

Perancangan dan Evaluasi Kinematika Pada Mainan Mekanikal Edukatif

Dwi Basuki Wibowo^{1,a,*}, Sulardjaka^{2,b}, Gunawan Dwi Haryadi^{3,c}

¹Teknik Mesin UNDIP, Jl. Puri VI/2 Banyumanik Semarang

²Teknik Mesin UNDIP, Jl. Dewi Sartika Timur RT02/RW05 Sukorejo Gunungpati Semarang

³Teknik Mesin UNDIP, Jl. Duta Asri No. A-5 Duta Bukit Mas Banyumanik Semarang

^a toysdesigncenter@gmail.com, ^b sulardjaka@gmail.com, ^c gunawan_dh@yahoo.com

Abstrak

Mainan mekanikal edukatif adalah mainan yang bisa bergerak, sebagai hiasan atau peraga edukasi, dan mekanisme penggerakannya dapat dilihat. Mainan mekanikal sekomplek apapun sumber penggerakannya hanya satu dan berbentuk rotasi, tidak seperti robot dimana semua sendinya diberi motor listrik yang bisa dikendalikan. Agar menghasilkan gerakan produk sesuai keinginan, saat merancangnya terlebih dahulu harus memilih mekanisme yang tepat serta melakukan sintesa dan analisa kinematika. Paper ini membahas penggunaan mekanisme kinematika sederhana (*planar kinematics*) pada mainan mekanikal. Untuk menggerakkannya bisa secara manual dengan memutar lengan atau motor listrik berkecepatan 20-30 rpm konstan. Desain mainan mekanikal dikerjakan dengan *software* AutoCAD sedangkan analisis kinematikanya menggunakan *software* Visual Nastran yang sangat membantu dalam simulasi gerak sebelum fabrikasi produk.

Kata Kunci: mainan mekanikal edukatif, sintesa kinematika, analisa kinematika, AutoCAD, Visual Nastran

1. Pendahuluan

Sejak diberlakukannya ACFTA tahun 2010 import mainan anak-anak terus membanjiri pasar Indonesia. Nilai import 5 produk konsumsi yaitu mainan anak-anak, alas kaki, makanan dan minuman, pakaian jadi dan elektronika selama semester I– 2011 menembus angka USD 2.13 miliar atau naik 9.8% dibanding periode yang sama tahun lalu yang hanya sebesar USD 1.92 miliar. Nilai import mainan anak-anak menduduki posisi ke 2 terbesar setelah pakaian jadi yaitu naik sebesar 39.52% dari USD 27.42 juta menjadi USD 38.26 juta [1]. Menurut Asosiasi Penggiat Mainan Edukatif dan Tradisional Indonesia (APMENTI) negara pengimport mainan anak-anak terbesar adalah China yaitu sebesar 71,14% dan sisanya berasal dari Taiwan, Vietnam, Philipina, dan Eropa [2]. Import mainan anak-anak ini dipastikan akan semakin bertambah dengan diberlakukannya MEA pada akhir tahun 2015 [3].

Unsur edukasi mainan-mainan ini hampir tidak ada, hanya menimbulkan rasa senang saat melihat/memainkannya [4]. Mainan mekanikal akan lebih menarik dan menggugah rasa ingin tahu bila mekanisme penggerakannya terlihat. Bentuk mainan mekanikal edukatif di bagian atas obyek mainan yang digerakkan dan di bagian bawah mekanisme kinematikanya [5,6]. Untuk menggerakkannya bisa secara manual dengan memutar lengan atau dengan motor listrik berkecepatan 20-30 rpm, seperti nampak pada Gambar 1.



Gambar 1: Mainan mekanikal berenang gaya bebas

Dalam merancang mainan mekanikal edukatif terlebih dahulu harus memilih komponen kinematika (*kinematic pairs*) yang tepat (lihat Tabel 1) [7,8] serta melakukan sintesa dan analisa kinematika [9]. Sintesa yang dimaksud adalah menganalisis gerak setiap bagian mainan mekanikal yang direncanakan berdasar dimensi yang telah ditetapkan. Sedangkan analisa meliputi analisis posisi dan kecepatan saja. Analisis gaya tidak termasuk di sini karena produk digerakkan dengan kecepatan rendah dan konstan.

