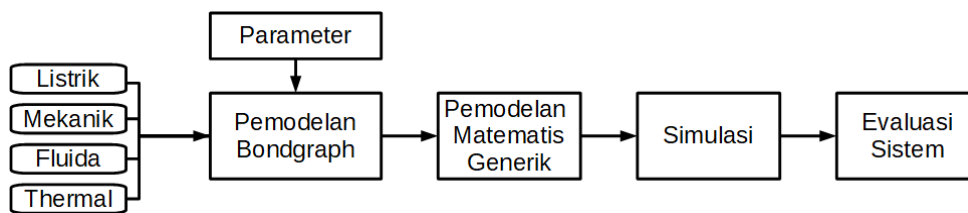
Pada TA 2014-2015, silabus kuliah DSS dibangun sepenuhnya berdasarkan metode *Bond-Graph* [1][5] yang ampuh untuk memodelkan interkoneksi berbagai sistem fisis (listrik, mekanik, fluida, termal, dll). Seperti diperlihatkan pada Gambar 5, prosedur umum pemodelan ini adalah:

Merepresentasikan berbagai sistem fisis sebagai model *Bond-Graph*. Keistimewaan metode *Bond-Graph* adalah, pada tahap ini seluruh variabel sistem fisis disetarakan menjadi variabel generik (berupa potensial dan aliran energi/material). Demikian pula parameter sistem disetarakan atas sifat resistansi, kapasitansi, dan induktansi. Inilah langkah kunci yang menyebabkan metode *Bond-Graph* cocok untuk pemodelan sistem fisis multi-fisis.

Menganalisis model *Bond-Graph*, sehingga diperoleh model matematis generik dalam bentuk *Ordinary Differential Equation* (ODE) atau *Algebraic Differential Equation* (DAE).

Model matematis disimulasikan secara komputasional, misalnya dengan metode *Euler* atau *Runge-Kutta* [4]

Hasil simulasi dievaluasi untuk mendapatkan kinerja sistem, misalnya *rise time*, *maximum overshoot*, maupun *settling time* [6].



Gambar 5. Prosedur Pemodelan Metode *Bond-Graph*

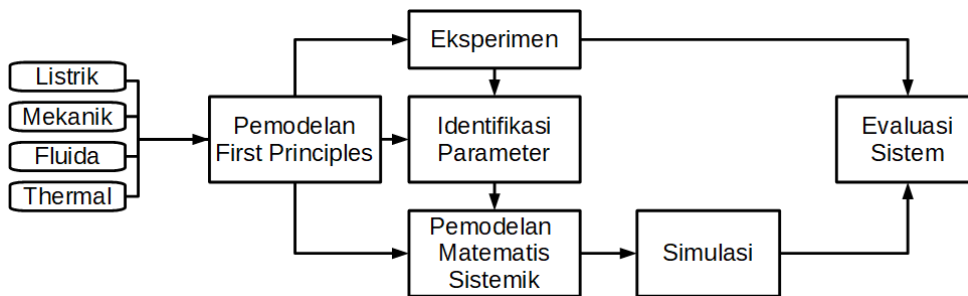
Masing-masing tahap tersebut menjadi bahan kajian (BK) [1] kuliah DSS. Metode tersebut diajarkan dengan satuan acara pengajaran seperti pada Tabel 2. Namun, berdasarkan evaluasi di akhir TA ini, mahasiswa umumnya kesulitan pada langkah pertama, meskipun lancar mengerjakan tahap kedua dan seterusnya. Hal ini disebabkan oleh karena langkah pertama memerlukan analisis mendalam tentang sistem fisis, sementara langkah kedua dan seterusnya sudah ada prosedur bakunya. Selain itu, karena model matematis yang dihasilkan metode *Bond Graph* bersifat generik, mahasiswa kehilangan arti fisis variabel maupun parameter sistem. Akibatnya saat evaluasi, pembahasan kinerja sistem umumnya kurang mendalam, sekedar menampilkan angka kuantitatif tanpa keterkaitan dengan sistem aslinya.

