

NEWTON'S CRADLE (AYUNAN NEWTON)

Ayunan Newton adalah salah satu permainan Fisika populer. Peralatan ayunan Newton ini terdiri atas beberapa bola metal sejenis (misalnya 5 buah). Masing-masing bola tersebut digantungkan dengan dua utas tali yang sama panjang pada kerangka dan diatur agar semua bola saling bersentuhan. Dengan demikian posisi semua bola terletak pada bidang datar yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Secara pedagogis (proses pembelajaran) peralatan ayunan Newton ini ditujukan untuk mendemonstrasikan hukum kekekalan momentum dan energi. Dengan adanya redaman energi pada setiap kali ayunan dan bunyi yang terjadi pada setiap proses tumbukan antar bola, maka hukum kekekalan energi mekanik tidak digunakan dalam eksperimen ini. Fenomena yang terjadi diharapkan dapat membantu anda dalam menentukan koefisien tumbukan (restitusi) dari bola metal tersebut.

Dalam melakukan eksperimen ini anda harus hati-hati, karena talinya mudah putus. Jika terjadi tali putus, silahkan ganti sendiri dengan cara minta tali ke pengawas namun tidak diberikan tambahan waktu.

Pastikan bahwa alat yang anda terima merupakan peralatan ayunan Newton secara komplit, seperti yang ditunjukkan pada daftar berikut ini. Jika anda menemukan ada kekurangan beritahu segera ke pengawas.



Gambar 1

Peralatan yang digunakan

1. Satu set peralatan Ayunan Newton (ada lima buah bola pendulum indentik),
2. Mistar yang digunakan untuk menentukan ketinggian, sudut dan kecepatan awal,
3. Stop-watch,
4. Lilin Mainan (wax).

Eksperimen dibagi menjadi tiga bagian, yaitu:

- a. Tumbukan tunggal,
- b. Tumbukan berulang,
- c. Tumbukan inelastik sempurna

Tumbukan Tunggal

Bola disimpangkan dengan sudut simpangan θ kemudian dilepaskan. Ketika terjadi tumbukan, momentum bola pertama akan diberikan ke bola kedua, dan seterusnya sampai bola kelima, sehingga bola terpantul dengan sudut simpangan yang relatif mirip dengan simpangan dari bola

pertama. Selanjutnya juga dilakukan eksperimen untuk dua, tiga dan empat bola yang disimpangkan.

Tumbukan Berulang

Seperti halnya pada eksperimen tumbukan tunggal dengan satu bola yang direntangkan dan bola dibiarkan terjadi tumbukan terus berulang-ulang, yang ditandai dengan bunyi tik ... tik ... tik Bola akan beresilasi dengan amplitudo yang semakin berkurang. Suara tumbukan (bunyi tik) akhirnya akan hilang dan terjadi tumbukan inelastik sempurna yaitu semua bola bergerak bersamaan. Pada kondisi ini, dianggap sudah tidak terjadi tumbukan lagi. Proses ini menunjukkan bahwa dalam setiap gerakan bola terjadi redaman. Anda dapat menyelidiki efek dari variasi kecepatan awal bola sebelum tumbukan.

Tumbukan Inelastik Sempurna

Ketika semua bola bergerak bersama-sama, maka dapat dianggap sebagai gerak satu bola yang digantung pada sebuah tali mirip dengan ayunan matematis. Anda dapat menghitung percepatan gravitasi bumi setempat.

Tujuan

1. Mengamati peristiwa tumbukan pada ayunan Newton,
2. Mencari hubungan antara jumlah bunyi pada peristiwa tumbukan dengan kecepatan awal pada sistem ayunan Newton,
3. Menentukan koefisien restitusi dari bola pendulum.
4. Menentukan percepatan gravitasi bumi.