Tabel 1 : Komponen kinematika yang sesuai untuk mengubah gerakan input rotasi ke berbagai bentuk gerakan output

No.	Komponen Kinematika	Gerakan Output
1	<i>Pulley-Belt</i>	Rotasi
2	<i>Cam-Follower</i>	linier, osilasi, helikal
3	<i>Four Bar Linkage</i>	rotasi, elips
4	<i>Slider Crank</i>	linier, elips
5	<i>Quick-Return</i>	linier, osilasi
6	<i>Gear</i>	Rotasi

Paper ini membahas penggunaan mekanisme kinematika sederhana (*planar kinematics*) pada mainan mekanikal edukatif. Mendesain mainan mekanikal ini tidak bisa secara manual karena melibatkan beberapa komponen yang saling bergerak relatif. Untuk itu diperlukan bantuan computer [10,11]. Dalam paper ini perancangan dilakukan dengan software AutoCAD sedangkan analisa kinematikanya menggunakan software Visual Nastran.

2. Tujuan Penelitian

Membahas proses desain mainan mekanikal edukatif yang bisa digerakkan oleh 2 macam mekanisme kinematika sederhana, yaitu *cam-follower* dan *linkage mechanism*.

Agar keseluruhan gerak mainan dapat dihasilkan oleh susunan komponen kinematika perlu ditetapkan lebih dahulu: (1). bagian-bagian mainan yang digerakkan, (2). dimensi produknya, (3). jenis dan pola gerakannya, (4). posisi maksimal dan minimalnya, (5).

kecepatannya, dan (6). penggerak utamanya. Nomor (1) s/d (4) terkait dengan topik sintesa sedangkan nomor (4) dan (5) terkait dengan topik analisa kinematika [9,12].

3. Metodologi

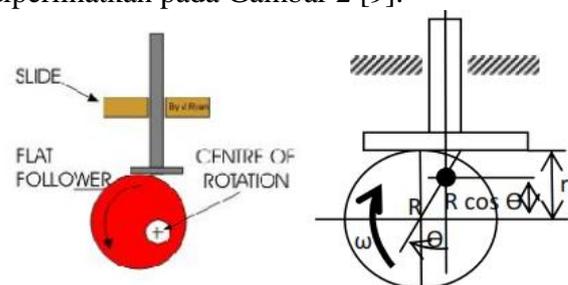
Agar mainan dapat menirukan gerak suatu obyek sedetil mungkin perlu ditetapkan lebih dahulu jenis aktifitas tertentu manusia, hewan, atau mesin yang akan ditiru gerakannya. Metodologinya adalah sebagai berikut [13] :

- Mengumpulkan data dan informasi gerakan obyek yang direncanakan dengan cara memvideo obyek nyata tersebut dan memutarnya *frame by frame*
- Mengidentifikasi dan mengelompokkan setiap gerakan obyek
- Mendesain dan menggambar rancangan produk, komponen mesin, dan mekanisme penggerakannya dengan *software* AutoCAD
- Mensimulasikan gerak mekanisme dan obyek mainan dengan *software* Visual Nastran
- Apabila simulasi kinematika sudah sesuai harapan selanjutnya bisa dilakukan proses fabrikasi setiap komponen dan merakitnya.

4. Hasil dan Analisa

a) Mainan dengan penggerak *cam-follower*

Mekanisme *cam-follower* yang dibahas di sini hanya *circular disk cam*, yang banyak digunakan pada mainan mekanikal, seperti diperlihatkan pada Gambar 2 [9].



Gambar 2: *Circular disk cam*

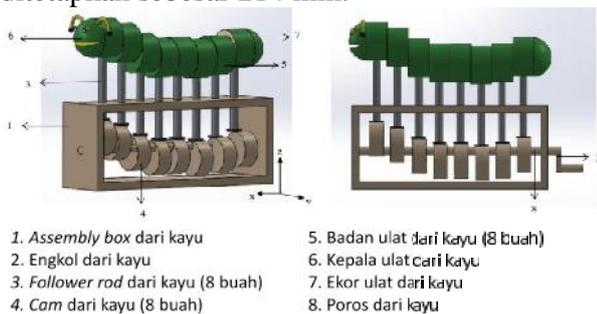
Perpindahan linier *follower* sebagai berikut :

$$z = r - R \cos \theta \quad -(r - R) = R(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

dan kecepatan *follower*-nya adalah :

