Jurnal Fisika Indonesia, Nomor 4, Vol. 1, Edisi November 1997, ISSN: 1410-2994, hal. 11-23

PENALARAN KOMPUTER UNTUK SISTEM FISIKA DENGAN MENGGUNAKAN REGIME-REGIME

Sri Hartati dan Agus Harjoko[1]

ABSTRAK

Pengertian penalaran komputer terhadap masalah fisika sering disamakan dengan komputasi fisika atau simulasi fisika. Tulisan ini menuangkan penalaran komputer terhadap masalah fisika, yang berbeda dengan komputasi fisika maupun simulasi fisika. Dalam penalaran komputer terhadap sistem fisika dengan menggunakan regime ini, pengetahuan (knowledge) tentang hukum-hukum fisika yang menentukan operasi/perilaku dari suatu sistem fisis tidak dituangkan secara eksplisit, namun menggunakan pengetahuan dari variabel-variabel fisika yang relevan dan representasi dari dimensi besaran-besarannya. Beberapa aplikasinya yang berguna dalam dunia fisika terapan maupun fisika pendidikan juga dipaparkan dalam masalah ini.

Kata-kata kunci: Penalaran komputer, Regime, dan Simulasi Fisika

ABSTRACT

A novel computer reasoning approach about physical systems is presented. The method falls into a qualitative method as it reasons about and describes about physical systems in a qualitative manner. Although computer reasoning is often associated with computational method and simulations, this does not mean that the method presented here is a computational physics method or simulation method. It simply means that the method can be used for reasoning about or simulating physical systems. The method presented in this paper is based on regimes. Using regimes, a physical system can be reasoned about without explicit knowledge of physical laws that govern operations of the systems. Instead, knowledge of the relevant physical variables and their dimensional quantities are required. Applications of the method in physics and education are presented as well.

Keywords: Computer Reasoning, Regime, Physic Simulation.

[1] Jurusan Fisika, FMIPA UGM

I. PENDAHULUAN

Setiap program komputer dapat dibangun untuk menyelesaikan masalah fisika dengan cara memecahkan persamaan-persamaan yang berisi problema-problema fisika dengan menggunakan sekumpulan data. Penyelesaian ini tidak memberikan penjelasan sebab akibat (causal explanation) ketika asumsi-asumsi yang dipakai secara implisit mengalami kegagalan (tidak dapat dipenuhi secara benar). Selain itu, penyelesaian tersebut tidak dapat menunjukkan bagaimana suatu variabel sistem fisika berhubungan dengan variabel-variabel yang lainnya, misalnya perubahan suatu variabel bisa menyebabkan perubahan variabel yang lainnya.

Penalaran komputer (computer reasoning) tentang masalah fisika berusaha menuangkan pengetahuan (knowledge) secara eksplisit, sehingga dapat dipergunakan untuk menalar tentang masalah fisika. Dengan menuangkan pengetahuan secara eksplisit maka akan mempermudah memberikan penjelasan sebab akibat (causal explanation) ketika asumsi-asumsi yang dipakai secara implisit mengalami kegagalan (tidak dapat dipenuhi secara benar). Selain itu, dapat dipakai untuk menalar tentang perilaku (behavior) dari suatu sistem fisika yang mengandung sub-sub sistem. Pengetahuan fisika yang tertuang secara eksplisit membuat kita bisa menciptakan suatu mesin yang dapat menalar tentang sistem-sistem fisika, yang dapat berperan tidak hanya pada bidang fisika terapan, tetapi juga bidang fisika pendidikan

II. KEGUNAAN PENALARAN KOMPUTER TENTANG SISTEM FISIKA

Beberapa riset dalam penalaran komputer tentang masalah fisika di negara-negara maju menunjukkan bahwa penalaran komputer tentang masalah fisika itu penting dikarenakan beberapa sebab [Hartati,1993 dan Weld, 1990] antara lain:

- Dengan penalaran komputer tentang masalah fisika akan membuat robot bisa memprediksi efek-efek dari gerakannya yang dinamis.
- Akan menyebabkan terciptanya alat bantu yang canggih untuk otomatisasi perancangan, diagnosa, dan memonitor suatu sistem yang kompleks seperti

rangkaian elektronik, dan pabrik kimia.