Tabel 2. Satuan Acara Pengajaran Kuliah Dinamika Sistem dan Simulasi TA 2014-2015

Minggu	Capaian Pembelajaran	Bahan Kajian	Metode Belajar	Metode Assesmen
1-4	P2	Pemodelan bond-graph (elektrik, mekanik)	Kelas E-Learning	Quiz online
5-6	P1	Pemodelan matematis generik (ODE)	Kelas E-Learning	Quiz online
7	K2	Simulasi dan Evaluasi sistem	Kelas Praktikum komputasi	Tugas
8	UTS			Ujian tertulis
9-10	P2	Pemodelan bond-graph (fluida, thermal)	Kelas E-Learning	Quiz online
11-13	P1	Pemodelan matematis generik (DAE)	Kelas E-Learning	Quiz online
14-15	K2	Simulasi dan Evaluasi sistem	Kelas Praktikum komputasi	Tugas
16	UAS			Ujian tertulis

Belajar dari pengalaman TA 2104-2015 dan untuk membekali mahasiswa agar mampu memaknai pada model matematis terhadap sistem fisisnya, maka pada TA 2015-2016 dilakukan penambahan capaian pembelajaran K1. Karena itu, silabus juga dimodifikasi dengan menggunakan metode *First Principles* [7] dan identifikasi sistem [8]. Artinya, mahasiswa dilatih lebih dahulu untuk menurunkan model sistem fisis berdasarkan hukum Sains (Matematika, Fisika, Kimia, Biologi) yang fundamental dan relevan dengan kasus yang ditangani [7], kemudian memvalidasinya dengan eksperimen [8]. Pada metode ini, pemodelan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut (Gambar 3):

1. Menurunkan model *First-Principles* [7] langsung dari sistem fisis, menjadi bentuk ODE atau DAE.
2. Berdasar model tersebut, dapat dilakukan eksperimen terhadap sistem fisis untuk mengamati sinyal luaran (y) terhadap sinyal masukan (u).
3. Dari hasil eksperimen, dapat dilakukan identifikasi parameter sistem (P) [8]
4. Hasil identifikasi disubstitusikan ke model, sehingga diperoleh model matematis yang sistemik (variabel maupun parameter masih mirip seperti sistem asli)
5. Model matematis ini disimulasikan secara komputasional.
6. Hasil simulasi dievaluasi untuk mendapatkan kinerja sistem. Selain itu, hasil simulasi dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen sehingga pemodelan dan simulasi dapat tervalidasi.



Gambar 6. Prosedur Pemodelan Metode *First-Principles*

Selama bekerja dengan metode ini, mahasiswa selalu terpapar pada variabel dan parameter fisis. Lebih jauh lagi, prosedur ini melibatkan pemikiran dan kerja analitis, komputasional, maupun eksperimental dengan validasi antar ketiganya.

Berdasarkan penerapan ini, terlihat bahwa metode *First-Principle* lebih praktis dan terpadu untuk memodelkan satu jenis sistem fisis. Sementara itu metode *Bond-Graph* menyediakan prosedur yang lebih baku untuk memodelkan sistem multi-fisis (misalnya sistem elektro-mekanik, atau elektro-hidrolik). Karena masing-masing metode memiliki kelebihan yang saling mengisi, pada TA 2015-2016 dilakukan peningkatan SAP seperti diberikan pada Tabel 3. Terlihat bahwa materi yang diberikan menjadi lebih banyak dan padat dibanding SAP sebelumnya. Meski demikian, pendekatan ini diharapkan lebih mudah diikuti oleh mahasiswa.

Tabel 3. Satuan Acara Pengajaran Kuliah Dinamika Sistem dan Simulasi TA 2015-2016

Mg	Capaian Pembelajaran	Bahan Kajian	Metode Belajar	Metode Assesmen
1-4	P2	Pemodelan First-Principle (fluida, thermal)	Kelas E-Learning	Quiz online
5	K1	Eksperimen	Kelas Praktikum	Tugas
6	K1	Identifikasi Parameter	Kelas Praktikum	
7	P1	Pemodelan matematika sistemik	Kelas E-Learning	Quiz online
8	UTS			Ujian tertulis
9-10	P2	Pemodelan First-Principle (listrik, mekanik)	Kelas E-Learning	
11-12	P2	Pemodelan bond-graph (multi-fisis)	Kelas E-Learning	Quiz online
13	P1	Pemodelan matematika generik	Kelas E-Learning	Quiz online
14	K2	Simulasi	Kelas Praktikum	Tugas
15	K2	Evaluasi Sistem	Kelas Praktikum	
16	UAS			Ujian tertulis

ANALISIS KINERJA PEMBELAJARAN KULIAH DINAMIKA SISTEM DAN SIMULASI

Untuk menguji efektifitas pengembangan sistem pembelajaran pada periode TA 2014-2015 sampai dengan TA 2016-2017, dilaksanakan analisis kinerja pembelajaran asesmen langsung dan asesmen tidak langsung. Asesmen langsung dilaksanakan pada tugas pemodelan dan simulasi kelompok. Asesmen tidak langsung dilaksanakan terhadap persepsi mahasiswa yang dijarah melalui kuesioner akhir semester.

