

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Klasifikasi Motor Bakar

Motor bakar adalah salah satu jenis dari mesin kalor, yaitu mesin yang mengubah energi termal untuk melakukan kerja mekanik atau mengubah tenaga kimia bahan bakar menjadi tenaga mekanis. Energi diperoleh dari proses pembakaran, proses pembakaran juga mengubah energi tersebut yang terjadi didalam dan diluar mesin kalor [3].

Motor bakar dapat diklasifikasikan menjadi 2, berdasarkan sistem pembakarannya yaitu sistem pembakaran dalam atau ICE (*internal combustion engines*) dan sistem pembakaran luar (*external combustion engines*). Pembagian mesin menurut sistem pembakarannya didasarkan pada tempat proses pembakaran yang terjadi. Salah satu contohnya adalah gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Mesin mobil (ICE) [4].

ICE dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, seperti berdasarkan :

1. Aplikasinya. Automobile, truk, lokomotif, *light aircraft*, kapal, sistem daya portabel, pembangkit listrik [5].

2. Desain mesin dasar. Mesin reciprocating (dapat dibagi berdasarkan pengaturan silinder: *in-line*, *V*, *radial*, berlawanan), mesin *rotary* (Wankel dan bentuk lain) [5].
3. Siklus kerjanya. Siklus 4 langkah: *naturally aspirated* (menggunakan udara atmosfer), *supercharged* (menggunakan campuran udara segar yg belum terkompresi), dan *turbo-charged* (menggunakan campuran segar yang terkompresi pada kompresor yang digerakkan oleh turbin pembuangan), siklus 2 langkah: *crankcase scavenged*, *supercharged*, dan *turbocharged* [5].
4. Desain dan posisi katup atau saluran. Katup *overhead* (atau I-head), katup *underhead* (atau L-head), katup rotari, saluran *cross-scavenged* (saluran masuk dan buang pada arah yang berlawanan pada salah satu ujung silinder), saluran *loop-scavenged* (saluran masuk dan buang ada disisi yang sama pada ujung silinder), *uniflow-scavenged* (saluran atau katup masuk dan buang berada diujung yang berbeda pada sebuah silinder) [5].
5. Bahan bakar. Bensin (atau *petrol*), bahan bakar minyak (atau minyak diesel), gas alami, *liquid petroleum gas*, alkohol (methanol, etanol), hydrogen, bahan bakar campuran [5].
6. Metode persiapan campuran. Karburator, injeksi bahan bakar kedalam saluran *intake* atau *intake manifold*, injeksi bahan bakar kedalam silinder mesin [5].
7. Metode pengapian. Pengapian busi (pada mesin biasa dimana campurannya seragam dan pada mesin bertingkat dimana campurannya tidak seragam), pengapian kompresi (pada mesin disel, dan juga pengapian di mesin gas dengan injeksi minyak bahan bakar) [5].
8. Desain ruang bakar. Ruang terbuka (banyak desain seperti: piringan, baji, *hemisphere*, *bowl-in-piston*), ruang terpisah (besar dan kecil ruang bantu; banyak desain seperti: ruang lingkaran, *prechamber*) [5].
9. Metode kontrol beban. Saluran bahan bakar dan udara mengalir bersama jadi komposisi campuran tidak berubah, control untuk aliran bahan bakar saja, kombinasi dari semuanya [5].

10. Metode pendinginan. Pendinginan air, pendinginan udara, tanpa pendinginan (selain dengan konveksi dan radiasi biasa) [5].

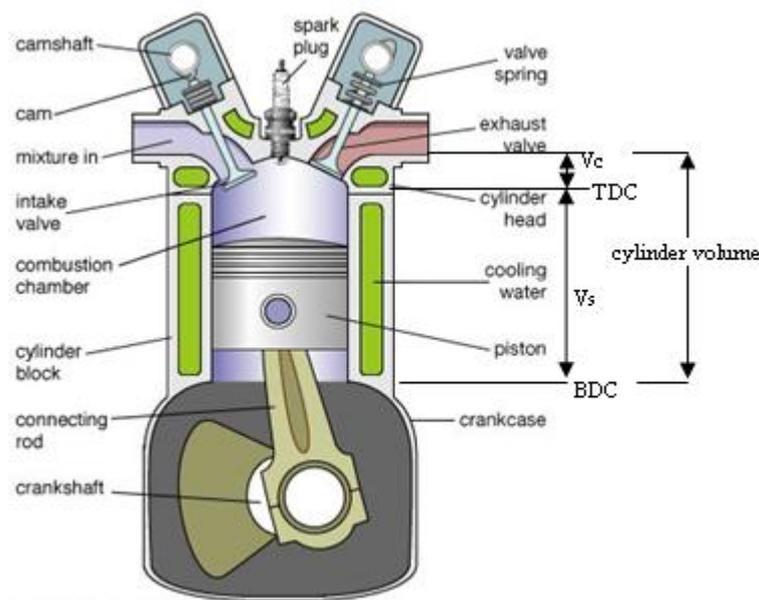
Contohnya pada mesin sepeda motor. Agar sebuah sepeda motor dapat berjalan dengan normal, mesinnya memerlukan suatu proses pembakaran untuk menghasilkan energi yang nantinya akan menggerakkan sepeda motor tersebut. Suatu sistem pembakaran memerlukan 3 hal agar dapat menghasilkan energi yang diperlukan oleh mesin, yaitu bahan bakar, media pembakarannya, dan tempat terjadi pembakarannya. Pada sepeda motor, bahan bakar yang dimaksud adalah bensin dan udara yang mengandung oksigen. Untuk media pembakarnya berupa busi atau *sparkplug* untuk menghasilkan api dan sistem silinder sebagai alat kompresinya. Sedangkan tempat terjadinya proses pembakaran ada didalam suatu ruang bakar atau *combustion chamber*. Dikarenakan proses pembakarannya didalam *combustion chamber* (termasuk ruang tertutup) maka mesin sepeda motor termasuk sistem pembakaran dalam. Dan untuk lebih lengkapnya mesin sepeda motor merupakan ICE dengan bahan bakar bensin, *single cylinder* pada umumnya, mesin 4-langkah (kebanyakan pada jaman sekarang), SOHC (*Single Over Head Cylinder*) kebanyakan, pengapian busi, dan memiliki karburator sebagai penyuplai campuran bahan bakar.