- Dengan penalaran komputer tentang masalah fisika akan membuat terciptanya suatu algoritma yang bisa menerangkan bagaimana sistem-sistem fisika bekerja, algoritma-algoritma ini bisa dipakai pada sistem-sistem tutor yang cerdas (intelligence tutoring systems).

Pada umumnya fisika banyak berurusan dengan hukum-hukum fisika yang melekat pada sistem fisika, sedangkan kepandaian manusia berhubungan dengan kemampuan manusia untuk menalar hukum-hukum fisika, sehingga penalaran komputer tentang sistem-sistem fisika dikategorikan sebagai bagian dari Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence).

III. DIMENSI dan REGIME

Setiap fenomena dalam fisika ditentukan oleh serangkaian variabel, misalnya masa, energi, kecepatan, tekanan, yang mempunyai nilai tertentu untuk setiap kejadian. Nilai-nilai tersebut berupa hasil eksperimen pada suatu sistem fisika dengan kondisi-kondisi tertentu, atau diturunkan dari perhitungan matematika.

Dalam fisika semua besaran mekanika, seperti energi, gaya, momentum dan kecepatan dapat dinyatakan dalam tiga macam dimensi (besaran) dasar. Ketiga dimensi (besaran) dasar tersebut adalah massa [M], panjang [L], dan waktu [T]. Misalnya, kecepatan dinyatakan dalam bentuk [L]/[T]. Dimensi besaran ini banyak digunakan untuk menurunkan rumusan fisika, dan selain untuk beberapa keperluan di bidang keteknikan [Langhar, 1958].

Aplikasi yang lain dari dimensi besaran ini adalah untuk penalaran komputer tentang masalah fisika. Berbeda dengan penalaran komputer tentang masalah fisika dengan metoda lain, penalaran komputer tentang masalah fisika dengan besaran dimensi ini tidak menggunakan pengetahuan (knowledge) dari rumusan-rumusan fisika yang menentukan operasi dari sistem fisis.

Metoda ini hanya memerlukan pengetahuan dari variabel-variabel fisika yang relevan dan representasi dari besaran-besaran dimensinya. Representasi besaran dimensi dari variabel-varaibel fisika ini menyandikan banyak proses fisika tanpa pengetahuan dari rumusan-rumusan fisikanya. Variasi dari turunan parsial (partial derivative) dihitung untuk menentukan kelakukan dari sistem fisis. Turunan-turunan parsial ini digunakan komputer untuk menalar perilaku dari alat-alat dan sistem fisis.

Untuk menentukan jangkauan dari analisa dimensi sebagai metoda untuk penalaran komputer terhadap sistem fisika secara kualitatif, diadopsi konsep "regime" dari metoda dari Bhaskar [Bashkar, dan Nigam, 1990]. "Regime" adalah suatu "conceptual machinery" bagi komputer untuk menalar proses fisis menggunakan dimensi besaran.

Menurut prinsip homogenitas, dimensi pada setiap sistem fisis dapat dinyatakan sebagai berikut. Bila

$$y_i = \sum_i a_i x_i \qquad (1)$$

adalah hukum fisika atau persamaan, maka $a_i x_i$ harus mempunyai dimensi yang sama dengan y_i. Jika a_i adalah besaran yang tidak berdimensi, maka setiap x_i harus mempunyai dimensi yang sama dengan y_i.

Teori Buckingham [Langhar, 1958] mengatakan bahwa dimungkinkan mengekstrak sebanyak (*n-r*) bilangan tidak berdimensi (πs) untuk merepresentasikan sistem fisis, dengan *n* dan *r* secara berturut-turut mewakili sejumlah variabel dan sejumlah dimensi yang mendeskripsikan sistem fisika tersebut.

