1

Dinamika Rotasi Lanjut

Hubungan gerak translasi dan Rotasi

Translasi	Rotasi	Hubungan
s	θ	$s = r \cdot \theta$
v	ω	$v = \omega \cdot r$
a	α	$a = \alpha r$
m	I	$I = mr^2$
F	τ	$\tau = F \cdot r$
P	L	$L = Pr$

* rumus kinematika (percepatan konstan)

$v = v_0 + at \rightarrow \omega = \omega_0 + \alpha t$

$x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 \rightarrow \theta = \theta_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha t^2$

$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x \rightarrow \omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha \Delta\theta$

* Hukum Newton

$\Sigma F = ma \rightarrow \Sigma \tau = I \cdot \alpha$

- Energi Kinetik

$Ek = \frac{1}{2} m v^2 \rightarrow Ek = \frac{1}{2} I \omega^2$

Usaha

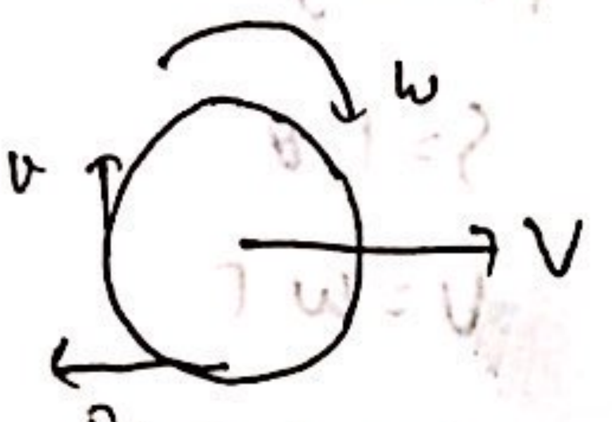
$W = F \cdot \Delta x \rightarrow W = \tau \cdot \Delta\theta$

* S
bid
Ti
mi
(a) ... meninggalkan
bidang miring
(b) Tentukan jarak horizontal yang ditempuh silinder ketika jatuh ke lantai

Dinamika Rotasi Lanjut

Gerak Menggelinding

menggelinding → translasi + rotasi (tanpa slip, dengan slip)



tanpa slip → translasi selaras dengan rotasi

$\boxed{V = \omega R}$, $\boxed{a = \alpha R}$

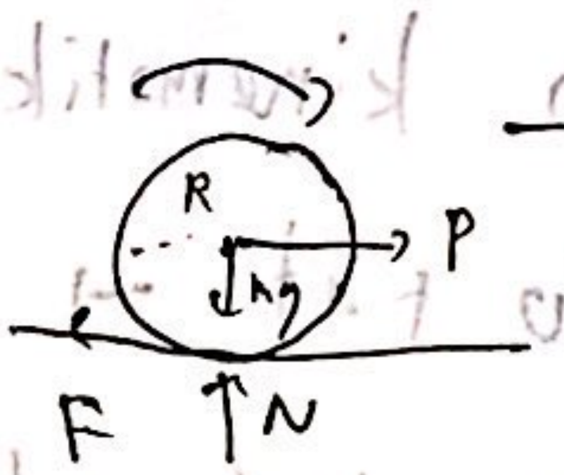
$V = \omega R$

dengan slip → $\boxed{V \neq \omega R}$

tanpa slip → gesekan statis, dengan slip → gesekan kinetis

gesekan → menyumbang torsi supaya benda muter.

bola pejal

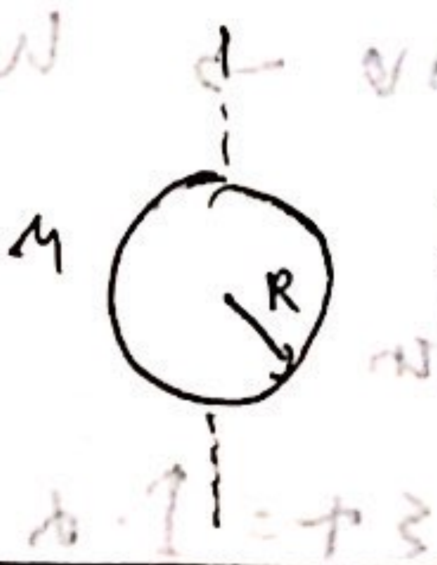


$f_s \leq \mu_s N$

$\Sigma F = ma$

$P - f = ma$

$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$



$I = \frac{2}{5} MR^2$

$f \cdot R = \left(\frac{2}{5} MR^2\right) \alpha$

$f \cdot \cancel{R} = \left(\frac{2}{5} M R^{\cancel{2}}\right) \frac{a}{\cancel{R}}$

$f = \frac{2}{5} M \cdot a$

$P - \frac{2}{5} ma = ma$

$a = \frac{5P}{7m}$

$\Sigma F = ma$

$P - f = ma$ ...(1)

$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$

$f \cdot R + P \cdot R = I \cdot \alpha$

$\cancel{R}(f + P) = \frac{2}{5} mR^{\cancel{2}} \cdot \frac{a}{\cancel{R}}$

$f + P = \frac{2}{5} ma$ ...(2)

(1) + (2)

$2P = \frac{7}{5} ma$

$\rightarrow a = \frac{10P}{7m}$

$f = -\frac{3}{7} P$ (f hanya ke kanan)

7

Q - Q $L = L'$

3

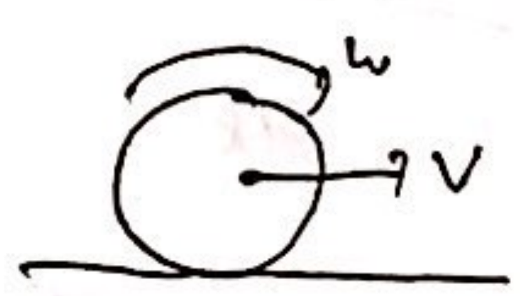
Energi Gerak Menggelinding

energi kinetik benda menggelinding :

$EK_{trans} + EK_{rot}$

bola pejal

benda slip



$EK = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$

$EK = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}\cdot\underbrace{\frac{2}{5}MR^2}\cdot\omega^2$

$V = \omega \cdot R$

$\omega = \frac{V}{R}$

$\omega^2 = \frac{V^2}{R^2}$

$I = \frac{2}{5}MR^2$

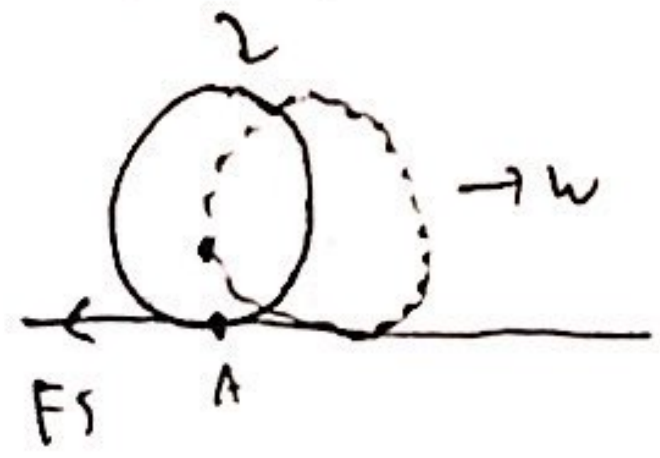
$EK = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{5}MR^2\cdot\omega^2$

$EK = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{5}MR^2\cdot\frac{V^2}{R^2}$