Penyalan pada motor bensin terjadi karena loncatan bunga api listrik yang dipercikan oleh busi atau juga sering disebut juga *sparkplug*. Motor bensin dapat juga disebut sebagai motor otto. Motor tersebut dilengkapi dengan busi dan karburator. Busi menghasilkan loncatan bunga api listrik yang membakar campuran bahan bakar dan udara karena motor ini cenderung disebut *spark ignition engine*. Pembakaran bahan bakar dengan udara ini menghasilkan daya. Motor diesel adalah motor bakar torak yang berbeda dengan motor bensin. Proses penyalannya bukan menggunakan loncatan bunga api listrik. Pada motor diesel penyalan terjadi karena kompresi yang tinggi di dalam silinder kemudian bahan bakar disemprotkan oleh nozzle atau juga sering disebut juga *Compression Ignition Engine*, seperti terlihat pada gambar 2.3. Pada waktu torak hampir mencapai Titik Mati Atas (TMA) atau sering juga disebut *Top Dead Center* (TDC), bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar. Terjadilah pembakaran pada ruang bakar pada saat udara dalam silinder sudah bertemperatur tinggi. Persyaratan ini

dapat terpenuhi apabila perbandingan kompresi yang digunakan cukup tinggi, yaitu berkisar 12-25 [6].

2.1.1 Istilah-Istilah pada Mesin Bolak-Balik/*Reciprocating Engines*

Gambar 2.2 adalah istilah-istilah yang digunakan dalam motor pembakaran dalam:



Gambar 2.2 Terminologi pada ICE [7].

1. *Cylinder bore* adalah diameter dalam nominal dari silinder [8].
2. *Luas piston*, luas lingkaran berdiameter sama dengan *cylinder bore* [8].
3. *Stroke* atau langkah, jarak nominal yang dilalui piston saat bergerak antara 2 titik mati [8].
4. *Top Dead* atau titik mati adalah posisi dan bagian-bagian yang bergerak yang secara mekanis dihubungkan kepadanya sesaat ketika arah gerakan piston membalik (pada titik ujung dari langkah). *BDC (Bottom Dead Center)* atau *TMB (Titik Mati Bawah)* adalah titik mati ketika piston berada paling dekat dengan poros engkol atau *crankshaft*. *TDC (Top Dead Center)* atau

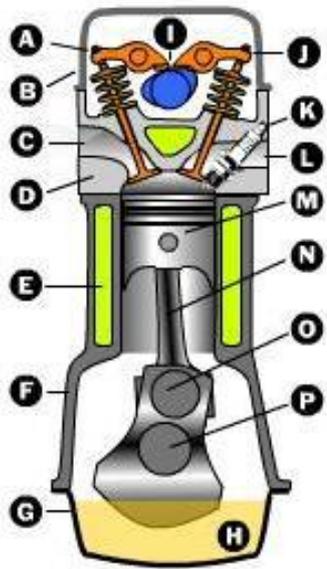
TMA (Titik Mati Atas) adalah titik mati ketika posisi piston berada paling jauh dengan poros engkol [8].

5. Volume langkah/perpindahan atau volume yang tersapu piston (V_s) adalah volume yang dihasilkan oleh piston ketika bekerja dari satu titik mati ke yang lain, dihitung sebagai perkalian luas piston dan langkah [8].
6. Volume *clearance*/celah (V_c) adalah volume nominal dari ruang dalam ruang bakar ketika piston berada di TDC [8].
7. Volume silinder adalah jumlah dari volume langkah dan volume *clearance* [8].
8. Perbandingan kompresi adalah nilai numerik hasil perbandingan nilai volume silinder dan volume *clearance* [8].

2.1.2 *Four-Stroke Engine*

Motor bensin 4 langkah adalah motor yang pada setiap 4 langkah torak/piston (dua putaran engkol) sempurna menghasilkan satu tenaga kerja (satu langkah kerja) [8].

Begitu pula pada mesin diesel 4 langkah. Jadi pada motor 4 langkah, piston bergerak dari BDC ke TDC atau sebaliknya sebanyak 4 kali. Busi atau *sparkplug* memercikkan bunga api sebanyak sekali setiap piston bergerak sebanyak 4 langkah. Sedangkan pada mesin 2 langkah, *sparkplug* memercikkan bunga api sekali tiap 2 langkah piston. Mesin 4 langkah memiliki sistem *camshaft* yang tidak dimiliki mesin 2 langkah. Sistem *camshaft* terdiri dari *intake* dan *exhaust valve*, *rocker arm* dan *spring*, dan batang *camshaft*. Sistem *camshaft* ini berguna untuk mengatur ketepatan dan sinkronisasi antara *intake/exhaust valve* dengan pergerakan piston. Jadi saat busi memercikkan bunga api harus tepat saat piston beberapa derajat sebelum TDC dan kedua *valve* atau katup pada posisi menutup. Gambar 2.3 memperlihatkan bagian-bagian mesin 4 langkah.