Besaran tak berdimensi π tersebut mempunyai formulasi sebagai berikut

$$\pi_i = y_i x_1^{\alpha_{i1}} \ldots x_r^{\alpha_{ir}} \qquad (2)$$

dengan $\{x_1 \ldots x_r\}$ adalah variabel-variabel yang menggambarkan suatu sistem fisis, $\{y_1 \ldots y_{n-r}\}$ adalah peubah-peubah kinerja dan $\{\alpha_{ij} | 1 \le i \le n-r, 1 \le j \le r\}$ adalah pangkat dari variabel-variabel tersebut. Variabel basis adalah sekumpulan variabel x_j yang diulang pada setiap π. π sendiri adalah regime, yang mewakili aspek-aspek fisis dari sistem fisis. Kumpulan dari beberapa regime disebut ansambel (ensemble). Bila suatu sistem mempunyai variabel sebanyak n dan matriks dimensi berderajat r, maka ansambel berisi (n-r) regime. Matriks dimensi berderajat r didefinisikan sebagai matriks dengan kolom-kolom berisi dimensi dari variabel-variabel dan baris-baris matrik tersebut adalah variabel-variabelnya. Pivot atau variabel kontak x_k adalah variabel yang ada pada π_i dan pada π_j.

Suatu regime π_i memberikan pada kita suatu persamaan dimensi homogen yang menghubungkan variabel y_i dengan variabel basis $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_r$. Dari persamaan (2), kita peroleh

$$y_i = \pi_i x_l^{-\alpha_{il}} \ldots x_r^{-\alpha_{ir}} \tag{3}$$

dengan $1 <= i <= n-r$. Ada tiga macam regime yang dapat dipakai komputer untuk penalaran tentang kelakuan dari alat-alat dan sistem fisis.

1. Intra-regime parsial.

Regime-regime ini digunakan untuk menentukan bagaimana varibel-variabel dalam suatu regime berhubungan satu dengan yang lain. Dari ekspresi yang diperoleh dari regime π_i, perubahan y terhadap variabel basis x_j dapat diperoleh dari

$$\frac{\partial y_i}{\partial y_j} = -\frac{\alpha_{ij} y_i}{x_j}. \tag{4}$$

2. Inter-regime parsial.

Regime-regime ini digunakan untuk merelasikan peubah kinerja y_i yang berada pada regime π_i, dan peubah kinerja y_j yang terjadi pada regime dan π_j. Inter-regime parsial ini memodelkan perubahan y_i dan y_j terhadap perubahan variabel kontak x_k.

Notasi untuk inter-regime partial adalah:

$$\frac{\partial y_i}{\partial y_j}]^{x_k} = \frac{\frac{\partial y_i}{\partial x_k}}{\frac{\partial y_j}{\partial x_k}} \tag{5}$$

Dari regime π_i, $\frac{\partial y_i}{\partial x_k} = y_i \frac{\alpha_{ik}}{x_k}$ dan regime π_j. $\frac{\partial y_j}{\partial x_k} = y_j \frac{\alpha_{jk}}{x_k}$ maka dapat dituliskan inter regime parsial

$$\left.\frac{\partial y_i}{\partial y_j}\right]^{x_k} = \frac{\dfrac{\partial y_i}{\partial x_k}}{\dfrac{\partial y_j}{\partial x_k}} = \left(\frac{\alpha_{ik}}{\alpha_{jk}}\right)\left(\frac{y_i}{y_j}\right). \tag{6}$$

3. Inter-ensemble parsial.

Inter-ensemble parsial digunakan untuk menalar perilaku alat-alat atau sistem fisis yang terdiri dari beberapa komponen atau beberapa subsistem. Ketika menalar suatu alat yang terdiri dari beberapa komponen, ansambel untuk setiap komponen harus ditentukan. Agar supaya komputer dapat menalar perilaku dari keseluruhan alat, maka diperlukan pula penalaran terhadap perangkainya ditinjau dari besaran-besaran yang menyusunnya.