Asesmen Langsung

Pada peneitian ini, pengukuran kinerja kelas terhadap pengembangan sistem pembelajaran diukur secara kualitatif terhadap tugas kelompok pemodelan dan simulasi. Media ini dipilih karena secara lengkap menampilkan seluruh kinerja pembelajaran mahasiswa. Analisisnya dilaksanakan secara kualitatif, karena beban kerja yang dilaksanakan pada kedua TA ini sangat berbeda karakteristiknya. Tabel 4 memberikan contoh tugas kelompok pada TA 2014-2015 dan TA 2015-2016.

Tabel 4. Soal Tugas Pemodelan dan Simulasi TA 2014-2015 dan TA 2015-2016

Tugas Pemodelan dan Simulasi	
TA 2014-2015	TA 2015-2016
Diberikan sebuah katrol yang digerakkan dengan motor listrik. Lakukan: a. Turunkan model <i>Bond-Graph</i> sistem tersebut (CP P2) b. Tentukan parameter sistem dari spesifikasi maupun pengukuran (CP K1) c. Turunkan model matematis sistem tersebut (CP P1) d. Lakukan simulasi sistem dan simpulkan kinerja nya (CP K2)	Buatlah suatu tangki fluida dengan lubang di bawahnya. Lakukan : a. Turunkan model fisis sistem tangki fluida tersebut (CP P2) b. Lakukan dua kali eksperimen pengosongan tangki fluida dengan tinggi air awal berbeda (h_A dan h_B). Ukur dan catat tinggi air dalam tangki terhadap waktu. (CP K1) c. Turunkan model matematis sistem untuk identifikasi parameter (CP P1) d. Gunakan data eksperimen h_A untuk identifikasi parameter sistem tangki tersebut (CP K1) e. Buat program simulasi pengosongan tangki menggunakan model matematis tersebut (CP K2) f. Bandingkan hasil simulasi terhadap hasil eksperimen h_B (CP K1 dan K2)

Tabel 4 menunjukkan bahwa pada TA 2014-2015 mahasiswa berhadapan dengan sistem elektromekanik yang kompleks, namun hanya melakukan pemodelan dan simulasi. Contoh hasil kerja mahasiswa ditunjukkan pada Tabel 5. Pada kasus ini, mahasiswa kekurangan data fisis yang diperlukan untuk menentukan parameter sistem, karena instrumen yang dibutuhkan untuk mengukur perubahan variabel sistem tidak tersedia. Karena itu, hasil simulasi tidak dapat dibandingkan langsung dengan kondisi nyatanya.

Pada TA 2015-2016, mahasiswa diajak melakukan eksperimen dan sungguh-sungguh melakukan pengukuran variabel maupun parameter sistem. Konsekuensinya, sistem yang ditangani meliputi satu fenomena fluida, yaitu tinggi permukaan cairan. Kondisi ini lebih sederhana namun dapat diukur dengan baik. Dengan adanya data fisis tersebut, mahasiswa dapat menentukan parameter sistem, melakukan simulasi dan memvalidasinya terhadap kondisi nyata. Tabel 6 menunjukkan contoh jawaban mahasiswa terhadap tugas ini. Jawaban yang diberikan menunjukkan bahwa mahasiswa memahami hubungan antara variabel dan parameter fisis terhadap model. Simulasi yang dilakukan juga dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen. Dengan demikian mahasiswa siap diajak memahami sistem-sistem yang lebih kompleks.

Asesmen Tidak Langsung

Kuesioner Akhir Semester merupakan penilaian persepsional yang dilakukan oleh mahasiswa terhadap kondisi perkuliahan yang dilaksanakan secara daring pada Sistem Informasi Akademik ITB. Bagi mahasiswa ITB, pengisian kuesioner ini merupakan syarat untuk dapat mengetahui nilai akhir mata kuliahnya. Pertanyaan dalam kuesioner ini meminta mahasiswa memberikan penilaian persepsional atas kemampuan, komitmen dan sikap dosen serta penyelenggaraan perkuliahan.

Kuesioner ini telah berjalan sejak TA 2009-2010 (periode 1). Persepsi mahasiswa dijarah dalam skala 0-4, di mana 0 adalah nilai minimum dan 4 adalah nilai maksimum. Pada TA 2016-2017, kuesioner ini diperbaharui dalam hal kategori dan aspek persepsinya (periode 2). Menyikapi perubahan ini, serta untuk menghasilkan asesmen tidak langsung yang berkesinambungan antar periode, maka daftar pertanyaan kuesioner pada kedua periode ditampilkan pada empat kolom pertama Tabel 7, dan pemetaan aspek persepsional kedua kuesioner ditunjukkan pada dua kolom terakhir Tabel 7.