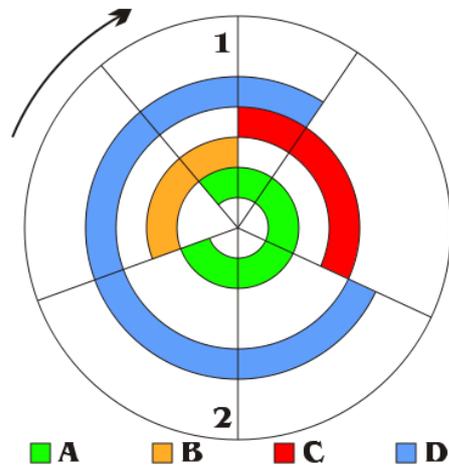


Dimana:

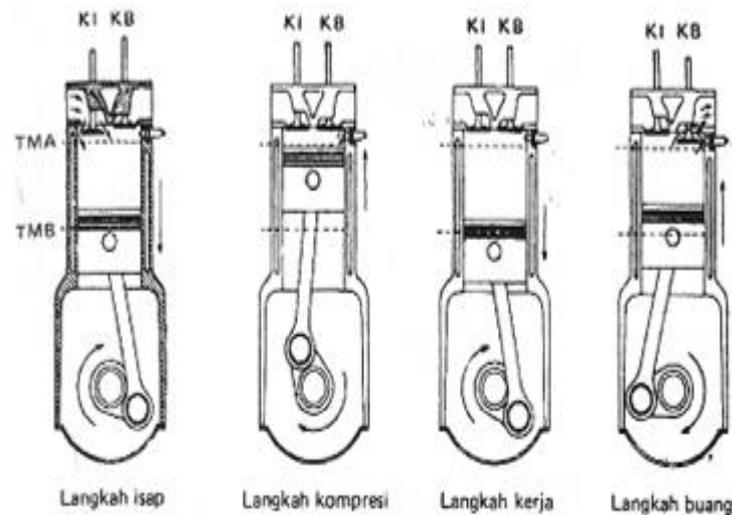
- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| A. Intake Valve, Rocker Arm & Spring | I. Camshaft |
| B. Valve Cover | J. Exhaust Valve, Rocker Arm & Spring |
| C. Intake Port | K. Spark Plug |
| D. Head | L. Exhaust Port |
| E. Coolant | M. Piston |
| F. Engine Blok | N. Connecting Rod |
| G. Oil pan | O. Rod Bearing |
| H. Oil Sump | P. Crankshaft |

Gambar 2.3 Penampang mesin vertikal 4 langkah SOHC (*Single Over Head Camshaft*) [9].

Prinsip kerja motor bensin 4 langkah seperti pada gambar 2.4 dan 2.5 :



Gambar 2.4 Diagram siklus kerja motor bensin 4 langkah [10].



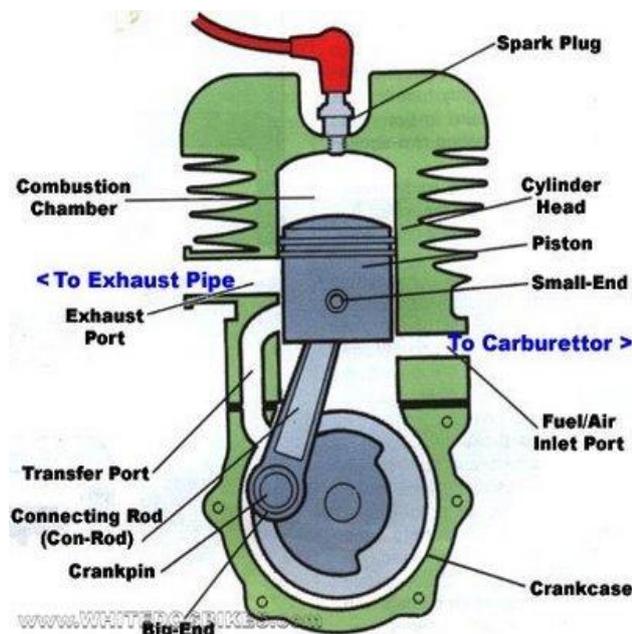
Gambar 2.5 Prinsip kerja torak 4 langkah [11].