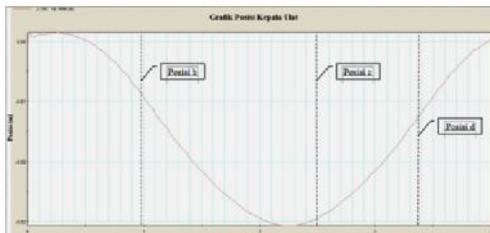
$$v = (2 \pi n/60) R \sin \theta \quad (2)$$

Penggambaran cukup baik penggunaan mekanisme ini adalah pada mainan mekanikal ulat berjalan, seperti nampak pada Gambar 3 [14]. Dimensi *box* ditetapkan sebesar 280x110x75 mm serta diameter *disc cam*, jarak pusat rotasi *cam* ke sumbu *disc cam* R, dan diameter badan ulat ditetapkan masing-masing adalah 45 mm, 15 mm, dan 50 mm. Tinggi kepala ulat maksimum dari landasan *box* juga ditetapkan sebesar 214 mm.

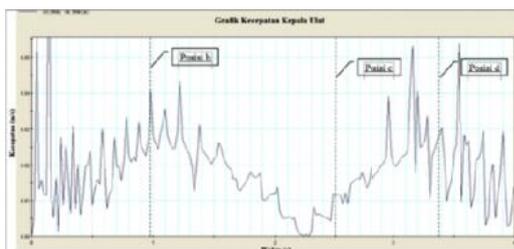


- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Assembly box dari kayu | 5. Badan ulat dari kayu (8 buah) |
| 2. Engkol dari kayu | 6. Kepala ulat dari kayu |
| 3. Follower rod dari kayu (8 buah) | 7. Ekor ulat dari kayu |
| 4. Cam dari kayu (8 buah) | 8. Poros dari kayu |

Gambar 3: Mainan mekanikal edukatif ulat berjalan



Gambar 4: Perubahan posisi kepala ulat terhadap waktu untuk 1 putaran engkol



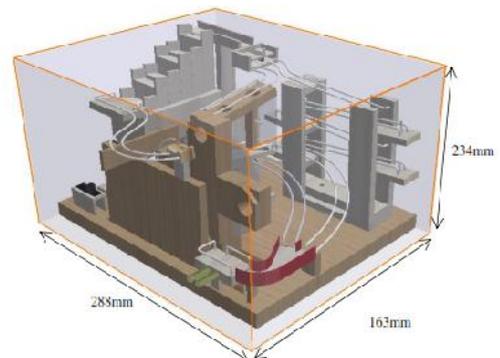
Gambar 5: Perubahan kecepatan kepala ulat terhadap waktu untuk 1 putaran engkol

Berdasar penetapan dimensi seperti tersebut di atas dihasilkan perpindahan kepala ulat maksimum-minimum adalah ± 15 mm (lihat Gambar 4). Posisi b, c, dan d pada gambar tersebut menunjukkan posisi kepala ulat pada sudut putar engkol masing-masing 90° , 180° ,

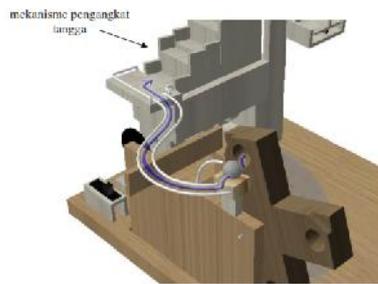
dan 270° . Sementara kecepatan linier maksimum kepala ulat pada putaran engkol 30 rpm, seperti diperlihatkan pada Gambar 5, adalah sebesar 47 mm/sec. Kecepatan ini sangat lambat yang memungkinkan perubahan gerak obyek mainan dan mekanisme penggeraknya dapat dilihat tahap demi tahap.

Dari analisis posisi Gambar 4 nampak bahwa karena sudut *cam* kepala ulat dengan badan ulat ke-1, ke-2, dst berbeda sebesar kelipatan 45° maka ketika posisi kepala ulat maksimum, posisi badan ulat ke-1 berada di bawah kepala ulat sebesar 4.4 mm, dst.. Posisi badan ulat di bagian ekor sama dengan badan ulat ke-2, yaitu sebesar 6.2 mm. Perbedaan posisi setiap badan ulat ini cukup jelas menggambarkan secara visual gerakan ulat saat berjalan. Gerakan mainan mekanikal ulat berjalan ini akan lebih halus jika perbedaan sudut setiap *cam*-nya dibuat menjadi 30° atau dengan kata lain menambah jumlah *cam-follower*-nya menjadi 14 buah.