$EK = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{5}MV^2$

$EK = \frac{7}{10}mV^2$

+ menggelinding tanpa slip → berlaku hukum kekekalan energi mekanik



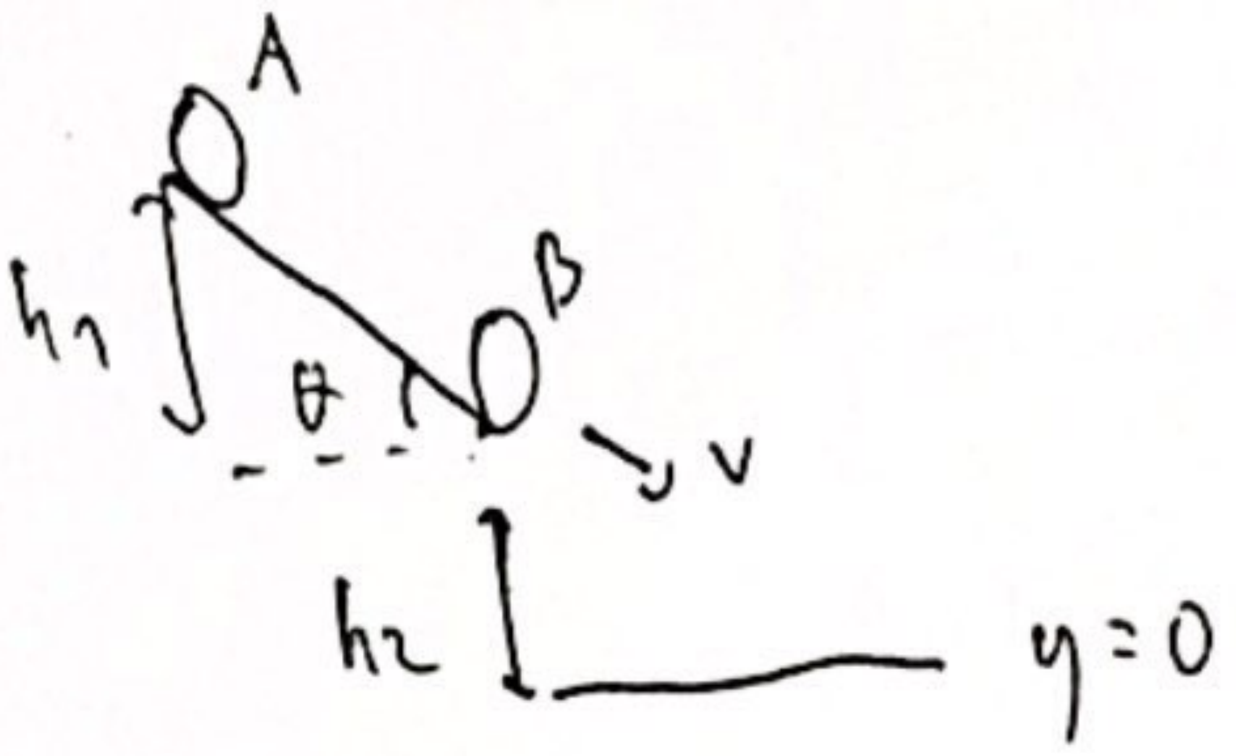
$W_f = 0$

• Sebuah silinder pejal bermassa 2 kg menggelinding tanpa slip menuruni bidang miring dari keadaan diam dengan sudut kemiringan θ ($\sin\theta = \frac{3}{5}$). seperti pada gambar. Tinggi bidang miring $h_1 = 30$ cm dan jarak dari dasar bidang miring ke lantai $h_2 = 30$ cm. ($g = 10$ m/s²)

(a) Tentukan kelajuan silinder tepat ketika akan meninggalkan bidang miring

(b) Tentukan jarak horizontal yang ditempuh silinder ketika jatuh ke lantai

9

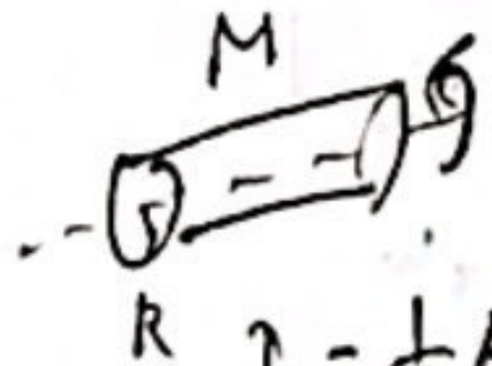


(a) tinjau titik A dan B

$Ep_A + EK_A = Ep_B + EK_B$

$mg(h_1+h_2+R) + 0 = mg(h_2+R) + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$

$mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}MR^2\right)\omega^2$



$I = \frac{1}{2}MR^2$

$mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}mR^2\right)\cdot\frac{v^2}{R^2}$

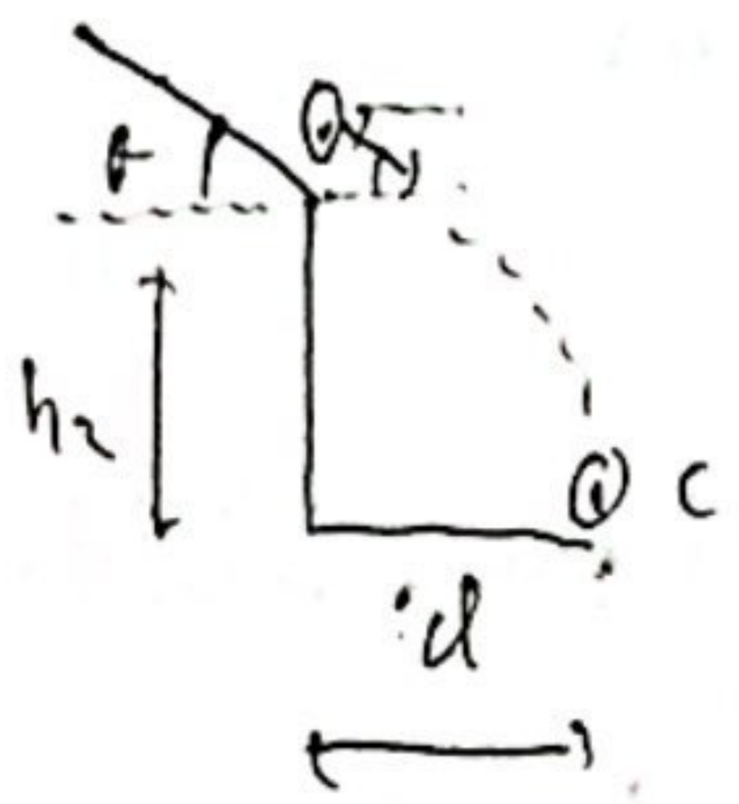
$v = \omega R$

$mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{4}mv^2$

$mgh_1 = \frac{3}{4}mv^2$

$gh_1 = \frac{3}{4}v^2$

(b) gerak parabola



$R = h_2 + R$

x: $x = x_0 + v_x t$

$d = v\cos\theta \cdot t$

y: $y = y_0 + v_{0y}\cdot t - \frac{1}{2}gt^2$

$0 = h_2 - v\sin\theta\cdot t - \frac{1}{2}gt^2$

$\frac{1}{2}gt^2 + v\sin\theta\cdot t - h_2 = 0$

$5t^2 + 1{,}2t - 0{,}3 = 0$

$t = 0{,}153$ s diperoleh $d = 24{,}9$ cm

⑦

Q_ Q L : L'

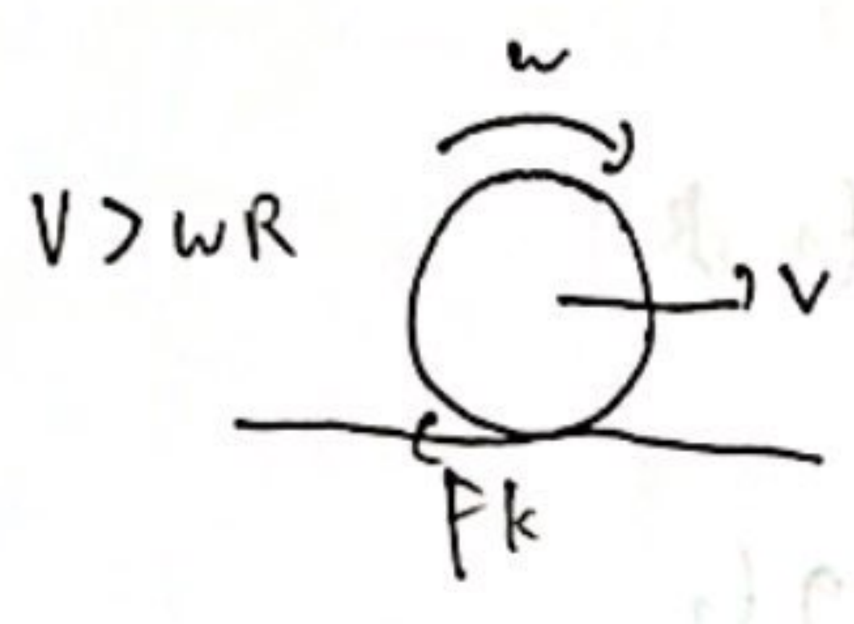
⑤

Menggelinding dengan slip

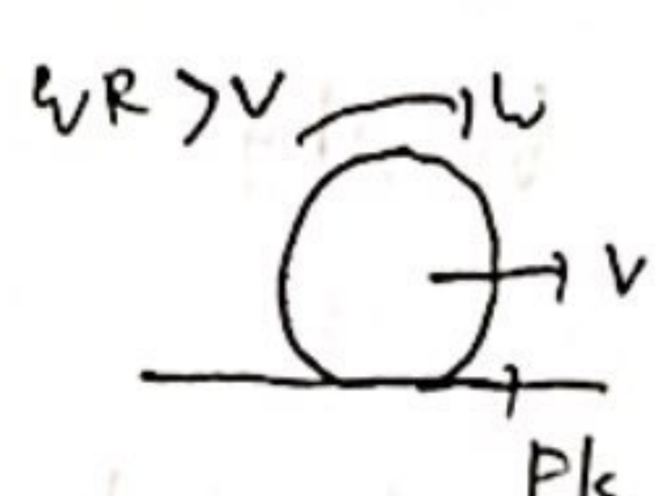
dengan slip → translasi tidak selaras dengan rotasi : $v \neq \omega R$