Perhatikan dua ansambel A dan B yang memiliki regime π_A, π_B dan variabel-variabel performance y_{A_j} dan y_{B_j}. Notasi parsial inter-ensembel adalah

$$\left[\frac{\partial y_{A_i}}{\partial y_{B_j}}\right]^{\pi_C} \tag{7}$$

dengan π_C adalah regime kontak

Ketika komputer menalar kelakuan suatu sistem fisis, sasarannya adalah menentukan arah dari perubahan peubah kinerja terhadap perubahan variabel-variabel basis. Untuk menalar tentang perubahan suatu peubah kinerja y sebagai hasil dari perubahan beberapa variabel x_j, dilakukan beberapa cara di bawah ini:

a) Jika x_j adalah variabel basis dan terjadi pada π_i, maka digunakan intra-regime parsial

b) Jika x_j adalah variabel basis tetapi tidak pada π_i, maka penalaran menggunakan cara-cara intra-regime parsial.

Jika x_j bukan variabel basis, maka digunakan inter-regime parsial yang menghubungkan π_i dan π_j.

IV LANGKAH-LANGKAH PENALARAN KOMPUTER

Agar komputer dapat menalar tentang sistem fisis dengan menggunakan analisa dimensi dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Tentukan sejumlah n variabel yang menjadi karakteristik dari problema fisis, dan tuliskan representasi dimensinya; misalnya ada sebanyak r dimensi yang digunakan.
2. Dengan menggunakan teorema Buckingham, akan diperoleh sebanyak (n-r) besaran tak berdimensi π_i. Besaran ini dihitung dengan cara sebagai berikut:

   2.1. Pilih variabel sebanyak r sebagai variabel basis, $x_1 ... x_r$ dan andaikan δ_i dimensi dari x_i.

   2.2. Untuk setiap π_i direpresentasikan dengan

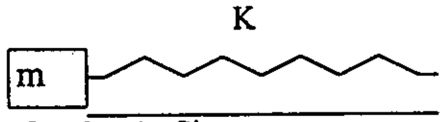
   $$y_i \times x_1^{\alpha_1} ... x_r^{\alpha_r} \tag{8}$$

   dan untuk setiap x_i digantikan dengan dimensinya, maka akan diperoleh persamaan π sebagai fungsi dimensi. Karena π adalah besaran tak berdimensi, maka pangkat dari setiap dimensi harus dijumlahkan, dan jumlah tersebut harus sama dengan nol.
3. Gunakan regime π untuk menalar tentang perilaku dari suatu sistem fisis, maupun komponen-komponennya, dengan menghitung derivatif parsial dalam bentuk $\frac{\partial x_i}{\partial y_j}$ dan $[\frac{\partial y_i}{\partial y_j}]^{x_k}$.

V. CONTOH-CONTOH

Berikut ini adalah beberapa contoh penalaran komputer tentang perilaku sistem fisis dengan analisa dimensi menggunakan regime-regime yang telah disebutkan di atas.

Pertama, perhatikan sistem pegas seperti pada Gb.1. Ketika balok digeser dari kedudukan setimbang, dan kita lepaskan, maka dia akan berosilasi. Bagaimana komputer menalar tentang perilaku sistem pegas ditinjau periode osilasinya?



Gambar 1. Sistem pegas

Besaran yang mencirikan sistem pegas tersebut beserta dimensinya adalah:

Besaran	Simbol	Dimensi
periode	t	$[T]$
massa	m	$[M]$
konstanta pegas	K	$[MT^{-2}]$

Ada sebanyak tiga macam besaran, $n=3$, dan dua macam dimensi (M dan T), $r=2$; maka ada sebanyak $(n-r)$ π, hanya ada π tunggal, dengan

$$\pi = tm^{\alpha_1} K^{\alpha_2} \tag{9}$$

Variabel t adalah variabel yang ingin kita tinjau, m dan K adalah variabel-variabel basis.