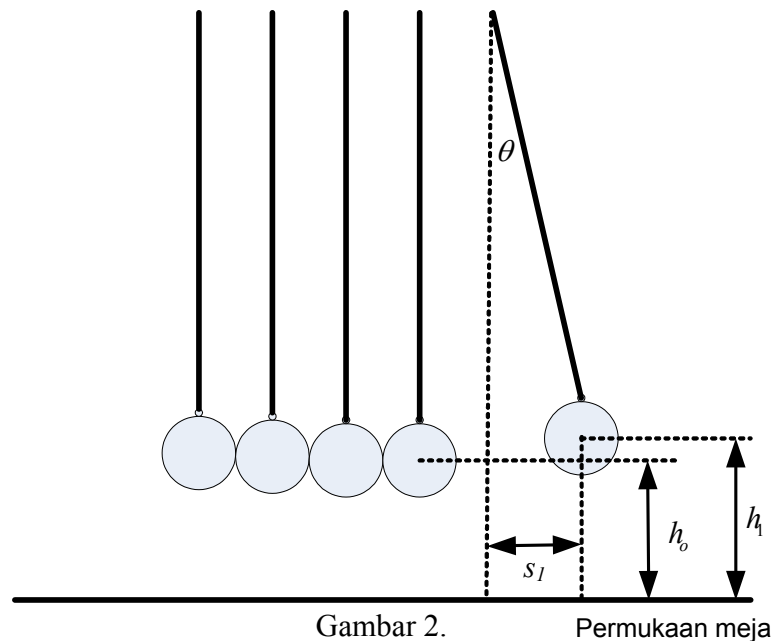
Langkah-langkah Eksperimen

I. Tumbukan Tunggal

Periksalah peralatan ayunan Newton apakah kokoh/stabil, jika tidak tempelkan lilin mainan (wax) pada tepi-tepi dudukan ayunan tsb dengan tujuan untuk menghindari osilasi tambahan.

- I.1. Angkatlah satu bola pada ujung kanan dengan ketinggian h_1 atau simpangannya s_1 atau dengan sudut θ_1 (usahakan lebih dari 30°), ke-empat bola yang lain dalam keadaan diam. Penentuan ketinggian diambil dari permukaan meja ke titik pusat bola, lalu catat sudut θ_1 dan ketinggian h_1 (lihat Gambar 2). Catat juga ketinggian bola dalam keadaan istirahat (bola tidak diangkat), h_0 .

- I.2. Lepaskan bola yang terangkat tadi dan amati apa yang terjadi pada kelima bola itu setelah tumbukan. Jelaskan apa yang terjadi pada bola pertama setelah dilepaskan, selanjutnya pada bola kedua, ketiga, keempat dan kelima. Lakukan juga pengamatan untuk dua bola, tiga bola dan empat bola yang direntangkan.
- I.3. Tentukan energi potensial bola pada saat membentuk sudut θ , dalam besaran massa bola m , panjang tali l , dan sudut θ . Energi potensial bola dapat juga ditunjukkan dengan menggunakan besaran h_o dan h_l .
- I.4. Dari data pengamatan, hitunglah kecepatan awal bola pertama pada saat mengenai bola kedua.
- I.5. Dengan mengamati simpangan bola setelah tumbukan, dapat diperkirakan kecepatan bola pertama setelah bertumbukan. Untuk menjawab pertanyaan ini, anda dapat melakukan pendekatan. Jelaskan pendekatan apa yang anda lakukan ! Penentuan simpangan diukur dari titik pusat massa sistem benda (untuk dua bola bersentuhan, titik pusatnya di titik singgung kedua bola, untuk tiga bola titik pusatnya terletak di titik pusat bola kedua). Gambar dari dua bola yang disimpangkan ditunjukkan pada Gambar 3.
- I.6. Ukur simpangan bola 5 setelah tumbukan dan perkirakan kecepatan bola itu setelah tumbukan.
- I.7. Ulangi set pengamatan (dari langkah 2 – 7), minimum untuk 5 nilai simpangan yang berbeda dan buat tabel pengamatannya.
- I.8. Ulangi eksperimen dengan bola yang diangkat berturut-turut adalah dua bola, tiga bola, dan empat bola. Catat hasil pengamatan anda dalam tabel sebelumnya (langkah 7) minimum sebanyak 3 nilai simpangan berbeda.
- I.9. Dari hasil pengamatan ini tentukan koefisien restitusi secara pendekatan dari setiap tumbukan. Berikan penjelasan secara kualitatif saja (anda tidak perlu perhitungan!).