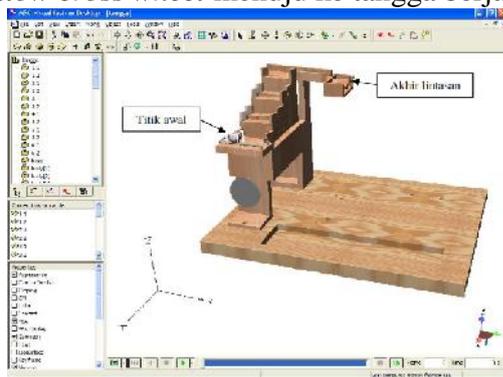
Penerapan mekanisme *circular disc cam* sedikit lebih kompleks adalah pada mainan *roller coaster* kelereng dengan mekanisme pengangkat kombinasi tangga berjalan dan *hollow cross wheel*, seperti nampak pada Gambar 6 [15]. Gambar 7 memperlihatkan kelereng keluar dari mekanisme pengangkat *hollow cross wheel* menuju ke tangga berjalan. Tinggi posisi minimum dan maksimum kelereng ditetapkan masing-masing sebesar 11.1 mm dan 137.7 mm diukur dari landasan.



Gambar 6: *Roller coaster* kelereng dengan kombinasi mekanisme pengangkat berbentuk *hollow cross wheel* dan tangga berjalan

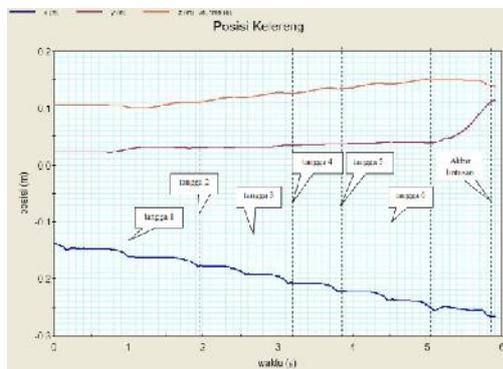


Gambar 7: Kelereng keluar dari mekanisme *hollow cross wheel* menuju ke tangga berjalan

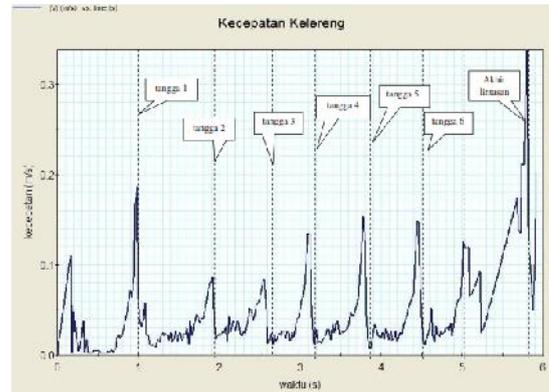


Gambar 8: Simulasi pergerakan kelereng pada mekanisme pengangkat tangga berjalan

Karena *circular disc cam* digunakan pada pengangkat kelereng type tangga berjalan, maka evaluasi kinematika hanya dilakukan pada mekanisme tersebut. Gambar 8 memperlihatkan insialisasi posisi awal dan akhir kelereng, sedangkan Gambar 9 dan Gambar 10 masing-masing memperlihatkan posisi dan kecepatan kelereng saat menaiki tangga (arah z).



Gambar 9: Perpindahan posisi kelereng saat menaiki anak tangga



Gambar 10: Kecepatan kelereng saat menaiki anak tangga

Berdasar hasil simulasi diperoleh kecepatan dan waktu tempuh kelereng sampai puncak anak tangga terlihat seperti pada Tabel 2. Dari Gambar 9 dan Tabel 2 tersebut dapat diketahui panjang total lintasan kelereng adalah 0.29 m yang membutuhkan waktu sebesar 5.86 detik.