Keterangan:

1. Langkah hisap (*induction*) : A
 - a. Piston bergerak dari TDC (1) ke BDC (2)
 - b. Katup masuk terbuka, katup buang tertutup
 - c. Campuran bahan bakar dengan udara yang telah tercampur didalam karburator masuk kedalam silinder melalui katup masuk
 - d. Saat torak berada di BDC (2) katup masuk akan tertutup
2. Langkah kompresi (*compression*) : B
 - a. Piston bergerak dari BDC (2) ke TDC (1)
 - b. Katup masuk dan katup buang kedua-duanya tertutup sehingga gas yang telah diisap tidak keluar pada waktu ditekan oleh piston yang mengakibatkan tekanan gas akan naik
 - c. Beberapa saat sebelum pistorn mencapai TDC (1) busi mengeluarkan bunga api listrik
 - d. Gas bahan bakar yang telah mencapai tekanan tinggi terbakar
 - e. Akibat pembakaran bahan bakar, tekanannya akan naik menjadi kira-kira tiga kali lipat

3. Langkah pembakaran (*ignition*) : C
 - a. Saat ini kedua katup masih dalam keadaan tertutup
 - b. Gas terbakar dengan tekanan yang tinggi akan mengembang kemudian menekan piston turun kebawah dari TDC (1) ke BDC (2)
 - c. Tenaga ini disalurkan melalui *connecting rod*, selanjutnya oleh poros engkol atau *crankshaft* diubah menjadi gerak rotasi
4. Langkah pembuangan (*exhaust*) : D
 - a. Katup buang terbuka, katup masuk tertutup
 - b. Torak bergerak dari BDC (2) ke TDC (1)
 - c. Gas sisa pembakaran terdorong oleh piston keluar melalui katup buang

Pada motor bensin 2 langkah, terjadi siklus kerja yang sama, tetapi piston hanya bergerak dari TDC ke BDC atau sebaliknya sebanyak 2 langkah. Disini tidak melibatkan katup buang dan katup masuk. Namun melibatkan *crankcase*, ruang bilas, saluran masuk, dan saluran buang. Seperti pada gambar 2.6.



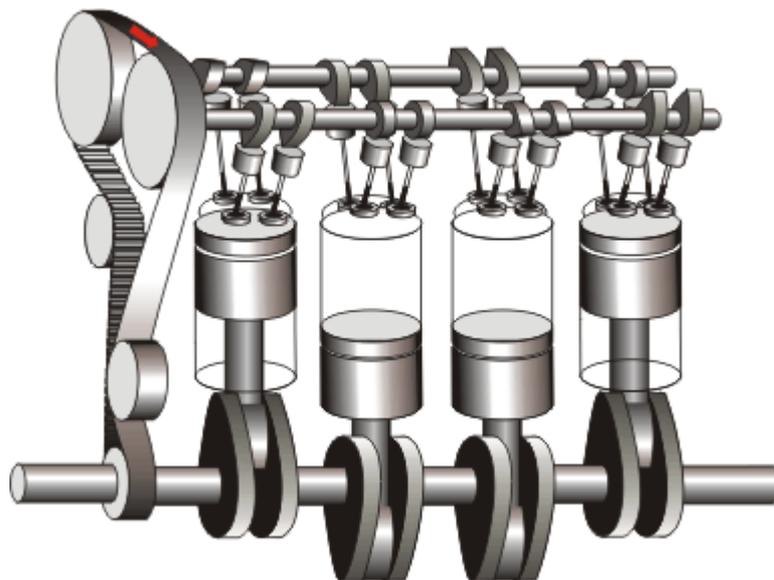
Gambar 2.6 Bagian-bagian motor bensin 2 langkah [12].

Pada *combustion chamber* atau ruang bakar mesin 4 langkah, bahan bakar tidak tercampur dengan pelumas (oli). Jadi piston mesin 4 langkah memiliki 3 ring piston yaitu 2 ring piston dan 1 ring oli. 2 buah ring piston ini berguna untuk menghalangi oli

mesin yang berada di-*crankcase* naik ke ruang bakar. Sedangkan ring oli berguna untuk mendistribusikan oli ke bagian bawah piston sebagai pelumas. Berbeda halnya dengan mesin 2 langkah. Sebagai contoh adalah sepeda motor 2 tak. Pada ruang bakar sepeda motor 2 tak, bahan bakar terbakar bersama oli tetapi bukan oli mesin melainkan oli dengan SAE yang lebih rendah dibanding oli mesin pada umumnya.

2.1.3 *In-Line Multi-Cylinder ICE*

Mesin multisilinder merupakan mesin dengan lebih dari satu silinder untuk menghasilkan tenaga. Silinder-silinder sebagai tempat mekanisme gerak bolak balik torak ini disusun segaris (*in-line*) atau susunan bentuk V (*V-type*) dengan sudut yang tertentu. Mesin segaris atau mesin *in-line* adalah ICE dengan semua silinder sejajar dalam satu baris, tanpa offset. Seperti yang tampak pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mesin *multi*-silinder segaris [13].

2.2 *Rigid Bodies/Benda Tegar dan Plane Motion*

Benda tegar berbeda dengan sistem partikel pada analisa dinamis suatu benda. Pada pengasumsian benda menjadi sebuah partikel, jarak antar partikel tidak berubah. Jadi, jika tiap partikel pada sebuah benda didefinisikan dengan vector posisi dari sebuah

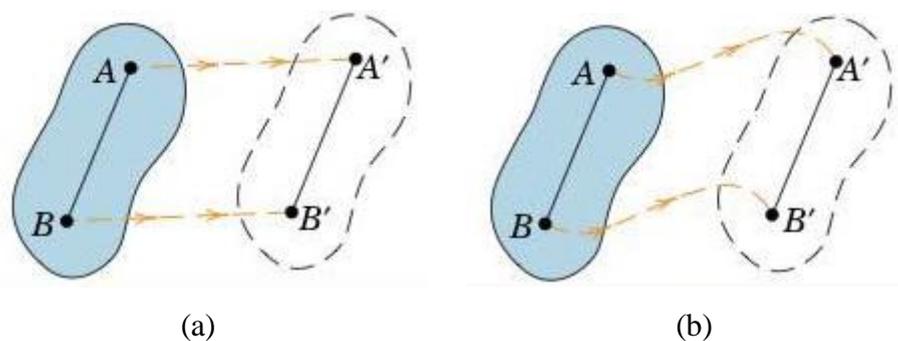
sumbu acuan yang terletak pada benda tersebut dan berputar, maka tidak ada perubahan pada tiap vector posisi yang terdapat pada sumbu tersebut [14].