Tabel 5. Contoh Jawaban Mahasiswa terhadap Tugas Pemodelan dan Simulasi TA 2014-2015 [6]

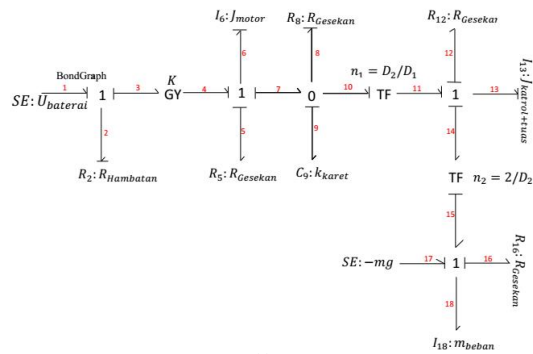
a. Sistem katrol:



Sistem yang dibuat adalah sistem katrol, seperti crane. Pertama motor dinyalakan (maju) dan menggerakkan roda kuning. Lalu karet (pegas) menghubungkan dengan roda besar yang terhubung ke katrol. Katrol mulai bergerak dan menurunkan beban. Ketika motor dinyalakan pada arah yang berlawanan (mundur) maka beban akan dibawa naik.

b. Model Bond Graph dan model matematisnya

Dinamika pergerakan beban terhadap putaran motor



$$G(s) = \frac{F(s)}{X(s)} = \frac{N}{as^3 + bs^2 + cs + d}$$

Dengan nilai konstanta a, b, c, d, N seperti pada penurunan ODE

$$a = \frac{R_2}{K} I_6 \left(\frac{n_2 I_{13} + I_{18}}{n_1 k} \right)$$

$$b = \left(\frac{R_2}{K} R_5 + K \right) \left(\frac{n_2 I_{13} + I_{18}}{n_1 k} \right) + \frac{R_2}{K} I_6 \left(\frac{n_2 I_{13} + I_{18}}{n_1 R_8} + \frac{n_2 R_{12} + R_{16}}{n_1 k} \right)$$

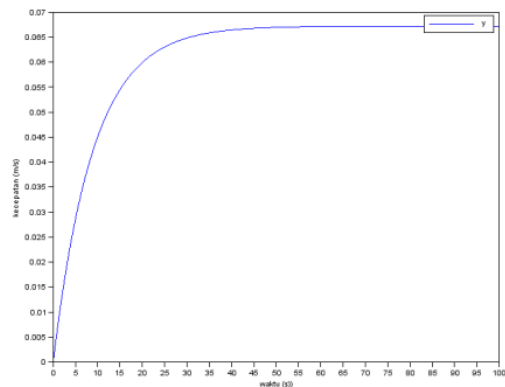
$$c = \left(\frac{R_2}{K} R_5 + K \right) \left(\frac{n_2 I_{13} + I_{18}}{n_1 R_8} + \frac{n_2 R_{12} + R_{16}}{n_1 k} \right) + \frac{R_2}{K} I_6 \left(\frac{n_2 I_{13} + I_{18}}{n_1 R_8} + \frac{n_2 R_{12} + R_{16}}{n_1 k} \right) + \frac{R_2}{K} \frac{(n_2 I_{13} + I_{18})}{n_1}$$

$$d = \left(\frac{R_2}{K} R_5 + K \right) \left(\frac{n_2 R_{12} + R_{16}}{n_1 R_8} + n_1 n_2 \right) + \frac{R_2 (n_2 R_{12} + R_{16})}{K n_1}$$

$$N = e_1 + \left(\frac{R_2}{K} R_5 + K \right) e_{17} + \frac{R_2}{K} \frac{e_{17}}{n_1} + \frac{R_2}{K} I_6 e'_{17}$$