$a \neq \alpha R$

gaya gesek yang bekerja : kinetik $f_k = \mu_k \cdot N$



bowling

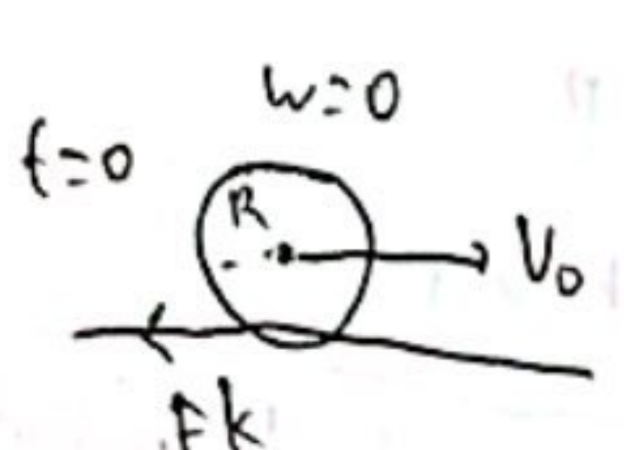


mobil

* Sebuah bola bowling (dianggap sebagai bola pejal) bermassa 7 kg dan berjari-jari 10 cm dilemparkan ke lintasan datar dengan koefisien gesek $\mu_s = 0{,}5$ dan $\mu_k = 0{,}2$. Bola dilempar dengan kecepatan awal 3,5 m/s tanpa putaran sehingga bola akan slip ($g = 10$ m/s²)

ⓐ Tentukan waktu yang diperlukan bola untuk mencapai kondisi tidak slip.

ⓑ Hitung kecepatan pusat massa dan laju sudut bola setelah mencapai kondisi tidak slip.



slip

tidak slip

ⓐ Hukum Newton

$\Sigma F = ma$

$-f_k = ma$

$-\mu_k mg = ma$

$\boxed{a = -\mu_k \cdot g}$

* $\Sigma \tau = I \cdot \alpha$

$f_k \cdot R = \frac{2}{5} M R^2 \cdot \alpha$

$f_k = \frac{2}{5} M R \alpha$

$\mu_k \cdot mg = \frac{2}{5} M R \alpha$

$\boxed{\alpha = \frac{5 \mu_k \cdot g}{2R}}$

translasi

$v = v_0 + at$

$v_1 = v_0 + a t_1$

$= v_0 (-\mu_k g) t_1$

(c)

rotasi $\rightarrow \omega = \omega_0 + \alpha \cdot t$

$\omega = \alpha t$

$$\omega_1 = \frac{5\mu_k \cdot g}{2R} t_1$$

karena udh tidak slip $\rightarrow v_1 = \omega_1 R$

$$v_0 - \mu_k g t_1 = \frac{5\mu_k \cdot g}{2\cancel{R}} t_1 \cdot \cancel{R}$$

$$v_0 = \frac{7}{2}\mu_k \cdot g\, t_1$$

$$t_1 = \frac{2v_0}{7\mu_k \cdot g}$$

$= 0{,}5$ s.