Namun, jika pergerakan terkait dengan perubahan vector posisi antar partikel adalah sangat kecil dibandingkan dengan pergerakan benda tersebut secara keseluruhan, maka pengasumsian *rigidity* dapat digunakan [14].

Contohnya saat menganalisa pergerakan kereta api saat melaju di lintasan rel yang lurus. Pergerakan roda kereta api yang berbentuk kerucut terpotong terhadap lintasan rel, mengakibatkan pergerakan kereta api tidak melaju lurus sesuai lintasan melainkan kereta api mengalami efek mengular. Untuk mengidealisasikan analisa, kereta api dapat diasumsikan kedalam *rigid body*. Jadi kereta api melaju lurus dengan kecepatan tertentu.

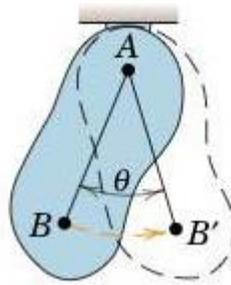
Bidang gerak atau *plane motion* untuk sebuah benda tegar, dapat dianggap menjadi sebuah bidang yang memiliki pusat massa dan menganggap benda tersebut sebagai lempengan tipis, dimana gerakannya dibatasi pada bidang lempengan tersebut. Bidang gerak benda tegar dapat dibagi menjadi beberapa macam:

1. Translasi didefinisikan menjadi semua pergerakan dimana tiap alur pada benda tetap sama terhadap posisi awalnya. Pada translasi, tidak ada rotasi yang terjadi pada tiap alur perpindahan benda [14]. Seperti pada gambar 2.8a, adalah translasi garis lurus atau *rectilinear translation*, dimana tiap titik sebuah benda bergerak secara lurus. Sedangkan pada gambar 2.8b, merupakan translasi garis kurva atau *curvilinear translation*, dimana titik-titiknya berpindah mengikuti garis lurus.



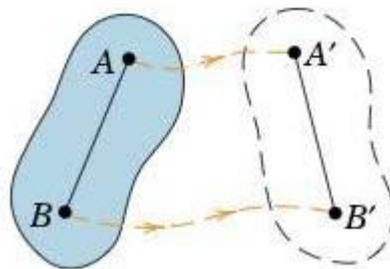
Gambar 2.8 (a) *Rectilinear translation*, (b) *Curvilinear translation* [14].

2. Rotasi terhadap sebuah sumbu tetap. Adalah pergerakan angular terhadap sebuah sumbu. Pergerakan partikel pada sebuah benda tegar ini mengikuti alur kurva terhadap sumbu rotasi, dan semua garis pada benda yang mana tegak lurus terhadap sumbu rotasi (termasuk yang tidak melewati sumbu) berputar dengan sudut yang sama disaat yang sama pula, seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Gerak rotasi terhadap sebuah sumbu [14].

3. Kombinasi antara translasi dan rotasi. Seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Gerak kombinasi translasi dan rotasi [14].

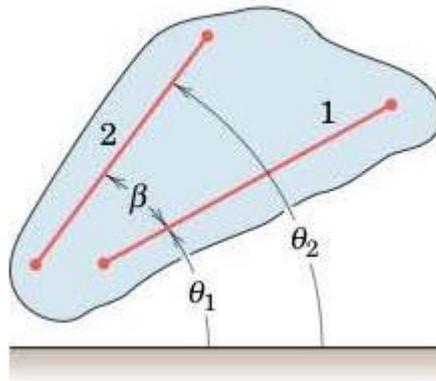
2.3 Kinematika Benda Tegar

Analisa bidang gerak dari benda tegar dapat dilakukan dengan menghitung langsung perpindahan yang terjadi dan turunan waktunya dari geometri yang ada atau dengan memanfaatkan prinsip gerak relatif [14].

2.3.1 Rotasi

Rotasi pada benda tegar, digambarkan dengan pergerakannya. Seperti pada gambar 2.11, posisi angular dari dua garis 1 dan 2 terletak pada benda dapat disimbolkan menjadi θ_1 dan θ_2 yang ditentukan dari referensi arah yang tetap. Karena

sudut β invariant, maka hubungan $\theta_2 = \theta_1 + \beta$ pada diferensiasi terhadap waktu maka $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1$ dan $\ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_1$ atau, saat interval tak hingga, $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1$. Jadi semua garis pada benda tegar dibidang gerak tersebut, memiliki perpindahan, kecepatan, dan percepatan angular yang sama [14].



Gambar 2.11 Gerak rotasi benda tegar [14].

