

Pemodelan Sistem Fisis dan Simulasinya Dengan Menggunakan Bondgraph dan Software 20-Sim 3.2

Hany Ferdinando

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
e-mail: hanyf@petra.ac.id

Abstrak

Pemodelan sistem fisis untuk disimulasikan memerlukan pemahaman yang mendalam terhadap perilaku sistem. Biasanya solusi yang diinginkan dinyatakan dalam persamaan diferensial. Salah satu alternatif yang dapat dipakai untuk memodelkan suatu system secara mudah dan sederhana adalah Bondgraph. Dalam makalah ini akan dibahas bagaimana pemodelan ini dilakukan secara terstruktur dalam Bondgraph dan disimulasikan dengan menggunakan Software 20-Sim 3.2 dari University of Twente, Belanda. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pemodelan dapat dilakukan dengan mudah melalui Bondgraph. Selain itu fasilitas yang dimiliki oleh 20-Sim memungkinkan dilakukan simulasi baik secara grafik maupun 3D.

Kata kunci : simulasi, Bondgraph, 20-Sim.

Abstract

To model a physical system needs many various aspect of system behaviour. Usually, the result is in the differential equation. There are many methods in finding this model, one of them is Bondgraph. This paper will discuss how to use this method to model simple physical system and simulate it using 20-Sim software from University of Twente, The Netherlands. The experimental result shows that we can build a model using Bondgraph easily. In 20-Sim, there are several facilities that will enable user to simulate both in graphics or 3D model.

Keywords : simulations, Bondgraph, 20-Sim.

Pendahuluan

Dalam sistem kontrol konvensional, model matematika diperlukan untuk merancang kontroler dengan tepat. Tepat artinya dengan biaya minimal untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Tanpa mengetahui model matematika yang baik, tidak mungkin dirancang kontroler dengan tepat, selain menggunakan sistem cerdas seperti Fuzzy Logic misalnya. Tetapi untuk mendapatkan model matematika yang baik diperlukan pemahaman yang kuat terhadap perilaku sistem serta melalui proses yang rumit. Suatu aturan penting dalam pemodelan adalah sebuah model harus benar-benar mewakili (memiliki kompetensi) [1] sistem yang dimaksud, artinya tidak perlu benar-benar tepat. Salah satu alternatif yang ditawarkan adalah dengan menggunakan Bondgraph, yang ditemukan oleh Prof. Henry M. Paynter dari MIT. Sehingga penjelasan umum tentang bondgraph akan diberikan dengan tujuan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang

notasi² notasi yang dipergunakan. Untuk memperjelas akan dipilih model sederhana yang akan dimodelkan. Model ini dapat dilihat pada gambar 2. Selanjutnya model yang didapat akan disimulasikan dengan software 20-Sim 3.2 yang dibuat oleh Control Laboratory, University of Twente, Belanda.

Bondgraph [1]

Bondgraph ditemukan oleh Prof. Paynter pada tahun 1961 Prinsip dasar bondgraph adalah mencari suatu variabel yang membuat suatu sistem mencapai kesetimbangan (equilibrium).

Selanjutnya system ini dikembangkan oleh Karnopp dan Rosenberg dalam buku dan makalah (dalam jurnal maupun konferensi) mereka. Formulasi untuk system Termodinamika dilakukan oleh Breedveld pada tahun 1984 [2].

Bondgraph memiliki 9 komponen dasar yang dibagi dalam 4 kategori, yaitu:

- One-port component: R (mewakili komponen resistor), I (mewakili komponen inductor), C (mewakili komponen capacitor)

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 3, nomor 2, September 2003.