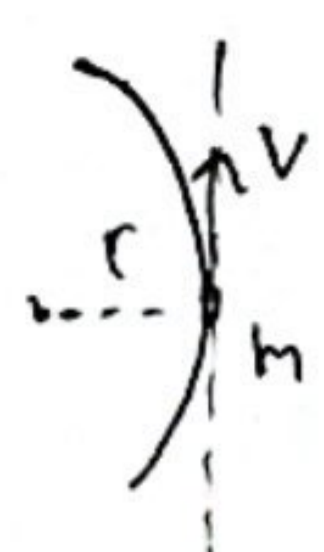
(b) $v_1 = v_0 - \mu_k g t_1$

$v_1 = 2{,}5$ m/s

$$\omega_1 = \frac{v_1}{R}$$

$= 25$ rad/s

Momentum sudut

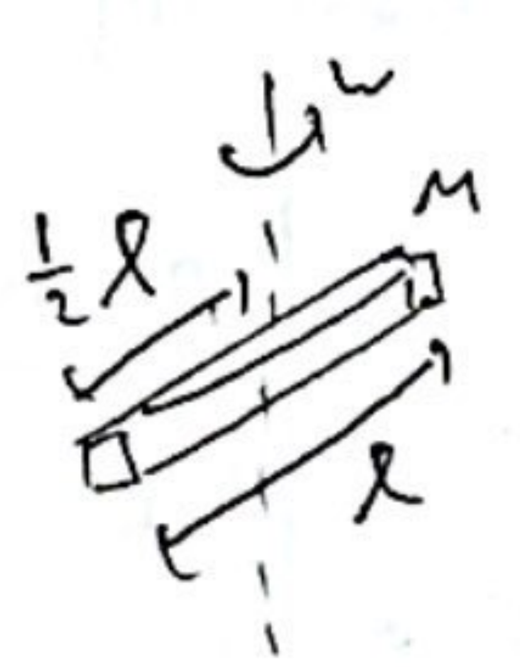


momentum linear $p = m \cdot v$

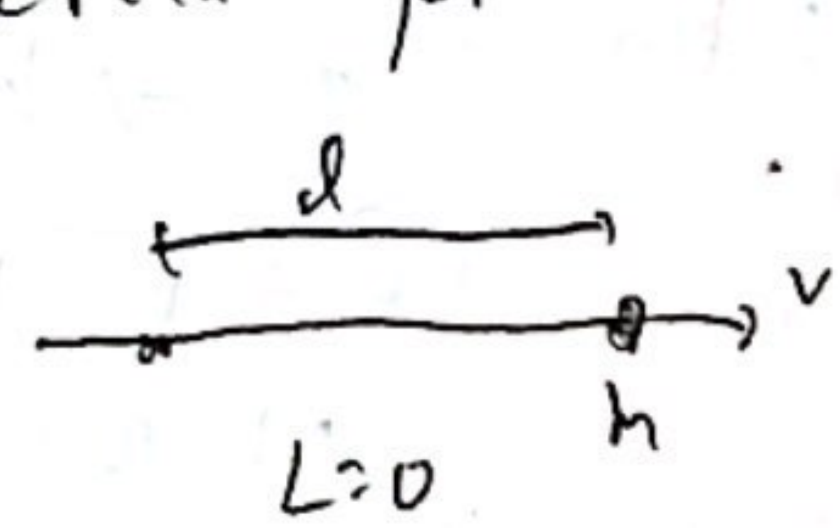
momentum sudut $L = rp$

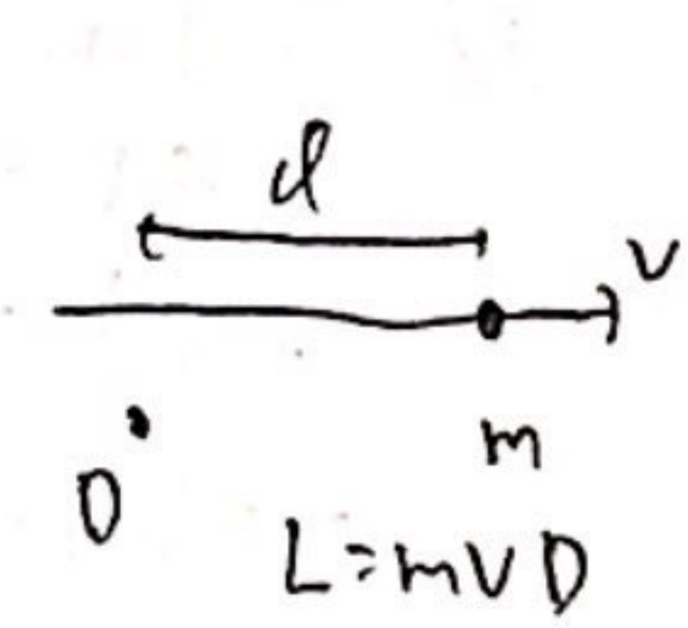
$= m \cdot v \cdot r$

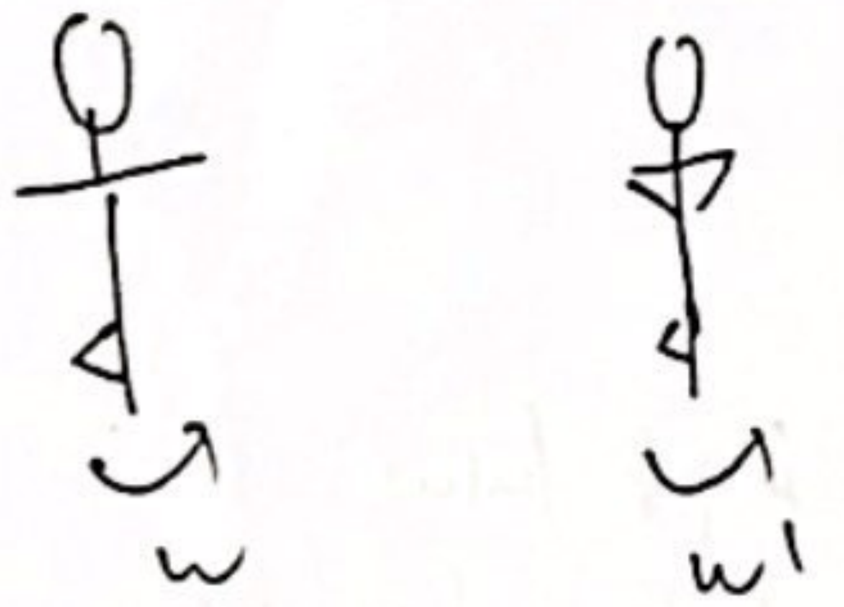
$L = I \cdot \omega$



momentum sudut terdefinisi untuk semua gerak







$L = L'$

$I \cdot \omega = I' \cdot \omega'$

$I = 2{,}5 \text{ kg m}^2$

$I' = 0{,}5 \text{ kg m}^2$

$\omega = 0{,}8$ putaran/s

$\omega' = 4$ putaran/s

* Sebuah piringan hitam (dianggap sebagai silinder pejal) berputar dengan kelajuan sudut konstan 30 rpm. Piringan memiliki massa 100 g dan jari-jari 15 cm. Suatu ketika sebuah permen karet bermassa 5 g dijatuhkan pada piringan tersebut pada jarak 10 cm dari porus putar. Jika ukuran permen karet diabaikan terhadap ukuran piringan, berapa kelajuan sudut piringan sekarang!

$I \cdot \omega = I' \cdot \omega'$

$I = \frac{1}{2} M R^2$

$I \cdot \omega = I' \omega'$

$I = \frac{1}{2} M R^2$

$= 1{,}125 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$

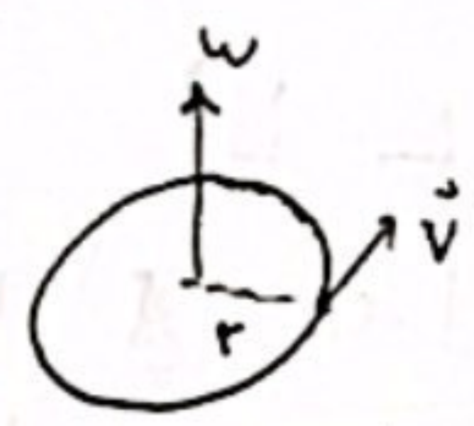
$I' = \frac{1}{2} M R^2 + m d^2$

$= 1{,}175 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$

$\omega' = \frac{I \omega}{I'}$

$= 28{,}72$ rpm

Vektor dalam Rotasi

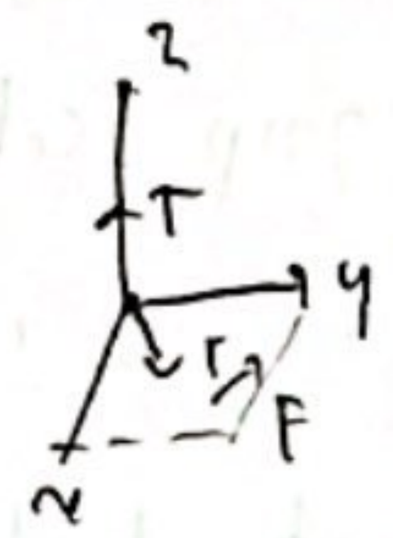


kecepatan sudut: $v = wr$

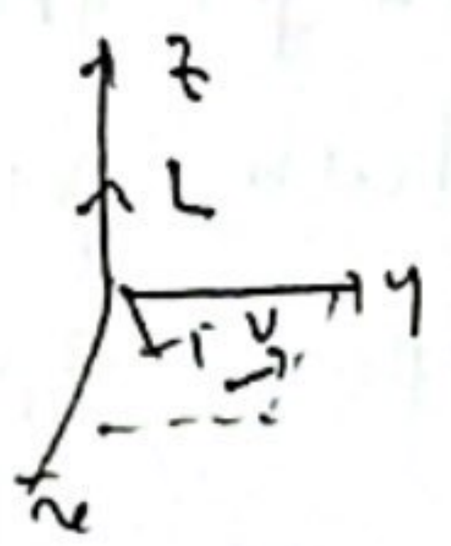
$v = w \times r$

w selalu tegak lurus dengan bidang lingkaran

• torsi secara umum $\tau = r \times F$



• momentum sudut secara umum $L = m\vec{r} \times \vec{v}$

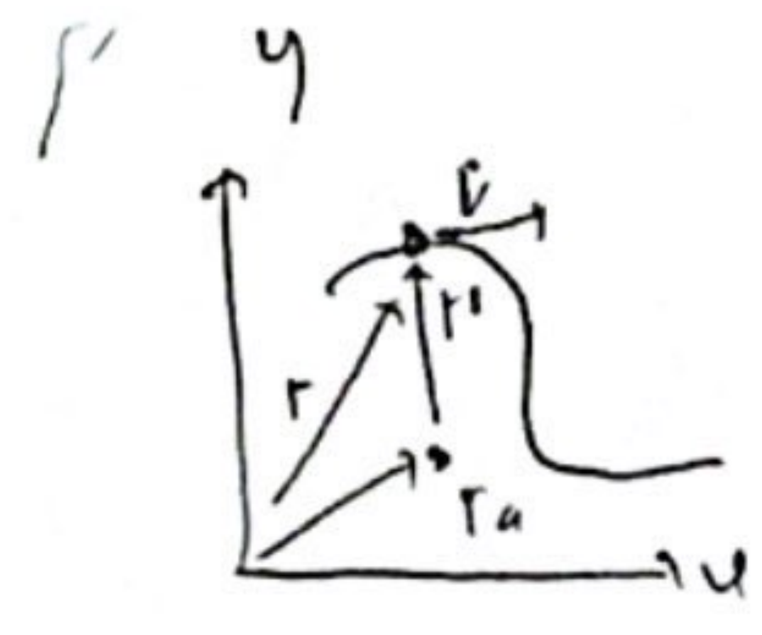


• Sebuah partikel bermassa 2 kg bergerak dalam ruang 3D dengan fungsi posisi $r(t) = 3t^2\hat{i} - 2t\hat{k}$. Pada saat $t = 2$ s, partikel dikenai gaya luar $F = (-i + j + 2k)$ N. Semua satuan dinyatakan dalam SI. Tentukan momentum sudut partikel dan torsi oleh gaya F pada partikel saat $t = 2$ s jika dipilih titik acuan di $(1,2,0)$.

jawab

$L = m r' \times v$

$\tau = r' \times F$



$r = r_a + r'$

$t = 2s \rightarrow r = 12\hat{i} - 4k$

$r_a = \hat{i} + 2\hat{j}$

$r' = 11\hat{i} - 2\hat{j} - 4k$

$v = \frac{dr}{dt}$

$= 6t\hat{i} - 2k$

$t = 2s \rightarrow v = 12\hat{i} - 2k$

$L = m r' \times v$

$$= 2 \begin{vmatrix} i & j & k \\ 11 & -2 & -4 \\ 12 & 0 & -2 \end{vmatrix}$$

$$= 2\left(i(4) - j(26) + k(24)\right)$$

$$L = 8\hat{i} - 52\hat{j} + 48\hat{k} \ kg\,m^2/s$$

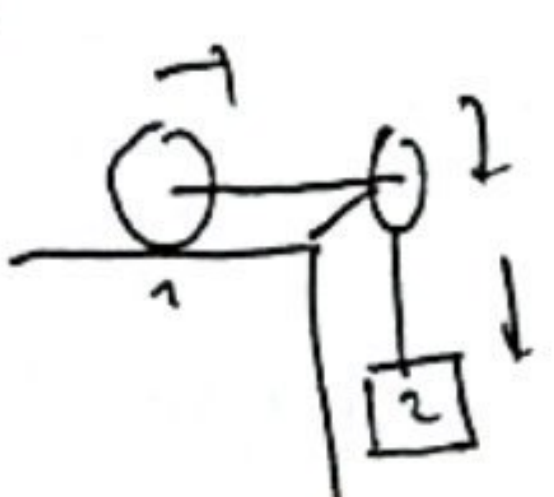
$\tau = r' \times F$

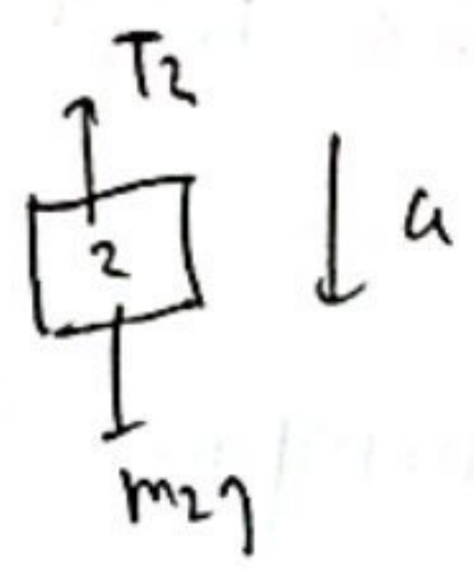
$$= \begin{vmatrix} i & j & k \\ 11 & -2 & -4 \\ -7 & 1 & 2 \end{vmatrix}$$