II. Tumbukan Berulang

- II.1. Beri simpangan bola pertama sejauh s_l pada ketinggian h_1 sehingga ada beda ketinggian sebesar $h = h_1 - h_o$, dibandingkan saat bola pada saat diam h_o . Nyatakan kecepatan awal bola secara analitik (dalam bentuk persamaan) dengan menganggap

pada saat kondisi ini terjadi hukum kekekalan energi dan hitung kecepatan awal bola pada saat bertumbukan.

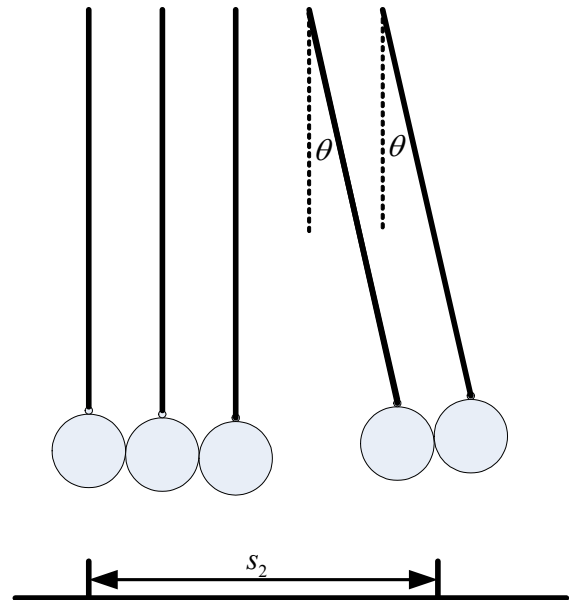
- II.2. Saat terjadi tumbukan, hukum kekekalan energi tidak berlaku lagi sedangkan hukum kekekalan momentum dianggap berlaku. Tunjukkan bahwa kecepatan akhir bola-bola itu setelah terjadi tumbukan inelastik adalah sebesar $v_{akhir} = \frac{1}{5} v_o$

- II.3. Lakukan eksperimen untuk berbagai ketinggian bola $h = h_1 - h_o$, dan catat berapa banyak bunyi “tik”, ulangi lagi untuk ketinggian yang sama minimum sebanyak 3 (tiga) kali pengamatan. Lakukan lagi untuk ketinggian yang lain, minimum sebanyak 10 nilai ketinggian. Buat tabel pengamatan.

- II.4. Untuk satu bunyi “tik” akan terjadi 4 kali tumbukan. Anggap koefisien restitusi antar bola sama yaitu sebesar e . Dengan memanfaatkan hukum kekekalan momentum, tunjukkan bahwa kecepatan bola terakhir setelah 1 kali bunyi “tik” adalah $v_{tik} = v_o \left(\frac{1+e}{2} \right)^4$

- II.5. Tunjukkan bahwa setelah terjadi tumbukan inelastik berlaku $v_{ntik} = v_o \left(\frac{1+e}{2} \right)^{4n}$, dengan n adalah jumlah bunyi “tik” sampai semua bola bergerak bersama-sama.

- II.6. Hitung koefisien restitusi dari bola ini berdasarkan grafik hubungan antara $\log v_o$ versus n , yaitu dengan cara menghitung gradien kurva dari grafik tersebut.



Gambar 3. Permukaan meja

III. Tumbukan Inelastik Sempurna

- III.1. Pada saat terjadi ayunan inelastik sempurna. Ayunan ini boleh dianggap sebagai ayunan matematis dengan perioda osilasi sebesar:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

T , l dan g masing-masing adalah perioda ayunan, panjang tali dan gravitasi bumi. Buktikanlah persamaan ini.

- III.2. Tentukan panjang tali l . Jelaskan cara anda dalam menentukan panjang tali tsb.
- III.3. Rentangkan 1 bola seperti pada eksperimen tumbukan berulang sampai terjadi tumbukan inelastik sempurna. Ukur waktu untuk 10 perioda. Ulangi lagi percobaan ini paling tidak 3 kali. Dari 3 kali pengulangan, tentukan perioda rata-ratanya. Tulis hasil perhitungan anda dalam tabel yang tersedia.
- III.4. Ulangi langkah III.3 untuk 2 bola, 3 bola dan 4 bola yang direntangkan. Tulis hasil pengamatan dan perhitungan anda dalam tabel yang tersedia.
- III.5. Hitung percepatan gravitasi berdasarkan eksperimen ini.