- Two-port component: TF (transformator) dan GY (gyrator). Nantinya dikembangkan menjadi MTF dan MGY (M=modulated)
- Junction: 1-junction dan 0-junction
- Source: Se dan Sf (nantinya dikembangkan menjadi MSe dan MSf)

Bondgraph akan mentransformasikan semua perilaku fisis (translasi, rotasi, tekanan, fluida, termodinamika, listrik, magnet) ke dalam 9 komponen di atas. Tiap komponen memiliki analogi dalam tiap domain fisis. Misalnya, R dapat berupa tahanan (listrik), gesekan (translasi dan rotasi), radiasi (thermodinamika), hambatan dalam sebuah pipa (fluida). I dan C menunjukkan sifat *storage element*. Sehingga dalam penggunaannya, harus diperhatikan perilaku sistem fisisnya. Dalam [4] sudah disediakan tabel yang menghubungkan sistem fisis dengan bondgraph.

Bondgraph menggunakan istilah *effort* dan *flow* untuk menggambarkan variable umum yang dipergunakan. Perkalian antara effort dan flow menghasilkan *power*. Power inilah yang dipindahkan ke komponen lain melalui suatu garis yang menghubungkan komponen-komponen ini, yang selanjutnya disebut sebagai *bond*.

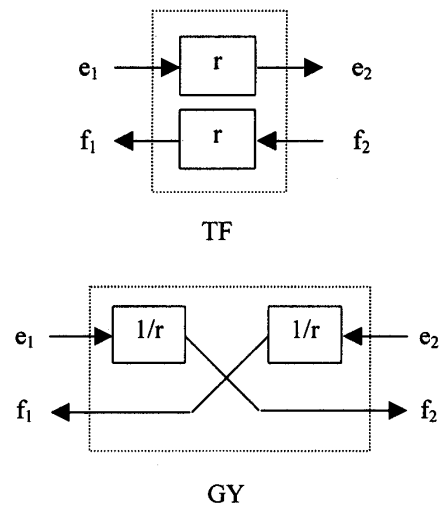
Suatu variabel merupakan effort atau flow ditentukan berdasarkan hubungan yang terjadi pada sistem fisis yang ada. [4] juga menyediakan tabel yang bermanfaat untuk menentukan suatu variabel dikategorikan sebagai effort atau flow. Sebagai contoh, dalam mekanika translasi, gaya (F) adalah effort dan kecepatan (v) adalah flow. Dalam listrik, tegangan (u) adalah effort sedang arus (i) adalah flow.

Jika terjadi suatu model harus menghubungkan 2 domain fisis yang berbeda, misalnya antara elektrik dengan mekanik, maka diperlukan suatu komponen yang menghubungkannya. Komponen ini adalah TF dan GY. Keduanya memiliki factor pengali yang konstan atau variabel. Perbedaan prinsip antara TF dan GY adalah persamaan yang terjadi didalamnya.

0-junction merupakan common effort, artinya effort yang terhubung via 0-junction semuanya bernilai sama, sedangkan jumlah flow pada junction tersebut harus nol (bandingkan dengan Kirchoff Current Law). Hal yang sebaliknya terjadi pada 1-junction, dimana berlaku hal yang sama seperti pada Kirchoff Voltage Law.

TF memiliki karakteristik yang sama dengan transformator dalam elektrik, artinya jika

tegangan dinaikkan, arusnya akan turun, dan sebaliknya. Sehingga tidak terjadi pertukaran variabel antara effort dan flow. Karena effort menghasilkan effort yang lain, demikian juga dengan flow. Berbeda dengan GY, di sini terjadi pertukaran antara effort dan flow [1]. Dimana flow dari sisi yang satu jika dikalikan akan menjadi effort untuk sisi yang lain (atau sebaliknya). Untuk jelasnya perhatikan gambar 1.



Gambar 1. Proses yang terjadi dalam TF dan GY

Untuk komponen source, pada prinsipnya mengikuti variabel yang ada. Sehingga, Se merupakan sumber effort dan Sf adalah sumber flow. Untuk MSe dan MSf menunjukkan sumber yang tidak konstan, misalnya sinyal sinus, square, dll.

Jika semua komponen ini digabungkan, maka akan terbentuk sebuah model dalam bondgraph. Dari model ini dapat diturunkan persamaan matematikanya dengan mudah.