c. Program dan hasil simulasi sistem

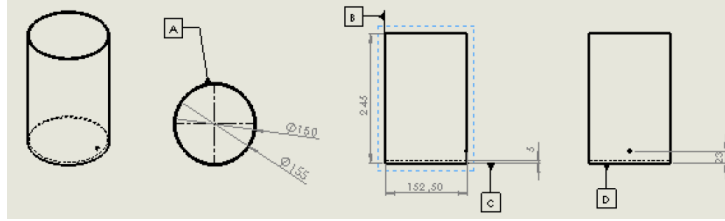
```
// Problem function
function zdot=katrolmassa(t, z)
// Compute input
Vin=U;
g=9.831;
n1=D2/D1;
n2=2/D2;
a=(R2*I6)*(n2*I13+m)/(K*n1*k);
b=((R2*R5/K) + K)*((n2*I13+m)/(n1*k))+((R2*I6/K)*((n2*I13+m)/(n1*R8)))+((n2*R12+R16)/(n1*k));
c=((R2*R5/K) + K)*((n2*I13+m)/(n1*R8)+(n2*R12+R16)/(n1*k))+((R2*I6/K)*((n2*I13+m)/(n1*R8)))+(n2*R12+R16)/(n1*k)+((R2/K)*((n2*I13+m)/(n1)));
d=((R2*R5/K) + K)*((n2*R12+R16)/(n1*R8))+n1*n2+((R2/K)*((n2*R12+R16)/(n1)));
N= Vin +((R2*R5/K)+K)*(m*g)+((R2/(K*n1))*(m*g));
```



```
// Compute ODE
zdot(1) = z(2);
zdot(2) = z(3)
zdot(3) = ((N-b*z(3)-c*z(2)-d*z(1))/a);
endfunction
// Simulation using ODE
t = linspace(0,100000,1001); // Simulation time [ms]
y0 = [0;0;0]; // Initial condition
y = ode(y0,t(1),t,katrolmassa);
// Plotting results
plot(t,y(1,:));
```

Tabel 6. Contoh Jawaban Mahasiswa terhadap Tugas Pemodelan dan Simulasi TA 2015-2016 [9]

Sistem yang diamati adalah dinamika tinggi permukaan air dalam tangki:



a. Model fisis sistem

Dinamika tinggi air

$$q_i - q_o = \frac{dV(t)}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt}$$

$$p_1 - p_2 = \rho gh = p \quad \text{or } h = \frac{p}{\rho g}$$

$$q_i - q_o = \frac{A}{\rho g} \frac{dp}{dt} = A \frac{dh}{dt}$$

$$q_o = \frac{v_1 - v_2}{R} = \frac{\rho gh}{R}$$

$$q_i = A \frac{dh}{dt} + \frac{\rho gh}{R}$$

Dinamika tekanan air

$$q_i - q_o = \frac{A}{\rho g} \frac{dp}{dt}$$

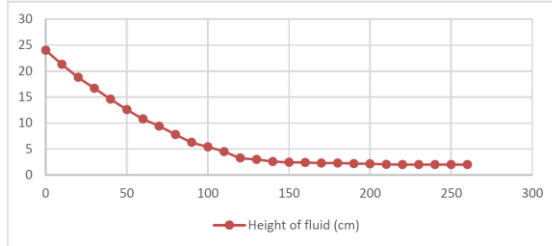
$$q_i - \frac{p}{R} = \frac{A}{\rho g} \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{\rho g}{A} (q_i - \frac{p}{R}) = \frac{dp}{dt}$$

Sehingga model state space 2 variabel keadaannya adalah:

$$\begin{bmatrix} \frac{dh}{dt} \\ \frac{dp}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho g}{AR} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho g}{AR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ \frac{\rho g}{A} \end{bmatrix} q_i$$

b. Hasil eksperimen tinggi permukaan air terhadap terhadap waktu



c. Model matematis sistem tangki tersebut sesuai eksperimen tinggi permukaan air terhadap waktu

$$q_i = A \frac{dh}{dt} + \frac{\rho gh}{R}$$

Laplace Transform:

$$q_i(s) = A s h(s) + \frac{\rho g}{R} h(s)$$

Transfer Function:

$$\frac{h(s)}{q_i(s)} = \frac{1}{As + \frac{\rho g}{R}}$$

$$q_i(t) = 22A\delta(t)$$

$$h(s) = \frac{22A}{As + \frac{\rho g}{R}} \quad \text{where } A = \pi R^2 = \pi 7.5^2$$

$$h(t) = 22 e^{-0.00565886 \frac{\rho g}{R} t}$$

d. Identifikasi parameter sistem

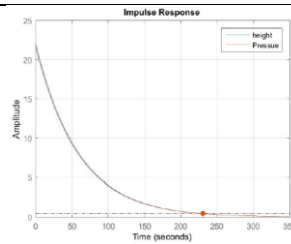
$$\text{time constant} = \frac{AR}{\rho g} = \frac{176.714}{3} = 58.9 \text{ seconds}$$