Kecepatan angular ω dan percepatan angular α dari benda tegar pada bidang rotasi, adalah turunan pertama dan kedua dari koordinat posisi angular θ pada tiap garis dibidang gerak dari benda tegar. Jadi,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega} \quad \text{atau} \quad \alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta}$$

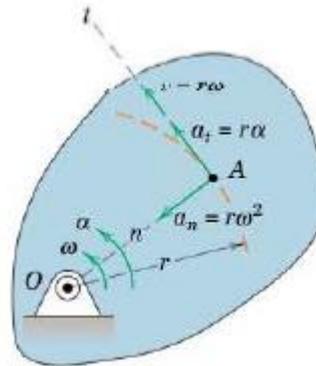
$$\omega d\omega = \alpha d\theta \quad \text{atau} \quad \dot{\theta} d\dot{\theta} = \ddot{\theta} d\theta$$

Ketika benda tegar berotasi terhadap sumbu tetap, semua titik selain titik yang ada disumbu gerak pada lingkaran konsentris disumbu tetap. Hubungan antara gerak lurus dari A pada gambar 2.12, dan gerak angular dari garis normal pada alurnya, dimana juga merupakan gerak angular dari benda tegar, dengan notasi $\omega = \dot{\theta}$ dan $\dot{\omega} = \ddot{\theta}$ untuk kecepatan angular dan percepatan angular adalah,

$$v = r \omega$$

$$a_n = r \omega^2 = \frac{v^2}{r} = v \omega \quad (2.2)$$

$$a_t = r \alpha \quad (2.3)$$



Gambar 2.12 Benda tegar berputar terhadap titik O [14].

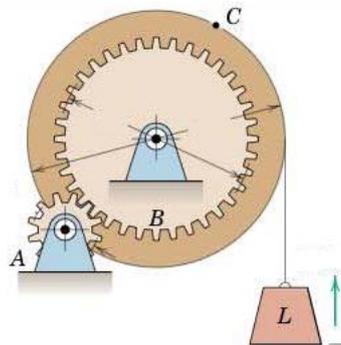
2.3.2 *Absolute Motion*

Pendekatan ini digunakan saat benda tegar bergerak tidak hanya didefinisikan oleh hubungan geometri antara variabel linear dan angular tetapi juga turunan terhadap waktu dari keduanya, akan melibatkan kecepatan dan percepatan linear dan angular [14].

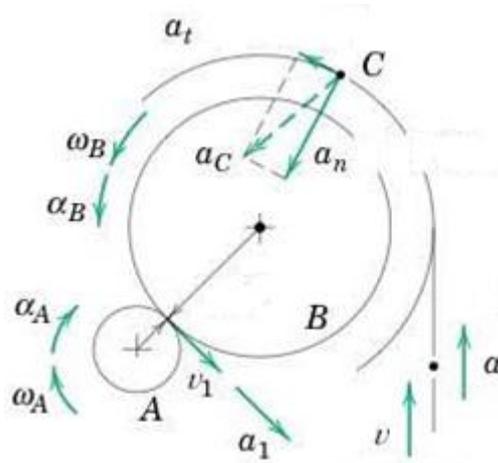
Pada analisa *absolute motion*, harus konsisten terhadap deskripsi matematis. Contohnya, jika posisi angular (θ) positif saat mengarah kearah berlawanan jarum jam atau *counter-clockwise*, maka kecepatan dan percepatan angular juga bertanda positif saat bergerak *counter-clockwise*. Tanda negatif diberikan saat arah gerak angularnya searah jarum jam.

Pendekatan *absolute-motion*, dilakukan dengan membagi-bagi arah gerak menjadi beberapa kelompok, tetapi tetap pada sebuah sumbu referensi tetap atau *fixed reference axis*. Namun jika geometri dari benda tegar tersebut terlalu sulit atau kompleks, lebih baik menggunakan pendekatan *relative motion*.

Contoh pendekatan ini seperti pada gambar 2.13, sebuah mekanisme yang terdiri dari pinion A, yang digerakkan sebuah motor, menggerakkan gigi B, yang berkontak dengan sebuah drum yang diberi beban L . Untuk menghitung kecepatan pada pinion A dan titik C, digunakan sebuah titik pusat, tepat ditengah-tengah gigi B. Disini sumbu referensi tetap adalah titik pusat tersebut. Lalu gambar 2.14 adalah diagram benda bebas mekanisme tersebut.



Gambar 2.13 Contoh mekanisme pendekatan *absolute motion* [14].



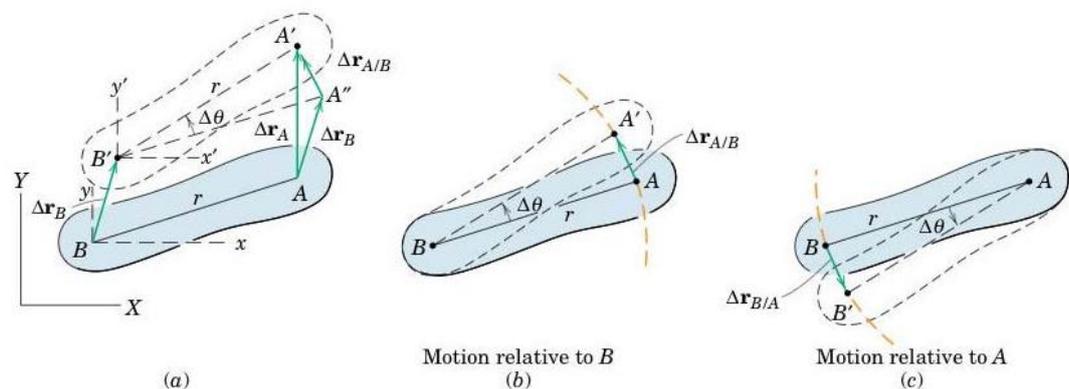
Gambar 2.14 Diagram benda bebas pendekatan *absolute motion* [14].