Buku yang direkomendasikan untuk dibaca dalam mempelajari Bondgraph adalah [4]. Sebab dalam buku ini dijelaskan secara rinci bagaimana menggunakan bondgraph untuk berbagai macam system. Selain itu cukup banyak homepage yang membahas tentang Bondgraph. Cara menggunakan Bondgraph akan dibicarakan pada saat membahas contoh aplikasi yang dipilih.

20-Sim 3.2 [3]

20-sim 3.2 berawal dari program simulasi yang dibuat oleh Control Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, University of Twente, TUTSIM (Technical University of Twente SIMulation) di tahun 1970. Lalu program ini

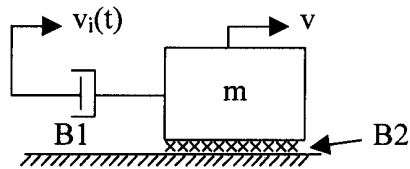
dikembangkan dalam suatu proyek dengan nama CAMAS (Computer-Aided Modeling Analysis and Simulation).

20-Sim 3.2 dilengkapi dengan kemampuan untuk menghasilkan c-code yang dapat digunakan untuk embedded system maupun dalam matlab (khususnya Simulink). Selain itu 20-Sim juga dilengkapi dengan bahasa pemrograman khusus (SIDOPS+) sehingga fleksibel untuk digunakan dalam aplikasi yang memerlukan fungsi khusus.

Model Awal

Contoh yang akan diambil untuk dimodelkan seperti terlihat pada gambar 2. Ini adalah sebuah massa yang terletak di bidang datar yang kasar, sehingga memiliki koefisien gesek tertentu. Pada massa ini diberi kecepatan $v_i(t)$ melalui sebuah damper. Gesekan yang terdapat dalam damper akan mengubah kecepatan menjadi gaya, sesuai dengan rumus (1). Sehingga massa akan bergerak dengan kecepatan v .

Untuk sistem mekanik, yang diambil sebagai acuan adalah titik (bagian) yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Berdasarkan gambar 2, bagian yang memiliki kecepatan adalah ujung damper ($v_i(t)$) dan massa (v). Hal ini dilambangkan dengan 1-junction [4]. Sebelum memulai semuanya, perlu dipilih titik acuan sebagai referensi (dalam istilah elektronika, *ground*). Dalam sistem mekanika, gesekan diwakili oleh komponen R, massa oleh I, dan pegas oleh C [4]. Komponen yang tidak mendapat 1-junction nantinya dihubungkan melalui 0-junction. Bagian berikut akan menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan model dalam Bondgraph.



Gambar 2. Contoh sistem fisis

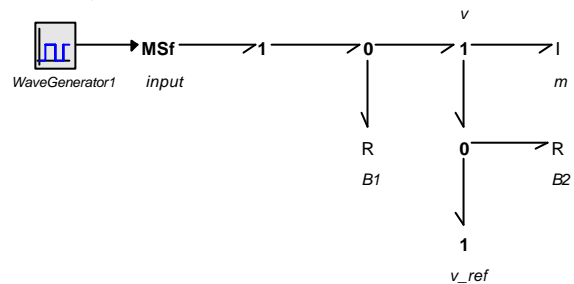
Sebagai referensi dipilih tanah dan diberi lambang v_ref dengan 1-junction. Untuk v dan $v_i(t)$ dilakukan hal yang sama. Karena $v_i(t)$ merupakan suatu fungsi, maka dianggap sebagai sumber. Dalam Bondgraph, v dinyatakan sebagai *flow* [4] sehingga dipilih *source* yang berfungsi sebagai *flow*. Karena berupa fungsi, maka dipilih *source flow* yang dapat *dimodulasi*, sehingga

dipilih MSf. MSf memerlukan input berupa signal generator.