e. Progran simulasi sistem

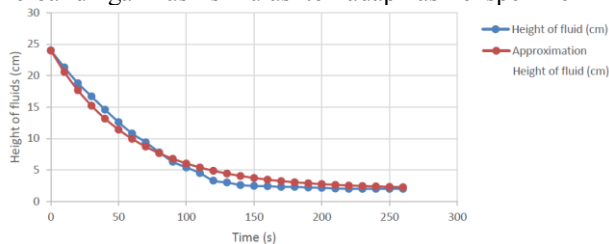
```

clc % clear window
A= [-3/176.71, 0; 0, -3/176.71];
B= [3887.7/176.71; 3887.7*980*0.001/176.71];
C= [1, 0; 0, 1];
D= [0;0];

[n,d]= ss2tf(A,B,C,D);
n1= [n(1,1) n(1,2) n(1,3)];
n2= [n(2,1) n(2,2) n(2,3)];
g1= tf(n1,d);
g2= tf(n2,d);
impulse(g1,g2)
    
```



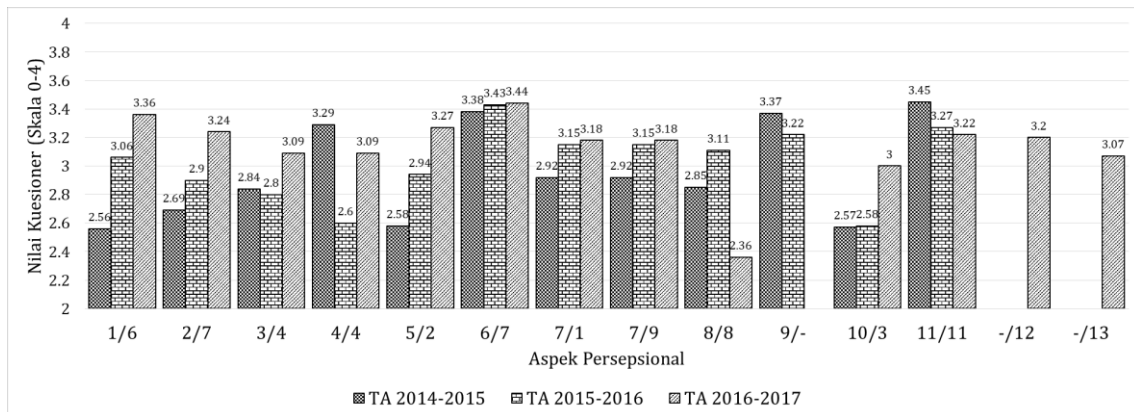
f. Perbandingan hasil simulasi terhadap hasil eksperimen



Tabel 7. Daftar Pertanyaan Kuesioner Akhir Semester berdasarkan Tahun Akademik (TA)

Periode 1: TA 2014-2015, 2015-2016		Periode 2: TA 2016-2017		Pemetaan	
				Periode 1	Periode 2
A	Kelompok Kemampuan Dosen	A	Kelompok Outcome (Luaran) Matakuliah		
A	1. Dosen menguasai materi perkuliahan dengan baik	A	1. Saya memperoleh informasi yang cukup tentang hal-hal tertentu yang harus saya capai atau kuasai (luaran mata kuliah) sesudah mengikuti mata kuliah ini.	A.1	B.6
A	2. Dosen berkomunikasi/ menyampaikan kuliah dengan baik	A		A.2	B.5
B	Kelompok Komitmen Dosen	A	2. Pelaksanaan perkuliahan diarahkan agar mahasiswa dapat mencapai atau menguasai luaran mata kuliah ini.		
B	3. Dosen selalu hadir dan menggunakan waktu kuliah sepenuhnya			B.3	B.4
B	4. Dosen tidak mewakili kepada orang lain atau mengganti jadwal kuliah			B.4	B.4
C	Kelompok Sikap Dosen	B	Kelompok Pelaksanaan Perkuliahan		
C	5. Dosen mempersiapkan kuliah dengan baik	B	4. Pelaksanaan perkuliahan terorganisir dengan baik.	C.5	A.2
C	6. Dosen bersikap responsif, bersedia berdiskusi, dan memberikan umpan balik	B	5. Dosen berkomunikasi dengan efektif.	C.6	B.7
D	Kelompok Penyelenggaraan Kuliah	B	6. Dosen peduli terhadap pencapaian atau penguasaan mahasiswa akan luaran matakuliah ini.	D.7	A.1
D	7. Dosen menjelaskan tujuan, rencana materi kuliah, dan buku acuan yang bermanfaat			D.7	B.9
D	8. Kesesuaian isi/bobot mata kuliah dengan alokasi SKS			D.8	B.8
D	9. Perolehan nilai diperoleh dari evaluasi yang lebih dari satu kali	B	7. Dosen berlaku adil (fair) kepada mahasiswa.	D.9	
E	Kelompok Manfaat / Hasil Kuliah	B	8. Beban kerja untuk matakuliah ini sesuai dengan SKS-nya.		
E	10. Penguasaan materi oleh mahasiswa setelah mengikuti kegiatan perkuliahan	B	9. Sarana prasarana untuk matakuliah tersedia dengan memadai.	E.10	A.3
F	Kelompok Kehadiran Mahasiswa			B.10	
F	11. Tingkat kehadiran mahasiswa dalam perkuliahan tinggi	C	Pengalaman Mahasiswa		
		C	11. Saya berusaha dengan sungguh-sungguh mengikuti matakuliah ini.	F.11	C.11
		C	12. Saya memperoleh pengalaman belajar yang positif dalam matakuliah ini.		C.12