Dengan mensubstitusikan dimensi-dimensi dari variabel-variabel basis m dan K ke persamaan (9) diperoleh

$$\pi = t[M]^{\alpha_1}[MT^{-2}]^{\alpha_2} \tag{10}$$

dengan π adalah besaran tak berdimensi, maka penjumlahan dari pangkat dari dimensi-dimensi M dan T harus sama dengan nol, sehingga diperoleh dua buah persamaan dari

$$\text{Homogenitas-}M:\ \alpha_1 + \alpha_2 = 0 \text{ dan}$$

$$\text{Homogenitas-}T:\ 1 - 2\alpha_2 = 0$$

Kedua persamaan homogenitas tersebut menghasilkan $\alpha_1 = -0{,}5$ dan $\alpha_2 = 0{,}5$. Dengan mensubtitusikan kedua nilai ke persamaan (9) diperoleh:

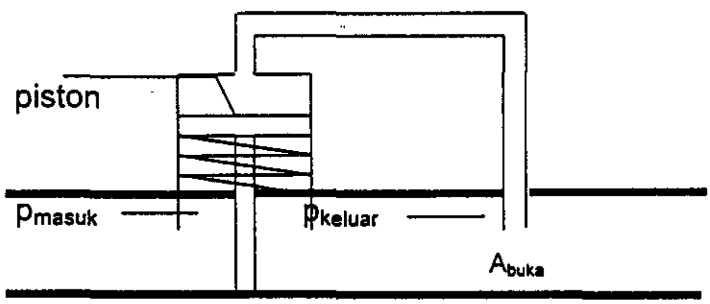
$$\pi = tm^{-0{,}5}K^{0{,}5} \tag{11}$$

sehingga $$t = \pi m^{0{,}5}K^{-0{,}5} \tag{12}$$

Dengan menggunakan persamaan (12), komputer akan menalar perilaku sistem pegas, ditinjau dari periode osilasinya, dengan menghitung nilai dari parsial intraregimenya; $\frac{\partial t}{\partial m}$ dan $\frac{\partial t}{\partial K}$. Dari hasil perhitungan diperoleh $\frac{\partial t}{\partial m} > 0$ dan $\frac{\partial t}{\partial K} < 0$.

Dari hasil tersebut, komputer akan menalar sistem pegas tersebut sebagai berikut: makin besar massa balok, sistem pegas akan berosilasi dengan periode osilasi lebih besar. Makin besar konstanta pegas berturutan akan menyebabkan massa berosilasi dengan periode osilasi makin kecil.

Untuk mengetahui efek dari perubahan konstanta pegas K dan massa m secara bersamaan pada sistem, maka m dan K dikelompokkan dalam bentuk $\frac{m}{K}$ atau $\frac{K}{m}$, dan digunakan turunan parsial $\frac{\partial t}{\partial(\frac{K}{m})}$ atau $\frac{\partial t}{\partial(\frac{m}{K})}$. Hasilnya berupa $\frac{\partial t}{\partial(\frac{K}{m})}$ bernilai negatif dan $\frac{\partial t}{\partial(\frac{m}{K})}$ bernilai positif. Dari hasil tersebut, komputer menalar bahwa jika massa balok membesar dan konstanta pegas mengecil, maka periode osilasinya akan membesar.



Gambar 2. Pengatur tekanan sederhana

Perhatikan suatu pengatur tekanan seperti yang ditunjukkan pada Gb.2 di atas sebagai contoh kedua. Alat ini akan dianalisa dan ditinjau dari dua komponen yaitu pertama pipa dengan katub pipanya dan yang kedua berupa keran beserta pegasnya. Fungsi dari sistem ini untuk mengatur tekanan yang keluar agar konstan.

Sub-sistem pertama: pipa beserta lubang pipanya.

Variabel yang ada pada komponen tersebut adalah

Besaran	Simbol	Dimensi
Tekanan keluaran	p_{keluar}	$[ML^{-1} T^{-2}]$
Kecepatan aliran	Q	$[L^{3} T^{-1}]$
Tekanan masukan	p_{masuk}	$[ML^{-1} T^{-2}]$
Luas katub terbuka	A_{buka}	$[L^{2}]$
Massa jenis zat cair	ρ	$[ML^{-3}]$

Sub-sistem tersebut mempunyai lima variabel dan dimensinya sebanyak tiga macam; dengan memilih p_{masuk}, A_{buka} dan ρ sebagai variabel basis, maka akan dihasilkan π sebagai berikut:

$$\pi_{A1} = Q p_{masuk}{}^{\alpha 1} A_{buka}{}^{\alpha 2} \rho^{\alpha 3} \tag{13}$$

$$\pi_{A2} = Q p_{keluar} p_{masuk}{}^{\alpha 1} A_{buka}{}^{\alpha 2} \rho^{\alpha 3} \tag{14}$$