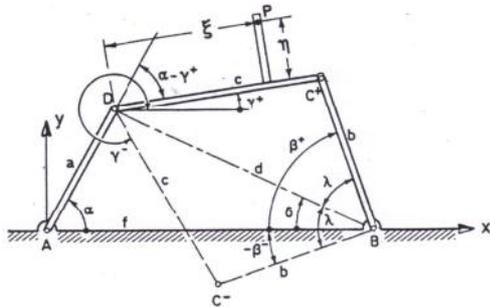
Tabel 2: Kecepatan dan waktu tempuh kelereng pada mekanisme tangga berjalan

Posisi kelereng Di	Kecepatan (m/s)	Waktu ^{*)} (sec)
Tangga 1	0.06	1.00
Tangga 2	0.03	1.94
Tangga 3	0.01	2.66
Tangga 4	0.01	3.18
Tangga 5	0.01	3.86
Tangga 6	0.01	4.52
Titik tertinggi	0.01	5.02
Akhir lintasan	0.07	5.86
Kecepatan rata-rata	0.036 m/sec	
Jarak yang ditempuh	0.29 m	

^{*)} Perhitungan waktu dimulai dari posisi awal kelereng ($x = -0.139$ m, $y = 0.0227$ m, $z = 0.105$ m) hingga akhir lintasan

b) Mainan berpengerak *Linkage Mechanism*
Mekanisme batang (*linkage mechanism*) yang dibahas di sini hanya *four bar linkage* dan *slider crank*, yang banyak digunakan pada mainan mekanikal. Gambar 11 memperlihatkan mekanisme *four bar linkage* dimana P adalah sebuah titik tetap di *coupler* [9]. Perubahan posisi titik P dapat dicari dari persamaan (3),

sedangkan kecepatannya dapat dihitung dari persamaan (4) [8,16].



Gambar 11: Mekanisme four bar linkage

Analisa Posisi

$$x_P = a \cos \alpha + \zeta \cos \gamma - \eta \sin \gamma \tag{3a}$$

$$y_P = a \sin \alpha + \zeta \sin \gamma + \eta \cos \gamma \tag{3b}$$

Analisa Kecepatan

$$\dot{\beta} = \dot{\alpha} \frac{a}{b} \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin(\gamma + \beta)} \tag{4a}$$

$$\dot{\gamma} = -\dot{\alpha} \frac{a}{c} \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin(\gamma + \beta)} \tag{4b}$$

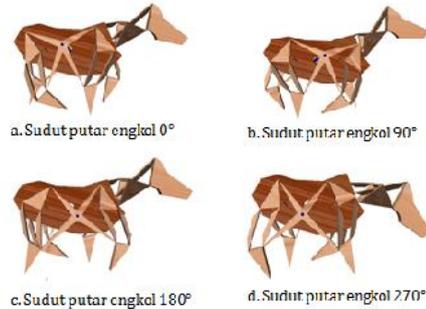
Mainan mekanikal yang memanfaatkan mekanisme *four bar linkage* diantaranya yaitu kuda berlari seperti nampak pada Gambar 12. Dimensi global mainan ini adalah panjang (tanpa ekor) = 193 mm, tinggi = 148 mm, dan lebar = 53 mm. Batang engkol AD sebagai input yang berputar searah jarum jam (dengan sumbu putar di A), menggerakkan kaki kuda BC melalui perantara batang DC. Perubahan posisi kaki kuda untuk 1 putaran poros engkol diperlihatkan seperti pada Gambar 13 [8,17].



Gambar 12: Mainan kuda berlari (Notasi A, B, C dan D sesuai Gambar 11)

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh kecepatan kaki kiri kuda dan waktu tempuh

untuk 1 putaran engkol seperti diperlihatkan pada Tabel 3, di mana waktu tempuh dihitung dari posisi awal yaitu $y = 0$ m dan $z = 0$ m [17]. Hasil simulasi juga menunjukkan untuk 1 putaran engkol dibutuhkan waktu 2.04 detik dengan kecepatan rata-rata 0.173 m/s.

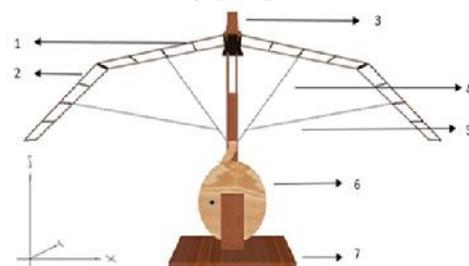


Gambar 13: Perubahan posisi kaki kuda untuk 1 putaran poros engkol

Tabel 3: Kecepatan dan waktu tempuh kaki kiri kuda untuk 1 putaran engkol

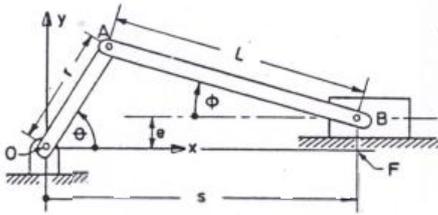
No.	Posisi engkol	Kecepatan (m/sec)	Waktu (sec)
1	B	0.203	0.51
2	C	0.014	1.02
3	D	0.336	1.53
4	Akhir	0.043	2.04

Mainan mekanikal yang memanfaatkan mekanisme *slider crank* diantaranya yaitu burung mengepakkan sayap seperti nampak pada Gambar 14 [8,17]. Tinggi-rendahnya kepakkan sayap ini ditentukan oleh perpindahan linier *slider*, seperti dinyatakan oleh persamaan (5) (lihat Gambar 15) [8,9].