2.3.3 Kecepatan Relatif Akibat Rotasi

Pendekatan lainnya untuk kinematika benda tegar adalah menggunakan prinsip *relative motion*. Saat memilih dua titik acuan pada benda tegar yang sama, maka konsekuensinya, pergerakan sebuah titik yang dilihat oleh pengamat, terlihat bertranslasi dengan titik lainnya bergerak melingkar karena jari-jarinya ke titik yang diamati dari

titik referensi yang tidak berubah. Pengamatan inilah sebagai kunci dalam kesuksesan memahami kebanyakan masalah dalam bidang gerak benda tegar [14].

Seperti gambar 2.15a, memperlihatkan sebuah benda tegar bergerak pada bidang dari AB ke $A'B'$ saat Δt . Pergerakan ini dapat dilihat dari dua sudut pandang. Pertama, translasi benda ke posisi $A'B'$ dengan perpindahan Δr_B . Kedua, benda berotasi pada B' melalui sudut $\Delta\theta$. Dari sumbu referensi yang tidak berputar $x'-y'$ yang terletak pada titik referensi B' , pergerakan benda yang berlangsung ini adalah salah satu rotasi sederhana pada B' , sehingga menimbulkan pergerakan $\Delta r_{A/B}$ dari A dengan acuan B . Untuk pengamat yang tidak berotasi terletak pada B , benda tampak mengalami rotasi sumbu tetap pada B dengan A melakukan gerak melingkar, seperti pada gambar 2.15b. Titik B dapat dipilih secara sembarang sebagai titik referensi untuk sumbu referensi yang tidak berputar $x-y$. Titik A juga dapat digunakan sebagai titik referensi, dimana akan titik B berputar terhadap A seperti yang terlihat pada gambar 2.15c.



Gambar 2.15 *Relative motion* [14].

Rotasi yang terjadi pada gambar 2.15c, adalah berlawanan arah jarum jam, baik titik A maupun titik B , sebagai titik referensi akan menghasilkan $\Delta r_{B/A} = -\Delta r_{A/B}$. Dengan B sebagai titik referensi, maka perpindahan total untuk gambar 2.14a adalah,

$$\Delta r_A = \Delta r_B + \Delta r_{A/B} \quad (2.4)$$

Dimana $\Delta r_{A/B}$ memiliki arah $r\Delta\theta$ ($\Delta\theta$ mendekati 0). *Relative linear motion*, $\Delta r_{A/B}$ disertai dengan *absolute angular motion* $\Delta\theta$, seperti yang terlihat dari sumbu translasi $x'-y'$. Bagi persamaan 2.4 dengan Δr_A sesuai dengan interval waktu dan masukkan kedalam limit, maka didapat persamaan kecepatan relatif,

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_B + \mathbf{v}_{A/B} \quad (2.5)$$

Jarak r antara A dan B adalah tetap. Arah kecepatan relatifnya adalah,

$$v_{A/B} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (|\Delta r_{A/B}| / \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (|r\Delta\theta| / \Delta t) . \quad (2.6)$$

Dimana, $\omega = \dot{\theta}$, maka

$$\mathbf{v}_{A/B} = r\omega \quad (2.7)$$

Dimana ω adalah kecepatan angular normal pada bidang gerak dengan arah yang ditentukan dengan aturan tangan kanan.

2.3.4 Percepatan Relatif Akibat Rotasi

Sesuai dengan persamaan 2.5, yang menggambarkan kecepatan relatif di titik A dan B pada gambar 2.15a, dengan menurunkan persamaan tersebut terhadap waktu, maka akan didapatkan persamaan percepatan relatif, dimana

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}_A &= \dot{\mathbf{v}}_B + \dot{\mathbf{v}}_{A/B} \quad \text{atau} \\ \mathbf{a}_A &= \mathbf{a}_B + \mathbf{a}_{A/B} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dengan kata lain, persamaan 2.8 menerangkan bahwa percepatan di titik A sama dengan jumlah vektor percepatan di titik B dan percepatan dimana A tampak memiliki pengamat gerak tidak berputar terhadap B atau A adalah titik acuan saat mengamati gerak titik B.

Dikarenakan gerak relatifnya adalah melingkar, maka percepatan relatif memiliki komponen normal yang diarahkan dari A ke B karena perubahan arah dari

$v_{A/B}$ dan sebuah komponen tangensial tegak lurus terhadap AB karena perubahan arah dari $v_{A/B}$.

Komponen percepatan untuk gerak melingkar, baik komponen normal maupun tangensial, dapat ditulis seperti persamaan 2.2 dan 2.3. Lalu dapat ditulis menjadi

$$\mathbf{a}_A = \mathbf{a}_B + (\mathbf{a}_{A/B})_n + (\mathbf{a}_{A/B})_t \quad (2.9)$$

Dimana arah dari komponen-komponen percepatan relatif tersebut adalah

$$(\mathbf{a}_{A/B})_n = v_{A/B}^2 / r = r\omega^2 \quad (2.10)$$

$$(\mathbf{a}_{A/B})_t = \dot{v}_{A/B} = r\alpha \quad (2.11)$$

Notasi vector dari komponen percepatan tersebut adalah

$$(\mathbf{a}_{A/B})_n = \omega \times (\omega \times r) \quad (2.12)$$

$$(\mathbf{a}_{A/B})_t = \alpha \times r \quad (2.13)$$

Dimana ω adalah kecepatan angular dan α adalah percepatan angular dari benda tegar tersebut. Vektor posisi A dari B adalah r .