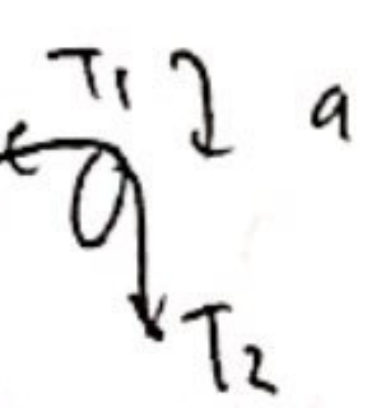
$$= i(0) - j(18) + k(7)$$

$$= -18j + 7k \ Nm$$

* Sistem benda-katrol tersusun atas balok bermassa 3 kg, silinder pejal bermassa 2 kg (jari-jari 10 cm) dan katrol bermassa 4 kg dengan jari-jari 15 cm (dianggap sebagai silinder pejal). Katrol dalam kondisi tidak slip. Begitu pula dengan silinder di permukaan datar ($g = 10\ m/s^2$). Tentukan percepatan dari sistem ini







benda 2 : $\Sigma F = ma$

$m_2 g - T_2 = m_2 a \quad \ldots (1)$

katrol $\Sigma \tau = I \cdot \alpha$

$T_2 R - T_1 R = \frac{1}{2} m_k R^2 \cdot \frac{a}{R}$

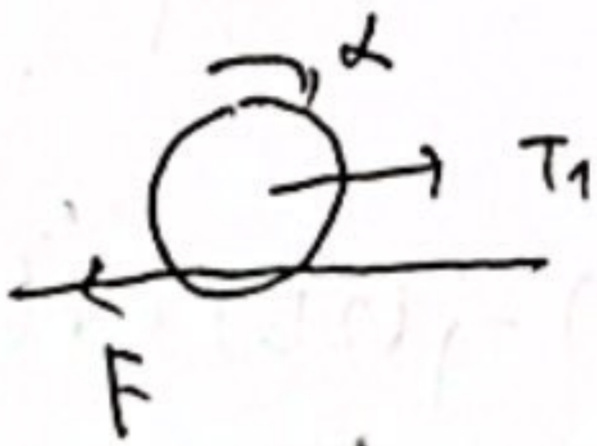
$R(T_2 - T_1) = \frac{1}{2} m_k R\, a$

Katrol

$T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_k \cdot a$ ..(1)

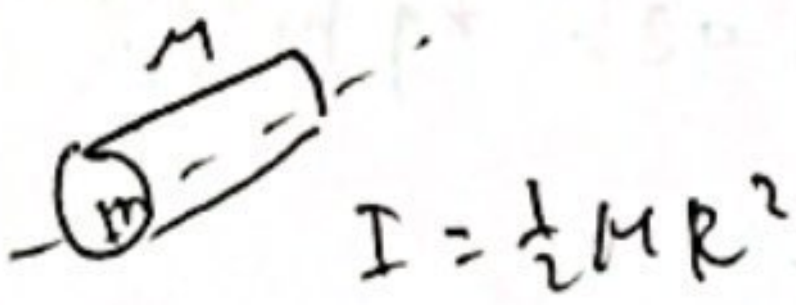
benda 1 : $\Sigma F = m a$

$T_1 - f = m_1 a$ ..(3)



$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$

$f \cdot R_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot R_1^2$



$f \cdot R_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot R_1^2 \cdot \frac{a}{R_1}$

$f = \frac{1}{2} m_1 \cdot a$ ..(4)

(4) ke (3)

$T_1 - f = m_1 a$

$T_1 - \frac{1}{2} m_1 a = m_1 a$

$T_1 = \frac{3}{2} m_1 a$ ..(5)

Substitusi (5) dan (1) ke (2) :

$T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_k a$ (1) $T_2 = m_2 a + m_2 g$

$m_2 g - m_2 a - \frac{3}{2} m_1 a = \frac{1}{2} m_k a$

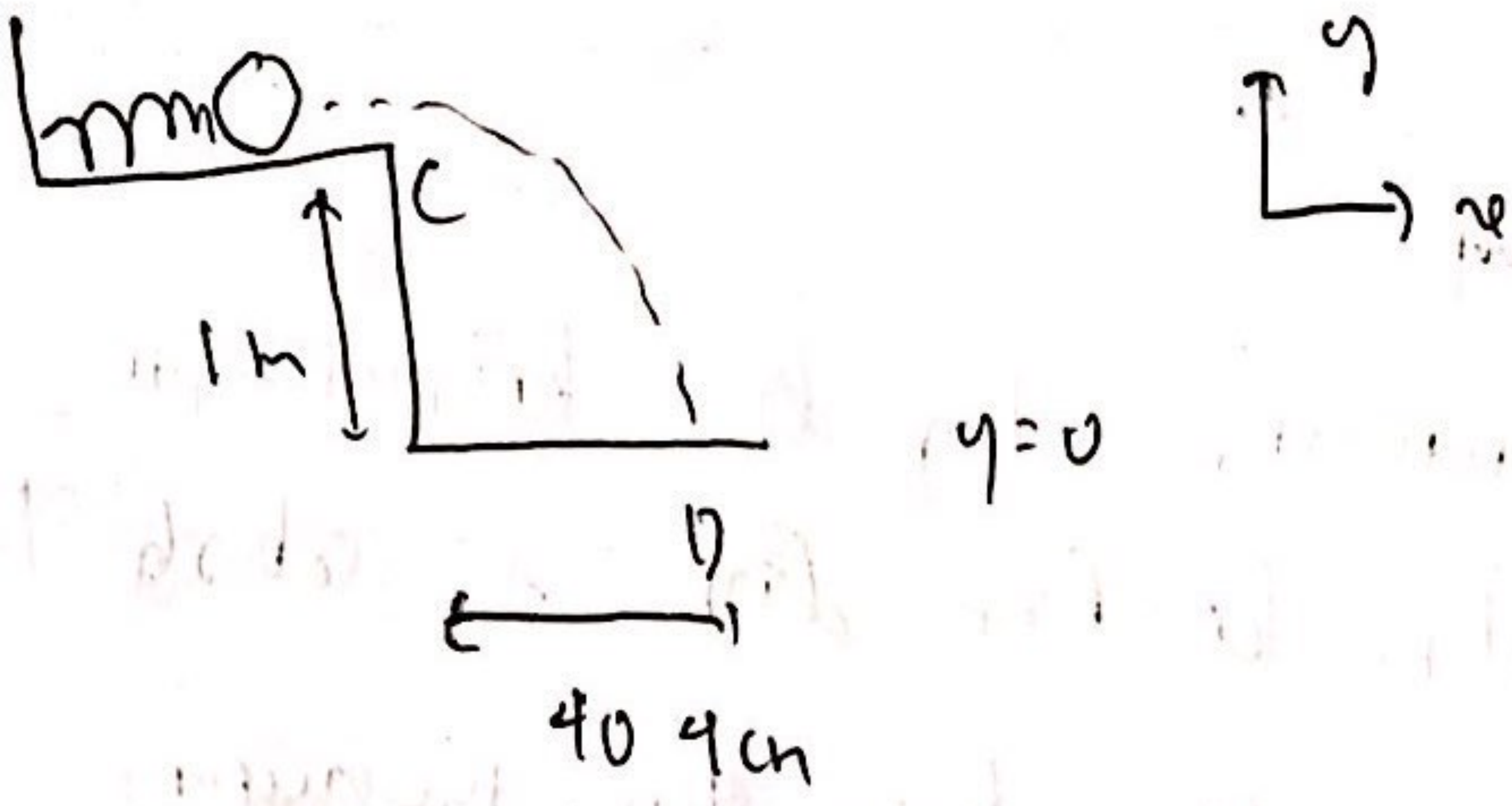
$m_2 g = (m_2 + \frac{3}{2} m_1 + \frac{1}{2} m_k) a$