- 1. Sayap bagian 1
- 2. Sayap bagian 2
- 3. Badan burung
- 4. Batang penghubung 1
- 5. Batang penghubung 2
- 6. Mekanisme slider crank
- 7. Rangka utama

Gambar 14: Mainan burung mengepakkan sayap



Gambar 15 : Mekanisme slider crank

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{r}{L} \sin \theta - \frac{e}{L} \right) \quad (5a)$$

$$s = r \cos \theta + L \cos \varphi \quad (5b)$$

dimana φ mencapai minimum pada sudut crank $\theta = -90^\circ$ dan maksimum pada $\theta = 90^\circ$.

$$\varphi_{min} = \arcsin \frac{-r-e}{L} \quad (6a)$$

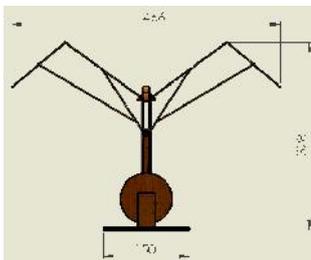
$$\varphi_{max} = \arcsin \frac{r-e}{L} \quad (6b)$$

Sedangkan kecepatan slider dinyatakan oleh persamaan (7) berikut:

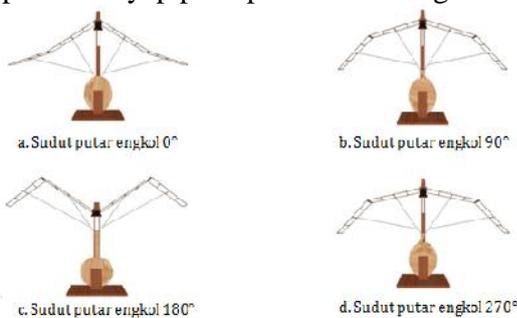
$$\dot{\varphi} = \frac{r \cos \theta}{L \cos \varphi} \dot{\theta} \quad (7a)$$

$$\dot{s} = -(r \sin \theta + r \cos \theta \tan \varphi) \dot{\theta} \quad (7b)$$

Persamaan (5) dan (6) di atas merupakan dasar saat menentukan panjang sayap dan dimensi produk, seperti nampak pada Gambar 16, dimana panjang sayap bagian 1 160 mm dan sayap bagian 2 119 mm. Gambar 17 memperlihatkan perubahan posisi sayap burung untuk 1 putaran engkol.

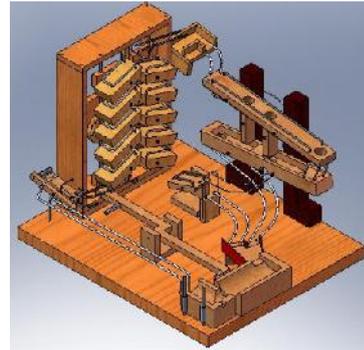


Gambar 16: Dimensi global mainan burung kepakkan sayap pada posisi sudut engkol 180°