Selamat Berkompetisi !!!

JAWABAN EKSPERIMEN AYUNAN NEWTON

No	Jawaban	Bobot
I	Tumbukan Tunggal	6,5
I.1	$\theta_1 = 30^\circ$, $h_1 = 4,9$ cm, $h_o = 3,0$ cm	0,5
I.2	<p>Untuk satu bola yang direntangkan: akan menumbuk bola kedua, momentum bola pertama ditransfer ke bola kedua. Setelah tumbukan kecepatan bola pertama relatif diam. Momentum dari bola kedua setelah tumbukan diberikan ke bola ketiga. Setelah tumbukan kecepatan bola kedua relatif tidak bergerak. Begitu seterusnya hingga akhirnya momentum bola keempat diberikan ke bola kelima, sehingga bola kelima akan terpental yang ketinggiannya kurang-lebih sama dengan ketinggian bola pertama kali direntangkan. Hal ini ditunjukkan dengan bahwa hukum kekekalan energi bisa digunakan.</p> <p>Untuk dua bola yang direntangkan: memiliki energi potensial, setelah dilepas, pada saat menumbuk momentumnya ditransfer ke tiga bola yang tadinya diam. Bola ketiga akan mentransfer momentumnya ke bola empat dan lima sehingga terpantul secara bersamaan dengan ketinggian yang relatif sama dengan rentangan kedua bola mula-mula.</p> <p>Untuk tiga bola yang direntangkan: idem dengan hasil sebelumnya, hanya yang terpental 3 buah bola, juga dengan rentangan yang sama dengan kondisi mula-mula.</p> <p>Untuk empat bola yang direntangkan: idem dengan hasil sebelumnya dan yang terpantul juga 4 buah bola.</p>	0,5
I.3	<p>Energi potensial bola pertama adalah $E_p = mg(h_1 - h_o)$</p> <p>Dapat juga menggunakan $E_p = mgl(1 - \cos\theta)$, dengan $l = \sqrt{p^2 - \frac{1}{4}h^2}$ dan p : panjang tali dari ujung penumpu ke bola, h: jarak antar penumpu.</p>	0,5
I.4	Kecepatan awal bola pertama pada saat menumbuk bola kedua adalah $v_o = \sqrt{2g(h_1 - h_o)} = 0,61$ m/s	0,5
I.5	Simpangan bola pertama setelah tumbukan, $s_1' = 0$ cm, Kecepatan bola pertama setelah tumbukan, $v_1' = 0$ m/s.	0,5

	Pendekatan yang digunakan adalah hukum kekekalan energi.	
I.6	a. Simpangan masing-masing bola setelah tumbukan adalah $s_1' = 0,1$ cm., $s_2' = 0,1$ cm., $s_3' = 0,1$ cm., $s_4' = 0,1$ cm., dan $s_5' = 7,0$ cm. Sebagai pendekatan $s_1' = s_2' = s_3' = s_4'$ $s_1' \approx s_2' \approx s_3' \approx s_4' \approx 0$ m/s	0,5
	b. Sehingga setelah tumbukan kecepatan bola kedua, ketiga, keempat dan kelima adalah $v_2' = 0$ m/s., $v_3' = 0$ m/s., $v_4' = 0$ m/s., $v_5' = 0,61$ m/s	0,5
	c. Pendekatan yang digunakan adalah hukum kekekalan energi.	0,5