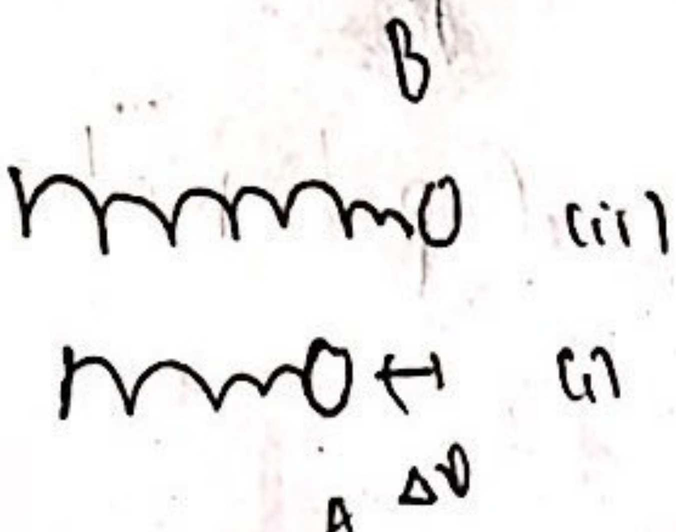
$a = 3{,}75 \ m/s^2$

Menggelinding + pegas

Sebuah benda dengan penampang lingkaran bermassa 3 kg dan berjari-jari R memiliki momen inersia yang dinyatakan sebagai $I = \gamma m R^2$ dengan γ adalah suatu konstanta. Benda ini ditekan ke pegas (k = 400 N/m) di meja sejauh 10cm. Setelah terlepas

Dari pegas, benda menggelinding tanpa slip menuju tepi meja lalu terjatuh ke lantai seperti pada gambar ($g = 10\ m/s^2$).
Hitung nilai konstanta γ





tinjau titik A dan B :

$$EP_A + EK_A = EP_B + EK_B$$

$$\frac{1}{2}k\Delta x^2 + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$\frac{1}{2}k\cdot\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}(\gamma m R^2)\cdot\omega^2$$

tidak slip

$$\frac{1}{2}k\Delta x^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\gamma m R^2\ \frac{v^2}{R}$$

$$k\cdot\Delta x^2 = mv^2 + \gamma m v^2$$

$$k\cdot\Delta x^2 = mv^2(1+\gamma)$$

$$v = \Delta x\sqrt{\frac{k}{m(1+\gamma)}}$$

tinjau titik C dan D :

• sumbu y → $y = y_0 + v_{0y}\cdot t - \frac{1}{2}gt^2$

$$0 = h + 0 - \frac{1}{2}gt^2$$

$$\frac{1}{2}gt^2 = h$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

• sumbu x → $x = x_0 + v_x\cdot t$

$$d = vt$$

$$d = v\cdot t$$

$$= \Delta x\sqrt{\frac{k}{m(1+\gamma)}}\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$d = \Delta x\sqrt{\frac{2kh}{mg(1+\gamma)}}$$

$$d^2 = \Delta x^2\cdot\frac{2kh}{mg(1+\gamma)}$$

$$\gamma = \frac{2khou^2}{mgd^2} - 1$$

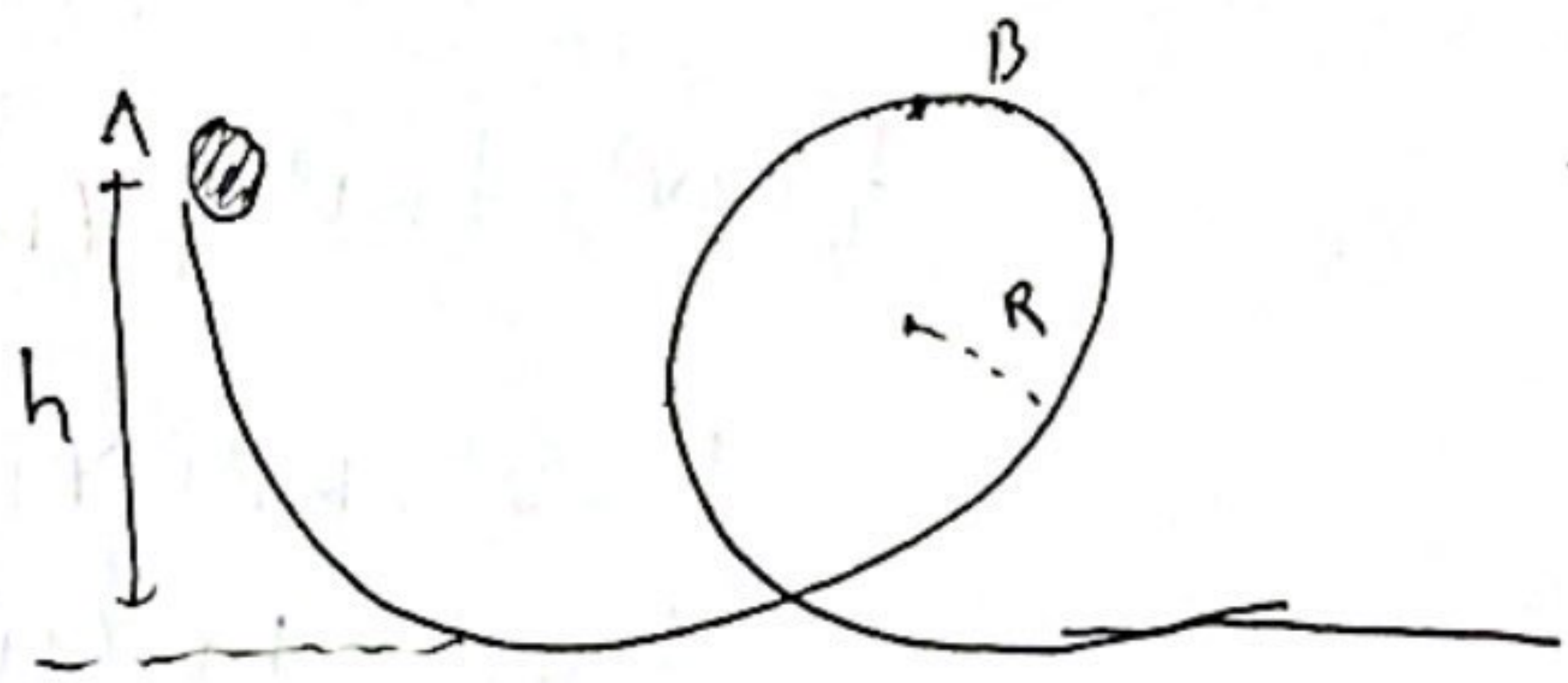
$\boxed{\gamma = \frac{2}{3}}$ → bola berongga (kulit bola)

Menggelinding pada loop.

Sebuah bola pejal bermassa 5 kg dan berjari-jari 25 cm berada pada ketinggian h dalam keadaan diam di sebuah lintasan. Bola kemudian menggelinding tanpa slip menuruni lintasan kemudian menuju loop berjari-jari 1 m ($g = 10$ m/s²)

(a) Tentukan nilai minimum h agar bola dapat melintasi loop secara keseluruhan

(b) jika nilai $h = 3$ m, cari laju bola di titik tertinggi lintasan loop.



(a) Cari kecepatan minimum di B

$$\Sigma F = m a_s \rightarrow N + mg = \frac{mv^2}{R-r}$$

kalau minimum $N = 0$

$$mg = \frac{mv^2_{min}}{R-r}$$

$$\boxed{v^2_{min} = g(R-r)}$$

13

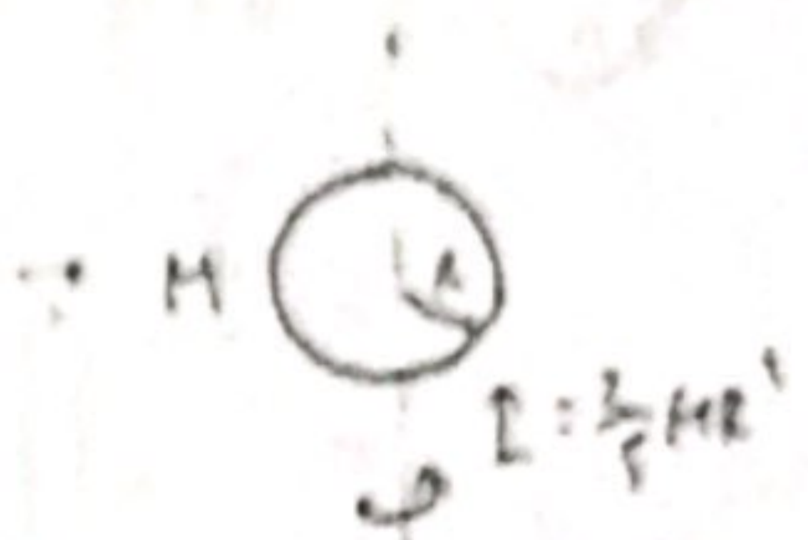
tinjau titik A dan B

$EP_A + EK_A = EP_B + EK_B$

$mg(h+r) + 0 = mg(2R-r) + \frac{1}{2} m v^2_{min} + \frac{1}{2} I \omega^2$

$\frac{2}{5} mR^2$

(bola pejal)