Antara $v_i(t)$ dan massa m terdapat damper B1. Karena damper memberikan gesekan, maka dapat diwakili dengan R. Maka diletakkan 0-junction di antara dua 1-junction tersebut, lalu ditarik garis yang menghubungkan 0-junction dengan R. Hal yang sama juga dilakukan dengan B2 (antara massa dengan referensi).

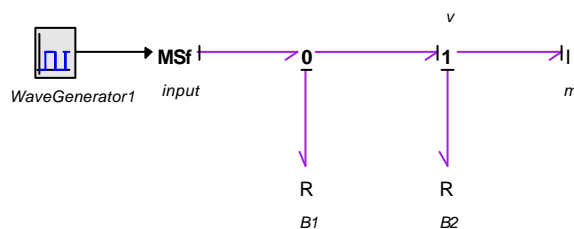
Pada v , terdapat massa m . Sehingga massa m ini langsung dihubungkan dengan 1-junction yang terdapat pada v . Hasil akhir model awal ini jika digambar dengan menggunakan program 20-sim dapat dilihat pada gambar 3. Titik referensi ini kemudian dihilangkan untuk menyederhanakan sistem.

Selanjutnya dilakukan penyederhanaan model Bondgraph. Hal ini dapat dilakukan dengan menu *Model | Simplify Model*. Maka model awal ini akan menjadi seperti pada gambar 4. Pada gambar 4 ini, model juga dilengkapi dengan *causal stroke*, berupa garis yang tegak lurus terhadap *half arrow* [4] (referensi ini juga menyediakan bagaimana menyederhanakan model dan memberikan causal stroke secara manual).

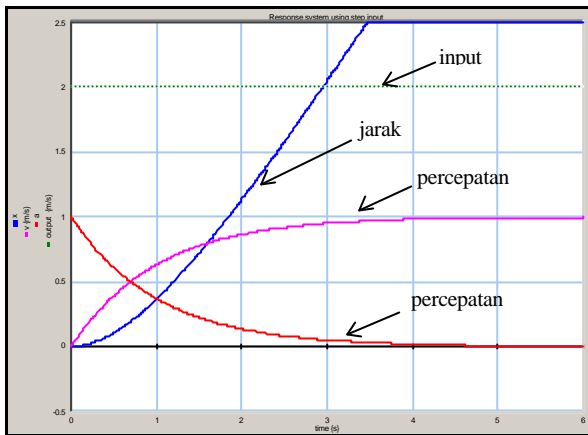


Gambar 3. model awal sistem

Arah tanda panah menunjukkan aliran power dalam sistem. Arah ini tidak berhubungan dengan arah effort dan flow secara langsung. Sehingga menurut aliran power, dapat dilihat bahwa MSf merupakan sumber power yang mengalir ke B1, B2 dan m.



Gambar 4. Model akhir dengan causal stroke



Gambar 5. Sistem dengan input fungsi step dengan amplitudo 2 m/s

Cara Kerja Sistem

Sebelum sistem disimulasikan, perlu diketahui cara kerja sistem secara global untuk mendapatkan suatu referensi terhadap perilaku sistem secara umum.

Dalam sistem mekanik (translasi), input yang masuk berupa kecepatan, outputnya berupa gaya yang bekerja pada sistem itu. Sehingga pada saat kecepatan $v_i(t)$ masuk, maka akan timbul gaya F sesuai dengan hubungan:

$$F = B v \tag{1}$$

Gaya ini timbul akibat adanya damper yang dipasang pada sistem. Gaya ini akan membuat massa m bergerak. Tetapi pada saat m bergerak juga akan timbul gaya gesekan oleh karena B_2 . Gaya gesekan ini berinteraksi dengan gaya dorong membuat massa bergerak menurut Hukum Newton II. Sehingga jika diberi $v_i(t)$ berupa fungsi step, respon kecepatannya akan seperti pengisian capacitor (lihat gambar 5).