I.7	Tabel pengamatan:		1,5																																																												
	Ketinggian bola dalam keadaan istirahat $h_o = 1,5$ mm																																																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>Jumlah bola yg diangkat</th> <th>s_1</th> <th>s_5'</th> <th>Keterangan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td><i>Bola terakhir saja yang terpental</i></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>6,0</td> <td>6,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>7,0</td> <td>7,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> <td>8,0</td> <td>8,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>9,0</td> <td>9,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>2</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td><i>Dua bola terakhir yang terpental</i></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>2</td> <td>6,0</td> <td>6,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>2</td> <td>8,0</td> <td>8,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>3</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td><i>Tiga bola terakhir yang terpental</i></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>3</td> <td>6,0</td> <td>6,0</td> <td>Idem</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>3</td> <td>7,0</td> <td>7,0</td> <td>Idem</td> </tr> </tbody> </table>			No	Jumlah bola yg diangkat	s_1	s_5'	Keterangan	1	1	5,0	5,0	<i>Bola terakhir saja yang terpental</i>	2	1	6,0	6,0	Idem	3	1	7,0	7,0	Idem	4	1	8,0	8,0	Idem	5	1	9,0	9,0	Idem	6	2	5,0	5,0	<i>Dua bola terakhir yang terpental</i>	7	2	6,0	6,0	Idem	8	2	8,0	8,0	Idem	9	3	5,0	5,0	<i>Tiga bola terakhir yang terpental</i>	10	3	6,0	6,0	Idem	11	3	7,0	7,0	Idem
	No			Jumlah bola yg diangkat	s_1	s_5'	Keterangan																																																								
	1			1	5,0	5,0	<i>Bola terakhir saja yang terpental</i>																																																								
	2			1	6,0	6,0	Idem																																																								
	3			1	7,0	7,0	Idem																																																								
	4			1	8,0	8,0	Idem																																																								
	5			1	9,0	9,0	Idem																																																								
	6			2	5,0	5,0	<i>Dua bola terakhir yang terpental</i>																																																								
	7			2	6,0	6,0	Idem																																																								
	8			2	8,0	8,0	Idem																																																								
9	3	5,0	5,0	<i>Tiga bola terakhir yang terpental</i>																																																											
10	3	6,0	6,0	Idem																																																											
11	3	7,0	7,0	Idem																																																											

		12	3			Idem	
		13	4	5,0	5,0	<i>Empat bola terakhir yang terpental</i>	
		14	4	6,0	6,0	Idem	
		15	4	7,0	7,0	Idem	
I.8	a. Koefisien restitusi dari setiap tumbukan adalah $e \approx 1$.						0,5
	b. Alasannya dari hasil eksperimen itu simpangan bola yang terakhir sama dengan simpangan bola yang diberikan pertama kali. Sehingga tumbukan ini hukum kekekalan energi dapat digunakan, atau tumbukannya hampir lenting sempurna.						0,5
II	Tumbukan Berulang						9,0
II.1	a. $h_1 = 60 \text{ mm}$, $h_o = 30 \text{ mm}$, $h = h_1 - h_2 = 30 \text{ mm}$						0,5
	b. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi, maka kecepatan awal bola pada saat menumbuk adalah: $v_o = \sqrt{2g(h_1 - h_o)}$.						0,5
	c. Secara numerik kecepatan awal bola adalah 0,77 m/s						0,5
II.2	Bukti $v_{akhir} = \frac{1}{5}v_o$ diperoleh dari hukum kekekalan momentum. Momentum mula-mula $p_o = m_o v_o$, setelah kelima bola bergerak bersama-sama momentumnya menjadi $p_{akhir} = 5m v_{akhir}$. Sehingga $v_{akhir} = \frac{1}{5}v_o$						1,0