$mg(h+r) = mg(2R-r) + \frac{1}{2} m v^2_{min} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} mR^2 \omega^2$

$\omega^2 = \frac{v^2}{r^2}$

$mg(h+r) = mg(2R-r) + \frac{1}{2} m v^2_{min} + \frac{1}{2}\frac{2}{5} m \cancel{R^2} \cdot \frac{v^2_{min}}{r^2}$

$g(h+r) = g(2R-r) + \frac{1}{2} v^2_{min} + \frac{1}{2}\frac{2}{5} \cancel{m} \cdot v^2_{min}$

$gh + gr = 2gR - gr + \frac{7}{10} v^2_{min}$

$gh + gr = 2gR - gr + \frac{7}{10} g(R-r)$

$h_{min} + r = 2R - r + \frac{7}{10}(R-r)$

$h_{min} = \frac{27}{10}(R-r)$

$= 2{,}025 \text{ m}$

(b) $gh + gr = 2gR - gr + \frac{7}{10} v^2$

$v = \sqrt{\frac{10}{7} g(h + 2r - 2R)}$

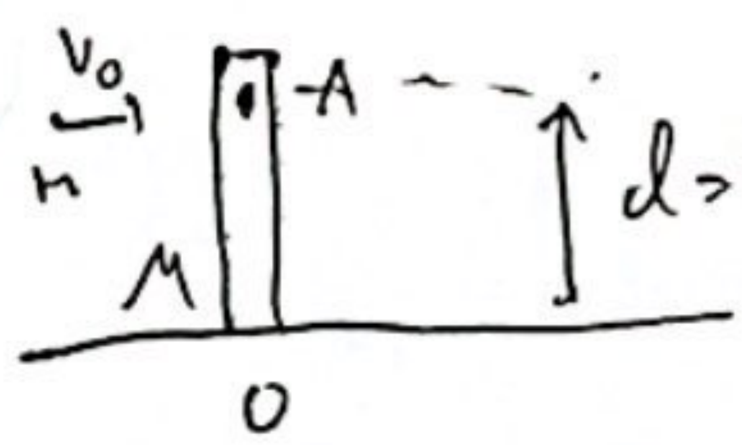
$= 4{,}63 \text{ m/s}$

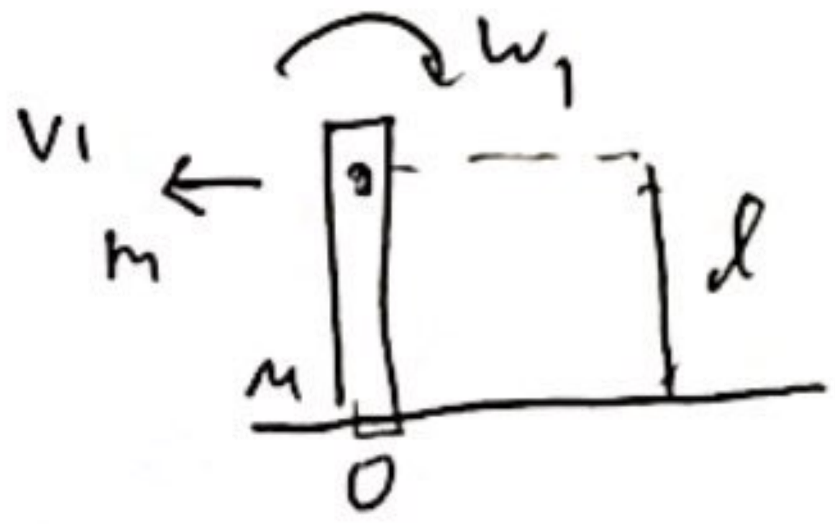
Tumbukan batang

- Bola kecil bermassa 200 g dilempar menuju tongkat 2 m bermassa 2 kg seperti gambar. Laju bola ketika menabrak titik A pada tongkat adalah 3 m/s dan setelah menabrak, bola berbalik arah dengan laju 1 m/s ($g = 10\ m/s^2$). Tongkat memiliki porus rotasi di titik O.

(a) Tentukan kelajuan sudut tongkat sesaat setelah tertabrak bola.

(b) Hitung kelajuan sudut tongkat ketika akan menyentuh tanah.

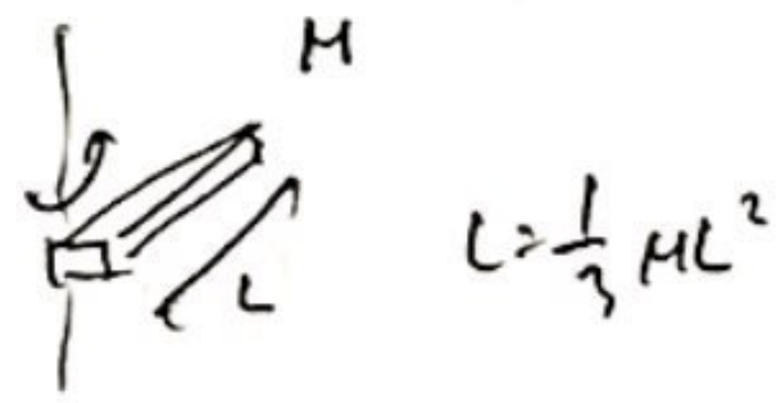




(a) Kekekalan momentum sudut total sistem

$$m v_0 \cdot d = -m v_1 d' + I w_1$$

$$m v_0 \cdot d = -m v_1 d + \left(\tfrac{1}{3} M \ell^2\right) w_1$$

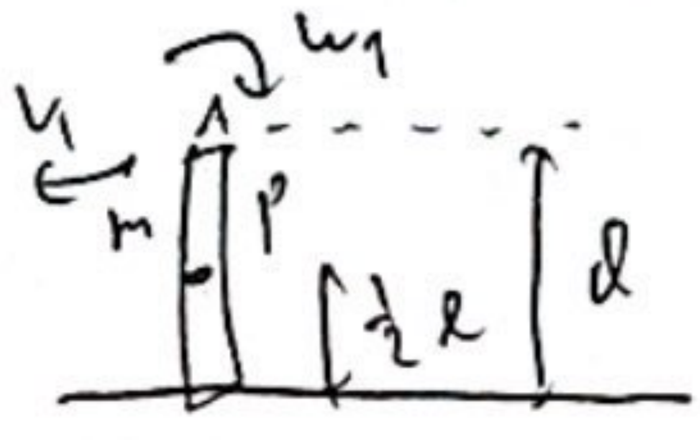


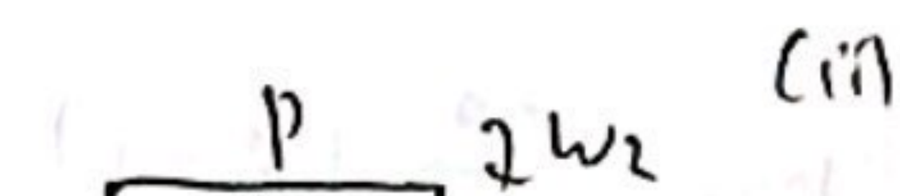
$$m d (v_0 + v_1) = \tfrac{1}{3} M \ell^2 w_1$$

$$w_1 = \frac{3 m d (v_0 + v_1)}{M \ell^2}$$

$$= 0{,}54\ rad/s$$

(b)





Kekekalan energi antara kondisi 1 dan 2

$EP_1 + EK_1 = EP_2 + EK_2 \rightarrow \cancel{\frac{Mg\ell}{2}}$

$$Ep_1 + Ek_1 = Ep_2 + Ek_2$$

$$\frac{Mgl}{2} + \frac{1}{2} I w_1^2$$

$$\frac{Mgl}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}Ml^2\right)w_1^2 = 0 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}Ml^2 w_2^2\right)$$

$$\frac{g}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}\cancel{M}l\right)w_1^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}l w_2^2\right)$$