Dengan menggunakan regime yang berdasar pada analisa dimensi, komputer dapat menganalisa perilaku alat pengatur tekanan tersebut. Dengan menggunakan prinsip homogenitas terhadap ke dua persamaan tersebut di atas maka jumlah pangkat dari dimensi-dimensi *L, M* dan *T* masing-masing harus bernilai 0.

Homogenitas-L : $\alpha 1 + \alpha 3 = 0$

Homogenitas-M : $3 - \alpha 1 + 2\ \alpha 2 - 3\ \alpha 3 = 0$

Homogenitas-T : $-1 - 2\ \alpha 1 = 0$

Penyelesaian dari ketiga persamaan di atas, menghasilkan

$$\pi_{A1} = Q\ \rho^{0,5} A_{buka}{}^{-1} p_{masuk}{}^{-0,5} \tag{15}$$

Dengan cara yang sama, π_{A2} dapat diperoleh

$$\pi_{A2} = p_{keluar}\ p_{masuk}{}^{-1} \tag{16}$$

Hasil dari intra-regime parsial $\partial Q / \partial p_{masuk}$, $\partial Q / \partial A_{buka}$, dan $\partial p_{keluar} / \partial p_{masuk}$ semuanya positif, sehingga inter-regime parsial $[\partial p_{keluar} / \partial Q]^{p_{masuk}}$ juga positif.

Hasil penalaran menunjukkan bahwa bila tekanan masukan p_{masuk} membesar, kecepatan aliran Q dan tekanan keluaran p_{keluar} juga akan naik. Demikian pula jika katub A_{buka} membuka semakin kecil maka Q akan membesar. Karena inter-regime parsial $[\partial p_{keluar}/\partial Q]^{pmasuk}$ positif maka dengan menaikkan Q akan menaikkan tekanan keluaran p_{keluar}.

Sub-sistem kedua: keran dengan pegasnya.

Variabel yang ada pada komponen tersebut adalah

Besaran	Simbol	Dimensi
Perubahan pegas	x_t	$[L]$
Tekanan	P	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Konstanta pegas	K	$[ML^{-2}]$

Ada tiga macam besaran dengan tiga macam dimensi. Untuk menentukan π_{B1}, dimensi yang muncul pada P dan K dapat dilihat sebagai satu macam dimensi. Dengan memilih P dan K sebagai variabel basis, maka akan diperoleh

$$\pi_{B1} = xP^{a1} K^{a2} \tag{17}$$

Dengan mensubtitusikan dimensi-dimensinya dan menerapkan prinsip homogenitas pada persamaan tersebut, diperoleh

$$\pi_{B1} = xPK^{1} \tag{18}$$

Dari sub-sistem ini intra-regime parsialnya adalah $\partial x/\partial P$ negatif, sehingga hasil penalaran komputer menunjukkan jika tekanan P yang dikenakan pada piston membesar maka perubahan pegas x akan mengecil.