II.3	<p>Tabel Pengamatan</p> <table border="1" data-bbox="347 510 1297 1261"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>$h(m)$</th> <th>v_o</th> <th>$\log v_o$</th> <th colspan="3">n (jumlah bunyi tik)</th> <th>\bar{n}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,0031</td> <td>0,248</td> <td>-0,61</td> <td>25</td> <td>27</td> <td>28</td> <td>26,7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,0043</td> <td>0,290</td> <td>-0,54</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>31</td> <td>30,3</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,0056</td> <td>0,332</td> <td>-0,48</td> <td>34</td> <td>34</td> <td>35</td> <td>34,3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,0089</td> <td>0,418</td> <td>-0,38</td> <td>36</td> <td>38</td> <td>38</td> <td>37,3</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0,0108</td> <td>0,461</td> <td>-0,34</td> <td>42</td> <td>43</td> <td>44</td> <td>43,0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0,0130</td> <td>0,505</td> <td>-0,30</td> <td>45</td> <td>47</td> <td>47</td> <td>46,3</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,0180</td> <td>0,594</td> <td>-0,23</td> <td>48</td> <td>49</td> <td>49</td> <td>48,7</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0,0241</td> <td>0,687</td> <td>-0,16</td> <td>51</td> <td>53</td> <td>53</td> <td>52,3</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>0,0313</td> <td>0,783</td> <td>-0,11</td> <td>56</td> <td>57</td> <td>58</td> <td>57,0</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0,0400</td> <td>0,885</td> <td>-0,05</td> <td>62</td> <td>63</td> <td>63</td> <td>62,7</td> </tr> </tbody> </table>	No.	$h(m)$	v_o	$\log v_o$	n (jumlah bunyi tik)			\bar{n}	1	0,0031	0,248	-0,61	25	27	28	26,7	2	0,0043	0,290	-0,54	30	30	31	30,3	3	0,0056	0,332	-0,48	34	34	35	34,3	4	0,0089	0,418	-0,38	36	38	38	37,3	5	0,0108	0,461	-0,34	42	43	44	43,0	6	0,0130	0,505	-0,30	45	47	47	46,3	7	0,0180	0,594	-0,23	48	49	49	48,7	8	0,0241	0,687	-0,16	51	53	53	52,3	9	0,0313	0,783	-0,11	56	57	58	57,0	10	0,0400	0,885	-0,05	62	63	63	62,7	1,5
No.	$h(m)$	v_o	$\log v_o$	n (jumlah bunyi tik)			\bar{n}																																																																																			
1	0,0031	0,248	-0,61	25	27	28	26,7																																																																																			
2	0,0043	0,290	-0,54	30	30	31	30,3																																																																																			
3	0,0056	0,332	-0,48	34	34	35	34,3																																																																																			
4	0,0089	0,418	-0,38	36	38	38	37,3																																																																																			
5	0,0108	0,461	-0,34	42	43	44	43,0																																																																																			
6	0,0130	0,505	-0,30	45	47	47	46,3																																																																																			
7	0,0180	0,594	-0,23	48	49	49	48,7																																																																																			
8	0,0241	0,687	-0,16	51	53	53	52,3																																																																																			
9	0,0313	0,783	-0,11	56	57	58	57,0																																																																																			
10	0,0400	0,885	-0,05	62	63	63	62,7																																																																																			
II.4	<p>Bukti $v_{\text{tik}} = v_o \left(\frac{1+e}{2} \right)^4$</p> <p>Hukum kekekalan momentum untuk bola pertama dan bola kedua berlaku: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ menjadi $v_1 + v_2 = v_1' + v_2'$, karena massa bola sama</p> <p>Sedangkan dari koefisien restitusi $e = -\frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)}$ atau $e(v_2 - v_1) = -(v_2' - v_1')$, sehingga $v_1' = v_2' + e(v_2 - v_1)$</p> <p>Dari pers. $v_1 + v_2 = v_1' + v_2'$ diubah menjadi $v_1 + v_2 = v_2' + e(v_2 - v_1) + v_2' =$ $v_1 + v_2 = 2v_2' + e(v_2 - v_1)$, sehingga $v_2' = \frac{v_1 + v_2 - e(v_2 - v_1)}{2}$.</p> <p>Dalam eksperimen ini kecepatan bola kedua $v_2 = 0$, sehingga $v_2' = \frac{v_1(1+e)}{2}$,</p>	1,5																																																																																								