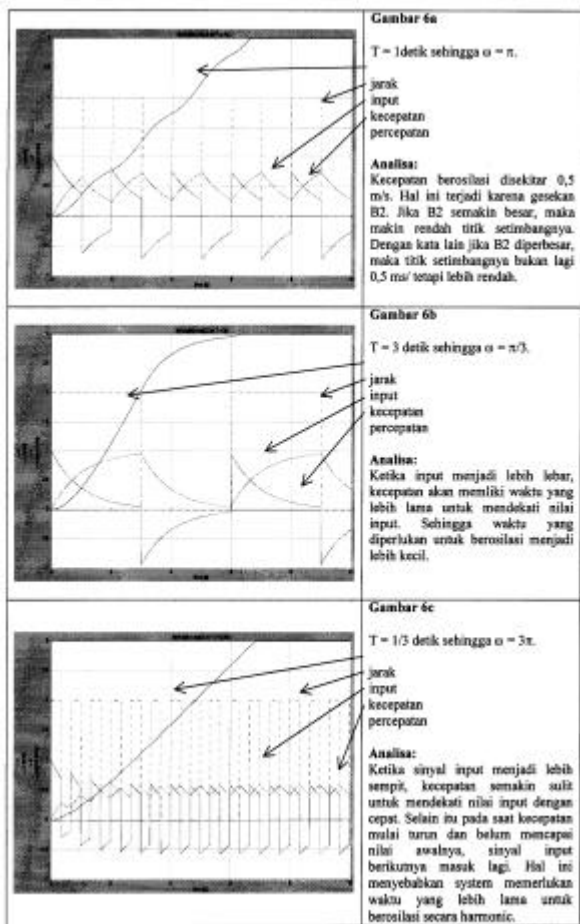
Simulasi

Simulasi dilakukan dengan memberikan input berupa sinyal square dengan variasi periode (lihat gambar 6).

Gesekan yang disimulasikan dapat berupa gesekan yang statis maupun yang dinamis. Sebagai contoh, diambil gaya gesek pada B_2 tidak lagi tergantung pada B_2 , tapi diturunkan dari sebuah fungsi, misalnya $F_f = \mu F_N \text{sgn}(v)$. Di sini $\text{sgn}(v)$ adalah signum function yang hanya mengambil tanda positif atau negatif dari v . Untuk dapat melakukan modifikasi ini, maka dilakukan perubahan persamaan sebagai berikut:

- constants**
- real $g = 9.8$;**
- parameters**
- real m ;**
- equations**
- $p.e = 0.05 * m * g * \text{sign}(p.f)$;**

Untuk melakukan hal ini sub model yang melambangkan B_2 dipilih dengan cara double-click, lalu persamaan yang muncul pada *equation editor* diubah sesuai dengan listing program di atas ($p.e$ adalah gaya sedang $p.f$ adalah kecepatan. p artinya suatu *power signal*, sedang lambang e atau f menunjukkan *effort* atau *flow*).



Gambar 6. Hasil simulasi untuk berbagai variasi periode sinyal square

Input signal generator dapat diganti-ganti sesuai dengan keinginan. Jika lambang signal generator ini di-click kanan dan click ini ditahan, akan muncul menu, dipilih *Attribute*, lalu *from File*. Dari sini pengguna bisa memilih jenis signal generator yang diinginkan.

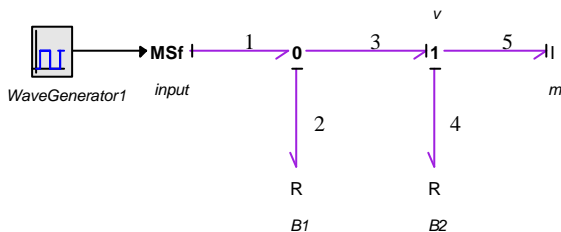
Persamaan Diferensial

Langkah dan sistematika untuk mendapatkan persamaan diferensial dapat dilihat di [4]. Berikut ini akan diperlihatkan urutan langkah yang dilakukan untuk mendapatkannya secara sederhana.