Nilai kuesioner kedua periode ditampilkan pada Gambar 7. Pada gambar ini, pemetaan aspek persepsional ditulis format X/Y, di mana X adalah nomor aspek pada periode 1 dan Y adalah nomor aspek pada periode 2. Kategori aspek persepsional didistribusikan sepanjang sumbu mendatar, sedangkan nilai kuesioner ditampilkan pada sumbu tegak, dengan rentang nilai 2-4. Sesuai Gambar 7, tampak peningkatan persepsi yang konsisten pada aspek persepsi 1, 2, 5, 6, 10, dan 11 (periode 1).



Gambar 7. Nilai Kuesioner Akhir Semester Mata Kuliah TF3102 Dinamika Sistem dan Simulasi

Untuk menentukan signifikansi peningkatan tersebut sepanjang kedua periode, maka pengaruh perubahan silabus dan teknik pembelajaran sepanjang kedua periode dianalisis menggunakan Teknik Anova dua faktor tanpa replikasi [6]. Hipotesis nul pada analisis ini adalah seluruh pengembangan sistem pembelajaran tidak menghasilkan perubahan signifikan terhadap kepuasan mahasiswa terhadap berbagai aspek pembelajaran.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8, analisis Anova dua faktor perubahan silabus sepanjang periode menghasilkan nilai $F_{0.05, (2,5)} = 5.23$. Adapun analisis per aspek persepsional sepanjang periode menghasilkan nilai $F_{0.05, (5,2)} = 4.85$. Kedua nilai ini lebih besar dari nilai ambang batas untuk derajat kebebasan data yang bersangkutan, yaitu $F_{kritis, 0.05, (2,5)} = 4.10$ dan $F_{kritis, 0.05, (5,2)} = 3.33$. Dengan demikian, hipotesis nul ditolak. Artinya, pada tingkat kesalahan 5%, dinyatakan bahwa pengembangan sistem pembelajaran berpengaruh signifikan terhadap kepuasan mahasiswa terhadap pembelajaran di kelas.

Tabel 8. Analisis Anova Dua Faktor

Sumber variasi	Jumlah kuadrat kesalahan	Derajat kebebasan	Rata-rata kuadrat kesalahan	F	$P(F \geq F_{kritis})$	F_{kritis}
TA	0.45	2	0.22	5.23	0.03	4.10
Aspek Persepsi	1.03	5	0.21	4.85	0.02	3.33
Faktor Acak	0.43	10	0.04			
Total	1.90	17				

Tabel 9. Uji t-student I, II dan III

	Uji t-student I		Uji t-student II		Uji t-student III	
	2014-2015	2015-2016	2015-2016	2016-2017	2014-2015	2016-2017
Rata-rata	2.87	3.03	3.03	3.30	2.87	3.30
Varians	0.18	0.09	0.09	0.02	0.18	0.02
Jumlah data	6	6	6	6	6	6
Hipotesis perbedaan rata-rata sampel	0					
Derajat kebebasan	5		5		5	
t-stat	-1.56		-2.93		-2.38	
$P(T \leq t_{kritis})$ satu sisi	0.09		0.02		0.03	

$t_{\text{kritis satu sisi}}$	-2.02	-2.02	-2.02
$P(T \leq t_{\text{kritis}})$ dua sisi	0.18	0.04	0.06
$t_{\text{kritis dua sisi}}$	-2.57	-2.57	-2.57

Analisis ini dilanjutkan terhadap perkembangan persepsi mahasiswa tiap TA menggunakan uji student-t [6] terhadap perbedaan harga rata-rata sampel per-TA. Hipotesis null pada analisis ini adalah pengembangan sistem pembelajaran di TA kedua tidak menghasilkan perubahan signifikan terhadap kepuasan mahasiswa. Seluruh uji t-student ini dirangkum pada Tabel 9.