	<p>sedangkan untuk 1 kali bunyi tik terjadi 4 kali tumbukan sehingga $v_{\text{tik}} = v_1 \left(\frac{1+e}{2}\right)^4$ sedangkan kecepatan bola pertama pada saat menyentuh bola kedua tidak lain adalah kecepatan awal bola yaitu $v_1 = v_o \rightarrow v_{\text{tik}} = v_o \left(\frac{1+e}{2}\right)^4$ terbukti.</p>																			
<p>II.5</p>	<p>Bukti $v_{\text{ntik}} = v_o \left(\frac{1+e}{2}\right)^{4n}$</p> <p>Sampai terjadi tumbukan inelastik sempurna terdengar bunyi sebanyak n tik, sehingga $v_{\text{ntik}} = v_o \left(\frac{1+e}{2}\right)^{4n}$</p>	<p>1,0</p>																		
<p>II.6</p>	<p>a. Grafik $\log v_o$ versus n</p> <p>Pers. $v_{\text{ntik}} = v_o \left(\frac{1+e}{2}\right)^{4n}$ diubah menjadi $\log(v_o) = \log(v_{\text{ntik}}) - 4n \log\left(\frac{1+e}{2}\right)$, sehingga gradien kurvanya adalah $-4 \log\left(\frac{1+e}{2}\right) = 4 \log\left(\frac{2}{1+e}\right)$</p> <div data-bbox="331 1234 1337 1839" data-label="Figure"> <table border="1"> <caption>Data points from the log vo vs n graph</caption> <thead> <tr> <th>n</th> <th>log vo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>25</td><td>-0.61</td></tr> <tr><td>30</td><td>-0.54</td></tr> <tr><td>35</td><td>-0.48</td></tr> <tr><td>40</td><td>-0.38</td></tr> <tr><td>45</td><td>-0.34</td></tr> <tr><td>50</td><td>-0.24</td></tr> <tr><td>55</td><td>-0.17</td></tr> <tr><td>60</td><td>-0.11</td></tr> </tbody> </table> </div> <p>b. Koefisien restitusi = 0,98</p>	n	log vo	25	-0.61	30	-0.54	35	-0.48	40	-0.38	45	-0.34	50	-0.24	55	-0.17	60	-0.11	<p>1,0 1,5</p>
n	log vo																			
25	-0.61																			
30	-0.54																			
35	-0.48																			
40	-0.38																			
45	-0.34																			
50	-0.24																			
55	-0.17																			
60	-0.11																			

	Dihitung dari gradien kurva $4 \log\left(\frac{2}{1+e}\right) = 0,0157$																															
III	Tumbukan inelastik sempurna	4,5																														
III.1	<p>Bukti $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$</p> <p>Karena dianggap gerak harmonik sederhana, maka bandul itu memiliki gaya pulih sebesar $F_p = -mg \sin \theta$. Gunakan pendekatan $\sin \theta = \frac{x}{l}$, sehingga</p> $m \frac{d^2x}{dt^2} + mg \frac{x}{l} = 0$ <p>dari persamaan ini frekuensinya adalah $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, sehingga</p> $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$	1,0																														
III.2	<p>a. Panjang tali l adalah 14,1 cm</p> <p>b. Cara menentukan panjang tali l dengan mengukur jarak dari pusat bola sampai ke garis hubung kedua tali, atau gunakan persamaan $l = \sqrt{p^2 - \frac{1}{4}h^2}$ dengan $p = 15,0$ cm, $h = 10,0$ cm, sehingga $l = 14,1$ cm</p>	0,5 0,5																														
III.3	Tabel pengamatan, perhitungan perioda dan gravitasi bumi	1,5																														
III.4	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Jumlah bola yang direntangkan</th> <th>10 T</th> <th>10 T</th> <th>10 T</th> <th>\bar{T}</th> <th>g</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6,75</td> <td>6,75</td> <td>6,78</td> <td>0,676</td> <td>12,1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6,66</td> <td>6,72</td> <td>6,82</td> <td>0,673</td> <td>12,2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>6,75</td> <td>6,75</td> <td>6,71</td> <td>0,674</td> <td>12,2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>6,78</td> <td>6,78</td> <td>6,81</td> <td>0,679</td> <td>12,0</td> </tr> </tbody> </table>	Jumlah bola yang direntangkan	10 T	10 T	10 T	\bar{T}	g	1	6,75	6,75	6,78	0,676	12,1	2	6,66	6,72	6,82	0,673	12,2	3	6,75	6,75	6,71	0,674	12,2	4	6,78	6,78	6,81	0,679	12,0	
Jumlah bola yang direntangkan	10 T	10 T	10 T	\bar{T}	g																											
1	6,75	6,75	6,78	0,676	12,1																											
2	6,66	6,72	6,82	0,673	12,2																											
3	6,75	6,75	6,71	0,674	12,2																											
4	6,78	6,78	6,81	0,679	12,0																											
III.5	<p>Percepatan gravitasi rata-rata, $g = 12,1 \text{ m/s}^2$</p> <p>Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan gerak harmonis sederhana tidak bisa digunakan untuk problem osilasi ini.</p>	1,0																														