Sebelum menghitung persamaan diferensial, perlu dilakukan penomoran bond untuk memudahkan referensi (lihat gambar 7). Untuk setiap bond akan memiliki effort dan flow masing-masing. Misal, pada bond 1, akan terdapat e_1 (effort pada bond 1) dan f_1 (flow pada bond 1). Penurunan persamaan ini dilakukan berdasarkan ketentuan ini.

Pada penurunan persamaan diferensial ini, *0-junction* dan *1-junction* memegang peranan penting. Karena dari sinilah akan dapat diturunkan hubungan antar variabel dalam sistem.

Sistem ini hanya memiliki 1 storage component, dalam hal ini I:m (artinya komponen I yang dalam sistem ini mewakili m). Sehingga hanya diperlukan persamaan diferensial orde 1. Lalu berdasarkan [1,4], state dari komponen I adalah flow. Flow yang terdapat pada I:m adalah f_5 (dalam hal ini adalah kecepatan). Sehingga f_5 menjadi variabel state.



Gambar 7. Penomoran bond

Karena sistem massa merupakan *p-type storage element* [4], maka persamaan state berdasarkan tipe komponennya juga dapat dicari. Karena merupakan p-type storage element maka hasilnya dinyatakan dalam p . Sebagai perbandingan, C merupakan q-type storage element, sehingga jika dalam C, hasilnya dinyatakan menggunakan q.

Catatan penting yang perlu diperhatikan adalah konsep *dummy bond*, dalam hal ini adalah bond 1. Konsep dummy bond ini memiliki kesamaan dengan *dummy node* atau *dummy mesh* dalam sistem rangkaian listrik. Dalam hal ini, bond 1 mewakili input kecepatan $v_i(t)$, yang adalah f_1 .

Setiap penurunan persamaan selalu dimulai dari komponen yang memiliki state, sehingga diawali dari persamaan yang menghubungkan e_5 dengan f_5 . [1] memberikan suatu acuan bahwa pada p-type storage element

$$\frac{df_5}{dt} = \frac{1}{m} e_5 \quad (2)$$

dan

$$\frac{dp_5}{dt} = e_5 \quad (3)$$

Perhatikan gambar 7, bond 5 terhubung dengan 1-junction bersama dengan bond 3 dan 4. Oleh karena itu f_3 , f_4 dan f_5 bernilai sama atau dapat saling menggantikan. Sedangkan berdasarkan arah tanda panah, e_5 ada selisih antara e_3 dan e_4 [1]. Pada R:B1, hubungan antara effort dan flownya seperti Hukum Ohm (tegangan = effort, arus = flow, tahanan = R atau B1). Hal yang sama juga terjadi pada R:B2. Penurunan persamaan diferensial dianggap selesai jika persamaan ini sudah mencakup semua variabel state dan input yang ada. Urutan langkah yang dilakukan dapat dilihat pada table 1.

Karena flow dalam mekanik adalah kecepatan, maka persamaan statanya dapat ditulis:

$$\dot{v}_5 = -\left(\frac{B_1 + B_2}{m}\right)v_5 + \frac{B_1}{m}v_i(t) \quad (4)$$