$$g + \frac{1}{3} l w_1^2 = \frac{1}{3} l w_2^2$$

$$\boxed{w_2 = \sqrt{\frac{3g}{l} + w_1^2}} = 3{,}91 \text{ rad/s}$$

$$3g + l w_1^2 = l w_2^2$$

$$\frac{3g}{l} + w_1^2 = w_2^2$$

A. Satuan gerak melingkar

1 putaran lingkaran : 360°

1 put : 360°

1 put : 2π rad

$180^\circ = \pi$ rad

4, 8, 6

B. Analogi Gerak lurus dan melingkar

$r(t)$

$v(t) = \frac{dr(t)}{dt}$

$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$

Gerak Lurus

$\theta(t)$

$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{''}$

$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$

Gerak Melingkar

GLB

$v = \frac{x - x_0}{t}$

$x - x_0 = v.t$

GLBB

$a = \frac{v - v_0}{t}$

$v - v_0 = a.t$

$x - x_0 = v_0.t + \frac{1}{2}at^2$

$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$

GMB

$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{t}$

$\theta - \theta_0 = \omega.t$

GMBB

$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t}$

$\omega - \omega_0 = \alpha.t$

$\theta - \theta_0 = \omega_0 + \alpha.t$

$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha(\theta - \theta_0)$

Hubungan Gerak lurus dan Melingkar

Panjang lintasan

$S = \theta.R$

$V = \omega.R$

$a = \alpha.R$

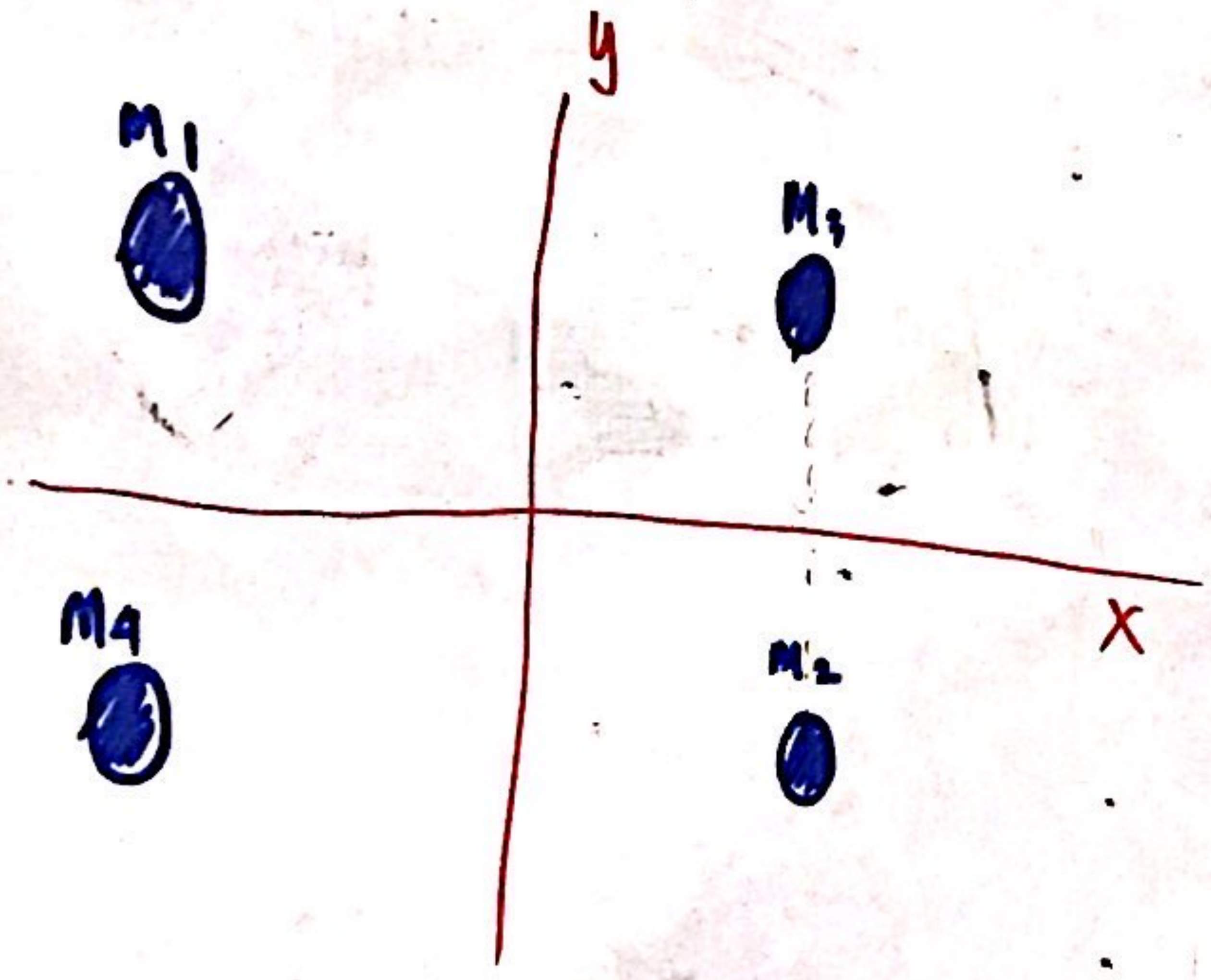
Punya Kasandr

* Pada gerak melingkar terdapat percepatan tambahan, yaitu Percepatan sentripetal yang arahnya ke pusat lingkaran

$a_{sp} = \frac{v^2}{R} = \omega^2.R$

C. Inersia benda

Inersia benda titik



Inersia benda jika diputar pada suatu sumbu putar

$$I = \sum_{i=1}^{n} M_i r_i^2$$

$$I = M_1 r_1^2 + M_2 r_2^2 + M_3 r_3^2 + \dots$$

* jika sumbu bergeser

$$I = I_{awal} + M d^2$$

* hubungan antar sumbu

$$I_z = I_y + I_x$$

Inersia benda

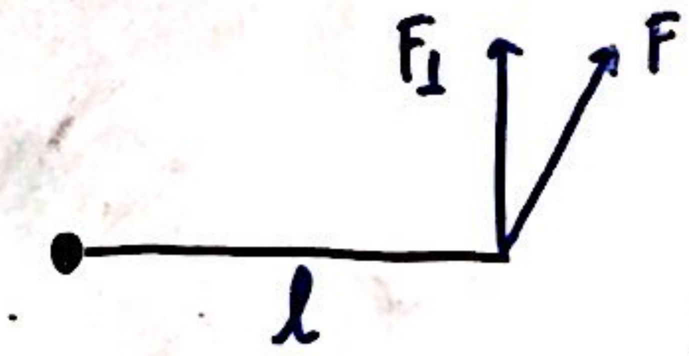
$$I = \int r^2 \, dm$$

D. Torsi

$$\vec{\tau} = \vec{F} \times \vec{r}$$

$$|\vec{\tau}| = |\vec{F}||\vec{r}| \sin\alpha$$

$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}||\vec{B}| \sin\alpha$



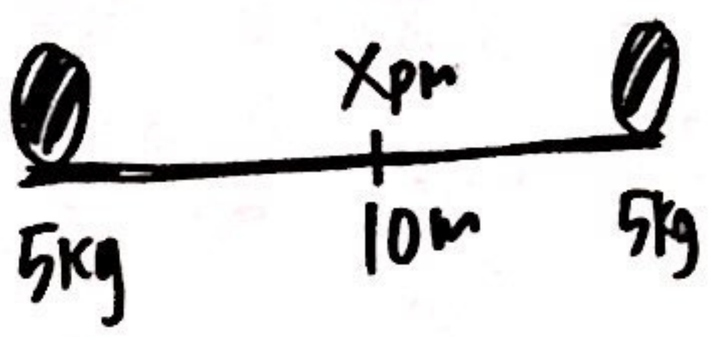
$$\tau = F_1 . l$$

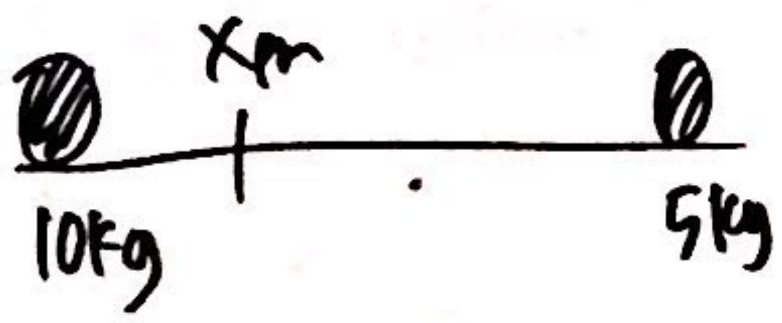
Hukum 1 Newton

$$\Sigma \tau = 0$$

Hukum 2 Newton

$$\Sigma \tau = I . \alpha$$





$$X_{pm} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}$$

$$X_{pm} = \frac{V_1x_1 + V_2x_2 + V_3x_3 + \dots}{V_1 + V_2 + V_3}$$

$$X_{pm} = \frac{A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}$$

Y_{pm} ...

V_{pm} ...

a_{pm} —

a) $V_{pm} = 0$

$$V_{pm} = \frac{m_1V_1 + m_2V_2}{m_1 + m_2}$$

$m_1V_1 + m_2V_2 = 0$

$\cancel{m_1}V_1 = -\cancel{m_2}V_2$

$V_1 = -V_2$ ~> arah kec berlawanan

(ac, bc, cd)

b). $V_{pm} = 0$, $X_{pm} = 0$, $y_{pm} = 0$

$V_1 = -V_2$

$X_1 = -X_2$ (bc)

$y_1 = -y_2$

c) $V_{pm} \neq 0$,

$V_1 = V_2$ kecepatan searah

ab, bd, ad