Tabel 9 menunjukkan bahwa perubahan signifikan terjadi antara TA 2015-2016 dengan TA 2016-2017. Pada periode ini nilai statistik t-student adalah -2.93, lebih negatif dari batas minimum t_{kritis} dua sisi yaitu -2.57. Varians di kedua TA ini juga kecil, yaitu 0.09 dan 0.02. Ini menunjukkan bahwa persepsi para mahasiswa lebih konsisten di seluruh aspek. Di lain pihak, varians yang besar pada TA 2014-2015 mengakibatkan analisis yang melibatkan TA ini (uji I dan uji III) tidak menunjukkan perubahan persepsi yang signifikan lintas tahun akademik.

Kembali pada Gambar 7, tampak penurunan kepuasan mahasiswa terhadap kesesuaian beban pembelajaran dengan SKS pada TA 2016-2017. Hal ini terjadi karena pada masa itu, pekerjaan rumah diberikan hampir pada setiap pertemuan, dengan tujuan memaksa mahasiswa belajar secara rutin sehingga meningkatkan pemahaman dan keterampilannya dalam memodelkan dan mensimulasikan sistem. Perbandingan dengan aspek 10 dan 11 pada Gambar 7 menunjukkan bahwa meskipun bebannya ditambah, semangat mahasiswa untuk menguasai materi perkuliahan (aspek 11) meningkat signifikan, dan hal ini didukung oleh fasilitas dan suasana pembelajaran yang memadai (aspek 10).

Triangulasi Hasil Asesmen

Hasil asesmen langsung secara kualitatif menunjukkan peningkatan kualitas pemahaman mahasiswa terhadap hubungan antara fenomena fisis suatu sistem dengan model matematis yang dibangunnya. Peningkatan pemahaman ini juga sejalan dengan hasil asesmen tidak langsung terhadap aspek kepuasan mahasiswa terhadap proses pembelajaran. Hal ini menunjukkan bahwa kaitan antara fenomena fisis dengan model matematis yang lebih kuat ditanamkan pada TA 2015-2016 dan seterusnya melalui pendekatan *First Principle* dan identifikasi sistem sebelum mengajarkan *Bond-Graph*, secara signifikan meningkatkan kompetensi dan kepuasan mahasiswa, dibanding pendekatan *Bond-Graph* sepenuhnya.

KESIMPULAN

Menerapkan metode *First Principle* dan identifikasi sistem diikuti dengan *Bond-Graph* dalam perkuliahan Dinamika Sistem dan Simulasi dalam periode TA 2014-2015 sampai dengan TA 2016-2017 secara signifikan meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap pemahaman fenomena fisis sistem dan kemampuan mereka memodelkan serta mensimulasikannya. Pencapaian ini didukung oleh tersedianya sumberdaya manusia dan fasilitas yang memadai. Sumber daya manusia terdiri dari dosen yang bertindak sebagai fasilitator beserta para asisten yang mengkondisikan suasana dan aktivitas perkuliahan. Keberlangsungan pencapaian ini perlu dipertahankan dengan ketersediaan sumberdaya dan fasilitas pembelajaran tersebut.

REFERENSI

1. Anonymous, *Penerapan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia Bidang Pendidikan Tinggi*, Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia No. 73 (2013)
2. S. Banerjee, *Dynamics for Engineers*, 1st Edition, Wiley (2005)
3. P. Blumberg, *Developing Learner-Centered Teaching: A Practical Guide for Faculty*. Jossey-Bass, A Wiley Imprint (2009)
4. G.E.P. Box, J. S. Hunter, W.G. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. Willey (2005)
5. S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, 7th Edition, McGraw-Hill Education (2014)
6. S. Das, *Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs*, CRC Press (2009)

7. B. Dewangga, R. Y. Mardiah, H. A. A. Putri, *Model Sistem Katrol*, Tugas Kuliah Dinamika Sistem dan Simulasi, ITB (2014)
8. K. Ogata, *System Dynamics*, 4th Edition, Pearson (2003)
9. L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd Edition, Prentice Hal (1999)
10. R. Kurniawan, O. N. Amalia, *Tank Modeling and Simulation using Matlab*, Report System Dynamics and Simulation, ITB (2015)