atau

$$\dot{p}_5 = -\left(\frac{B_1 + B_2}{m}\right)p_5 + B_1v_i(t) \quad (5)$$

Tabel 1. Penurunan persamaan diferensial

1: $\frac{df_5}{dt} = \frac{1}{m} e_5$	1: $\frac{dp_5}{dt} = e_5$
2: $\frac{df_3}{dt} = \frac{1}{m} (e_3 - e_4)$	2: $\frac{dp_3}{dt} = (e_3 - e_4)$
3: $\frac{df_1}{dt} = \frac{1}{m} (e_2 - B_2 f_4)$	3: $\frac{dp_1}{dt} = e_2 - e_4$
4: $\frac{df_2}{dt} = \frac{1}{m} (B_1 f_2 - B_2 f_3)$	4: $\frac{dp_2}{dt} = B_1 f_2 - B_2 f_3$
5: $\frac{df_4}{dt} = \frac{1}{m} (B_1 (f_1 - f_2) - B_2 f_3)$	5: $\frac{dp_4}{dt} = B_1 (f_1 - f_2) - B_2 f_3$
6: $\frac{df_2}{dt} = \frac{1}{m} (B_1 f_1 - B_1 f_2 - B_2 f_3)$	6: $\frac{dp_2}{dt} = B_1 f_1 - B_1 f_2 - B_2 f_3$
7: $\frac{df_3}{dt} = \frac{1}{m} (B_1 f_1 - B_1 f_2 - B_2 f_3)$	7: $\frac{dp_3}{dt} = B_1 f_1 - (B_1 + B_2) f_2$
8: $\frac{df_5}{dt} = \frac{B_1}{m} v_i(t) - \left(\frac{B_1 + B_2}{m}\right) f_5$	8: $\frac{dp_5}{dt} = B_1 v_i(t) - \left(\frac{B_1 + B_2}{m}\right) p_5$

Dari persamaan diferensial, dapat dicari persamaan state space-nya. Sehingga dapat pula dihitung transfer function sistem. 20-Sim dapat melakukan perhitungan ini, melalui menu Tools

Linear System Editor. Dari sini dapat dilakukan berbagai macam simulasi sesuai keinginan, misalnya plot terhadap fungsi step, bode diagram, nyquist, pole-zero, dll. 20-Sim juga dapat membantu menghitung persamaan diferensial ini, tetapi hasilnya dinyatakan dalam lambang-lambang tertentu. Pembahasan tentang hal ini di luar konteks makalah ini sehingga tidak diberikan.

Simulasi 3D

20-Sim dapat melakukan simulasi 3 dimensi yang membantu pengguna untuk melihat respon sistem dengan lebih baik. Cara penggunaan simulasi ini tidak dibicarakan disini karena memerlukan pembahasan yang sangat luas. Informasi lengkap dapat diperoleh di [5].

Model simulasi yang dibuat disini adalah sebuah kotak yang akan bergerak sesuai dengan grafik pada gambar 6. Dalam simulasi ini akan terlihat bagaimana kotak tersebut bergerak di atas sebuah bidang datar, mula-mula dipercepat, lalu diperlambat, dipercepat lagi, dst.

Model akhir beserta hasil simulasinya (lengkap dengan simulasi 3D) dapat dilihat di <http://faculty.petra.ac.id/hanyf/download/dynsys.zip>. [5] juga menyediakan demo software yang dapat didownload secara gratis lengkap dengan contoh-contoh aplikasinya.

Kesimpulan

Bondgraph memberikan kemudahan dalam memodelkan suatu sistem fisis. Tetapi untuk dapat menggunakannya diperlukan pemahaman yang cukup tentang istilah-istilah yang dipergunakan seperti effort dan flow, 0-junction dan 1-junction, causality. Pemahaman ini sudah cukup untuk memodelkan sistem yang sederhana.

20-Sim menyediakan berbagai fasilitas untuk melakukan simulasi. Fasilitas yang membantu dalam mencari model matematika adalah simulasi, linear sistem editor. Masih banyak fasilitas lain di 20-Sim yang belum dibicarakan karena keterbatasan media. Oleh karena itu dianjurkan untuk membaca panduan penggunaan 20-Sim yang dapat diambil secara gratis di [5]

Daftar Pustaka

- [1] Breedveld, P.C., Integrated Modeling of Physical Systems: Dynamic System, Control Engineering Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics & Computer Science, University of Twente., Ref. number: 024CE2002, Enschede, 2002.
- [2] Broenink, Jan F., Introduction to Physical Systems Modelling with Bond Graphs, Universty of Twente, 1999.
- [3] [<http://www.20sim.com/product/history.html>]
- [4] Karnopp D.C., Margolis D.L., and Rosenberg R.C., System dynamics: A unified approach 2nd edition, J Wiley, New York, NY, 1990
- [5] [<http://www.20sim.com>]