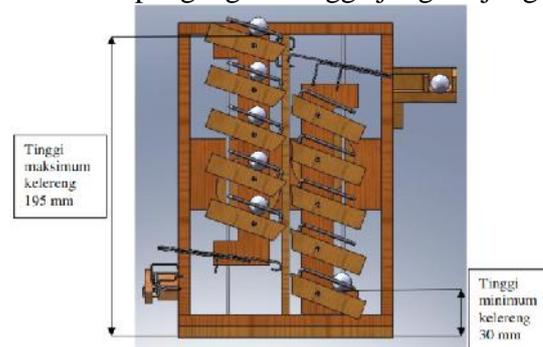


Gambar 17: Perubahan posisi sayap burung untuk 1 putaran poros engkol

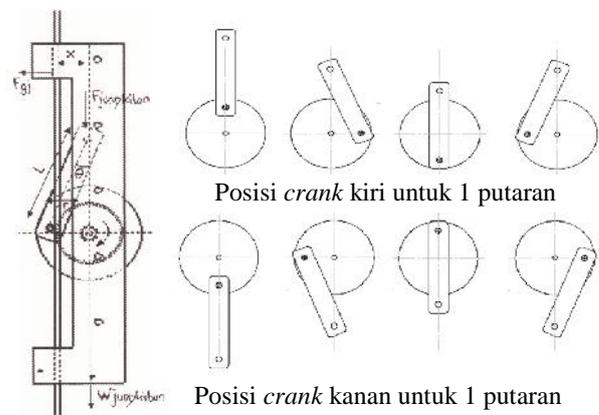
Penerapan mekanisme slider crank sedikit lebih kompleks adalah pada mainan roller coaster kelereng dengan mekanisme pengangkat tangga jungkat-jungkit, seperti nampak pada Gambar 18 [18]. Dimensi global mainan adalah 285 x 235 x 220 mm. Gambar 19 memperlihatkan tinggi minimum dan maksimum kelereng yaitu masing-masing 30 mm dan 195 mm.



Gambar 18: Roller coaster kelereng dengan mekanisme pengangkat tangga jungkat-jungkit



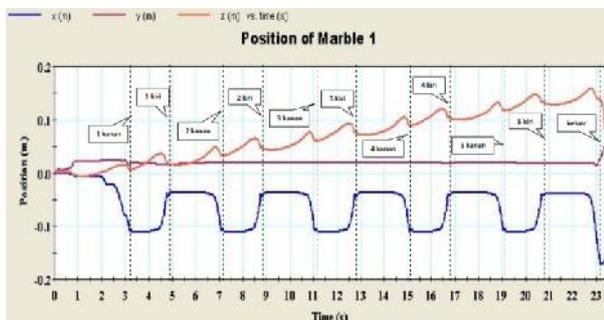
Gambar 19: Tinggi minimum dan maksimum kelereng pada mekanisme pengangkat



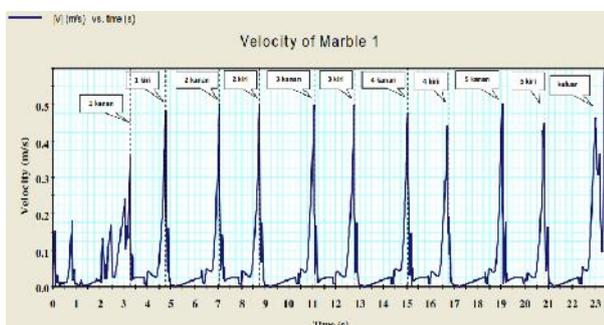
Gambar 20: Mekanisme slider crank sebagai penggerak utama mekanisme pengangkat

Mekanisme pengangkat kelereng type tangga jungkat-jungkit ini digerakkan oleh 2 mekanisme *slider crank*, seperti nampak pada Gambar 20. Arah putaran *crank* kiri dan kanan dibuat berlawanan dan dengan penyusunan *connecting rod* seperti pada Gambar 20 tersebut dihasilkan gerakan bolak-balik pada dudukan anak tangga. Saat dudukan anak tangga sebelah kiri bergerak naik, posisi susunan anak tangga kiri dan kanan berpindah seperti pada Gambar 19. Demikian pula sebaliknya saat dudukan anak tangga sebelah kiri bergerak turun.

Gambar 21 dan Gambar 22 masing-masing memperlihatkan perubahan posisi dan kecepatan kelereng untuk 1 siklus putaran engkol. Dari hasil simulasi diperoleh waktu tempuh kelereng dari titik awal ke akhir lintasan membutuhkan waktu 8.2 detik dengan kecepatan rata-rata 0.485 m/s, dan total panjang lintasan yang ditempuh kelereng adalah 0.97 m.



Gambar 21: Perubahan posisi kelereng untuk 1 siklus putaran engkol



Gambar 21: Perubahan posisi kelereng untuk 1 siklus putaran engkol

5. Kesimpulan

- Import mainan anak-anak yang terus membanjiri pasar Indonesia menuntut para produsen kreatif mencari terobosan mainan baru yang belum banyak diproduksi dan diperagakan di sekolah-sekolah. Mainan mekanikal edukatif produknya bisa beragam yaitu mainan yang mengandung unsur edukasi maupun yang mengedepankan unsur hiburan atau kesenangan bagi mereka yang melihatnya/memainkannya.
- Mendesain mainan mekanikal edukatif perlu bantuan komputer karena selain bisa memastikan gerakan produk sesuai yang diharapkan sebelum diproduksi, juga memudahkan dalam pengarsipan gambar dan modifikasi desain.

6. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat DIKTI Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan dan LPPM UNDIP atas biaya penelitian Hibah Bersaing dana BOPTN TA 2015 yang berjudul "Pengembangan Desain dan Proses Manufaktur Mainan Mekanikal Edukatif Guna Mendukung Industri Kreatif dan Pengentasan Kemiskinan" Nomor DIPA – 023.04.1.673453/2015, tanggal 14 November 2014, DIPA Revisi 01 tanggal 03 Maret 2015

7. Referensi

- <http://industri.kontan.co.id/news/terpukul-impor-omzet-industri-mainan-tergerus-5%>, "Terpukul impor, omzet industri mainan tergerus 5%", Direktorat Jendral Basis Industri Manufaktur, Kementerian Perindustrian RI, dunduh 16/08/2012
- <http://www.kemenperin.go.id/artikel/655/profil/71/profil/71/rencana-strategis-kementerian-perindustrian>, 2011, "Omzet Mainan Anak Naik 20%", Berita Industri, Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, diunduh 02/10/2012
- Bustami, Gusmardi, "Menuju Asean Economic Community 2015", Departemen Perdagangan Republik Indonesia, 2015

4. Sirinterlikci, Arif, et al, “*Active Learning Through Toy Design and Development*”, The Journal of Technology Studies, 2009
5. <http://www.mechanical-toys.com/>, di unduh tanggal 10 Juli 2015
6. Blauvelt, Glenn, “*Creating Mechanical Toys: Step Toward a CAD Tool for Educational Automata*”, University of Colorado, Boulder CO USA, 2003
7. Zhu, Lifeng, et al, “*Motion-Guided Mechanical Toy Modeling*”, Microsoft Research Asia, 2012
8. Dwi Basuki W., Samuel, Bambang S., “*Peragaan Pembelajaran Mekanisme Kinematika Sederhana Dengan Mainan Mekanikal*”, Proceeding SNTTM XIII, UI Depok, Jakarta, 2014
9. Paul, Burton, 1979, “*Kinematics and Dynamics of Planar Machinery*”, Prentice-Hall, Inc., Englewood, New York
10. Taborda, Elkin, dan K. Chandrasegaran, Senthil, 2012, “*ME 444: Redesigning a Toy Design Course*”, Proceedings of TMCE 2012
11. H. D. Desai, V.K. Patel, “*Computer Aided Kinematic and Dynamic Analysis of Cam and Follower*”, Proceedings of The World Congress on Engineering, Vol II, London, U.K., 2010
12. Wilson, Charles E., et al, 1983, “*Kinematics and Dynamics of Machinery*”, Harper & Row, Publisher, New York
13. Dwi Basuki W., Samuel, Bambang S., “*Pengembangan Desain dan Proses Manufaktur Mainan Mekanikal Edukatif Guna Mendukung Industri Kreatif dan Pengentasan Kemiskinan*”, Laporan Riset Hibah Bersaing, Tahun ke-1, UNDIP, Semarang, 2014
14. Noorindah Khoiri W.R., Dwi Basuki W., “*Desain Mekanisme Kinematika Sederhana Pada Mainan Mekanikal Dengan Sistem Penggerak Cam-Follower*”, Tugas Akhir S-1, UNDIP, Semarang, 2015
15. Bhkti Haryo S., Dwi Basuki W., “*Rancang Bangun Compact Marble Toys Dengan Kombinasi Mekanisme Pengangkat Tangga dan Kincir*”, Tugas Akhir S-1, UNDIP, Semarang, 2011
16. A. Dhore, Ajay and Askhedkar, R.D., 2012, “*Synthesis of Four Bar Mechanism by Freudeinstein Equation*”, International Journal of Engineering Research and Application (IJERA), ISSN 2248-9622
17. Laras Kanti P., Dwi Basuki W., “*Desain Mekanisme Kinematika Sederhana Pada Mainan Mekanikal Dengan Sistem Penggerak Linkage*”, Tugas Akhir S-1, UNDIP, Semarang, 2015
18. Adrih Prasetya A., Dwi Basuki W., “*Rancang Bangun Compact Marble Toys Dengan Model Mekanisme Pengangkat Jungkat– Jungkit*”, Tugas Akhir S-1, UNDIP, Semarang, 2011