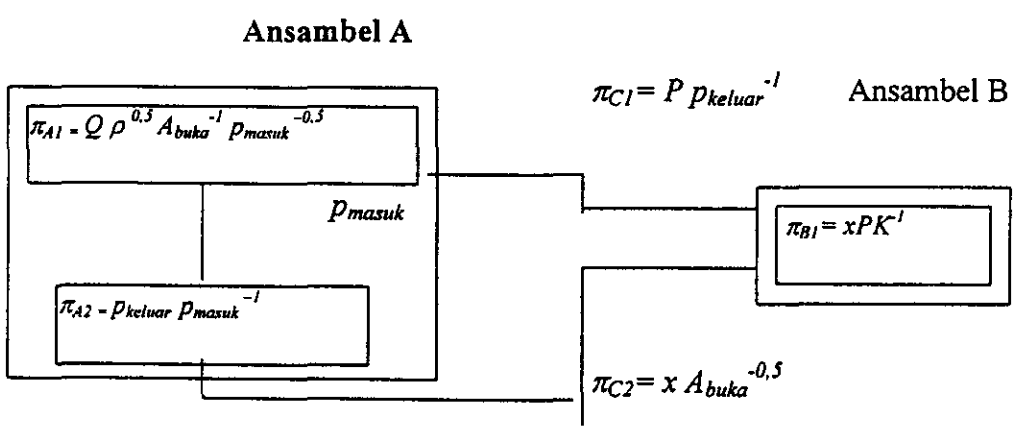
Pada sistem pengatur tekanan tersebut terdapat dua buah kopling (sambatan) regimes. Pertama, π_{C1} yang berasal dari hubungan yang menyalurkan tekanan keluaran pada pipa ke piston pada sub-sistem keran-pegas. Kedua, π_{C2} menggambarkan batasan geometri tentang gerakan piston yang mempengaruhi pembukaan katub. Kedua regimenya adalah

$$\pi_{C1} = P\, p_{keluar}^{-1} \tag{19}$$

$$\pi_{C2} = x\, A_{buka}^{-0.5} \tag{20}$$

Dari kedua regime tersebut, nilai kedua intra-regime partialnya adalah positif, sehingga, hasil penalaran komputer menunjukkan bahwa jika p_{keluar} naik, maka P akan membesar; demikian pula bila pegas ditekan, maka katub akan mengecil. Berdasarkan sub-sistem yang diciptakan tersebut di atas, maka pengatur tekanan memiliki perilaku sebagai berikut:

Dari π_{A2}, kenaikan pada p_{masuk} akan membesarkan p_{keluar}. Kenaikan pada p_{keluar} ini akan menaikan P pada sub-sistem keran-pegas (dari π_{C1}). Dari π_{B1}, kenaikan pada P akan menurunkan x. Penurunan pada x menyebabkan penurunan pada A_{buka} (dari π_{C2}). Pada sub-sistem pipa-katub, penurunan A_{buka} menyebabkan Q turun. Akhirnya penurunan Q akan menurunkan tekanan p_{keluar} (dari inter-regime partial $[\partial p_{keluar}/\partial Q]^{pmasuk}$). Dari regime-regime tersebut, kedua intra-regime parsial, $\partial Q/\partial p_{masuk}$ dan $\partial Q/\partial A_{buka}$, bernilai positif, sehingga jika p_{keluar} naik, P akan membesar, juga kalau pegas ditekan, maka katub akan mengecil. Analisa inter-ensemble untuk pengatur tekanan ditunjukkan pada Gb. 3.



Gambar 3. Inter-ensemble untuk pengatur tekanan.

VI. KESIMPULAN

Dengan menggunakan ketiga macam regime seperti yang telah dibahas di atas, komputer bisa melakukan penalaran terhadap sistem fisika secara kualitatif tanpa harus merepresentasikan pengetahuan (knowledge) tentang hukum-hukum fisika secara eksplisit. Penalaran komputer dengan metoda ini sangat sederhana, tidak terlalu kompleks, karena metoda ini hanya memerlukan sejumlah dimensi-dimensi dari variabel-variabel yang relevan untuk dipakai dalam menyandikan sejumlah pengetahuan tentang hukum-hukum fisika yang ada pada sistem. Metoda ini sangat cocok bagi komputer untuk menalar sistem mekanik, termodinamika, dan bisa dipakai pada sistem-sistem tutor yang cerdas (intelligence tutoring systems).

DAFTAR PUSTAKA

Bashkar, R. and Nigam, A, 1990, *Qualitative Physics Using Dimensional Analysis*, Artificial Intelligence, vol.45, hal.73-111.

Langhar, H.L., 1958, *Dimensional Analysis and Theory of Models*, John Wiley and Sons Inc., NY.

Hartati, S., 1993, *Reasoning about Physical Systems in Artificial Intelligence*, Technical Report, Faculty of Computer Science, University of New Brunswick.

Weld, D dan de Kleer, J., 1990, *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Morgan Kaufmann Publisher Inc.