Percepatan relatif tergantung pada masing-masing *absolute angular velocity* dan *absolute angular velocity* [14].

2.4 Kinetika Benda Tegar

Kinetika benda tegar menghubungkan antara gaya luar yang bekerja pada benda dan gerak pada benda baik translasi maupun rotasi [14].

Seperti halnya pada analisa kinematika benda tegar, benda dapat dianggap menjadi lempengan tipis dimana geraknya dibatasi pada sebuah bidang dilempengan yang akan dianggap sebagai bidang gerak. Bidang gerak akan memiliki pusat massa, dan semua gaya yang bekerja pada benda tersebut akan diproyeksikan kedalam bidang gerak. Benda yang memiliki dimensi normal yang cukup besar terhadap bidang gerak

tetapi simetris pada bidang gerak melalui pusat massa, akan dianggap memiliki bidang gerak.

2.4.1 Persamaan Dasar Gerakan

Sesuai dengan hukum Newton kedua, maka hubungan antara percepatan dan gaya adalah

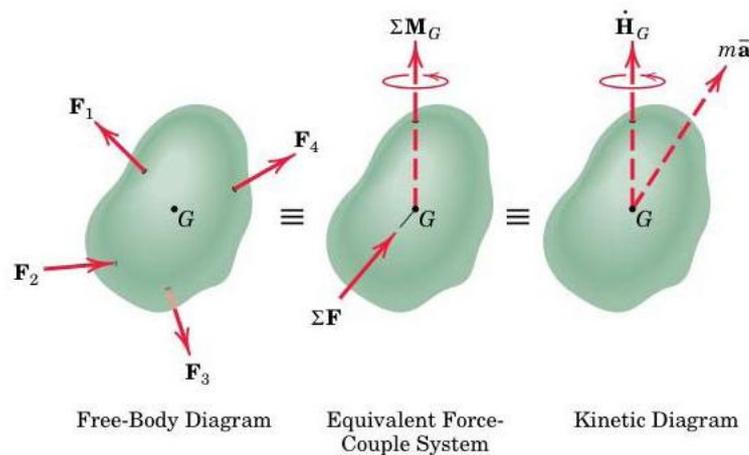
$$\Sigma F = m\bar{a} \quad (2.14)$$

Jumlah gaya (ΣF) yang bekerja pada benda sama dengan massa (m) dan percepatan benda (\bar{a}) di pusat massa benda tersebut. Persamaan momen dipusat massa benda tersebut adalah

$$\Sigma M_G = \dot{H}_G \quad (2.15)$$

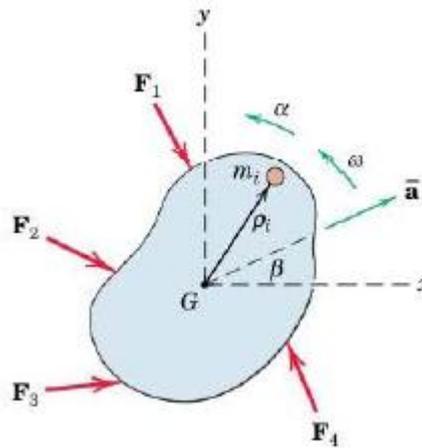
Jumlah momen pada pusat massa akibat gaya luar pada benda, sama dengan laju perubahan waktu dari momentum angular pada pusat massa benda tersebut.

Pada analisa statis, sebuah sistem gaya yang bekerja pada benda tegar dapat digantikan dengan jumlah gaya yang bekerja pada titik yang ditentukan dan sebuah *couple*. Dengan menggantikan gaya luar dengan sistem gaya dan *couple* yang setara dimana jumlah gaya yang bekerja melalui pusat massa, maka didapatkan gaya dan respon dinamis yang bekerja pada benda tersebut, seperti terlihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Pengubahan *free-body diagram* sebuah benda menjadi diagram kinetika[14].

Gambar 2.17, memperlihatkan benda tegar bergerak pada bidang gerak di bidang x-y. Pusat massa G memiliki percepatan \bar{a} , dan benda tersebut memiliki kecepatan angular $\boldsymbol{\omega} = \omega \mathbf{k}$ dan percepatan angular $\boldsymbol{\alpha} = \alpha \mathbf{k}$, keduanya bertanda positif pada arah-z. Karena arah-z baik ω maupun α tegak lurus terhadap bidang gerak, maka dapat digunakan notasi scalar ω dan $\alpha = \dot{\omega}$ mewakili kecepatan dan percepatan angular.



Gambar 2.17 Gaya yang bekerja pada sebuah benda tegar [14].

Momentum angular pada pusat massa dari sebuah sistem dapat ditulis,

$$H_G = \Sigma \rho_i \times m_i \dot{\rho}_i \quad (2.16)$$

Dimana ρ_i adalah vektor posisi relatif terhadap G yang mewakili massa partikel m_i . Untuk benda tegar, kecepatan dari m_i relatif terhadap G adalah $\dot{\rho}_i = \omega \times \rho_i$, dimana $\dot{\rho}_i$ memiliki arah $\rho_i \omega$. Jadi arah H_G menjadi,

$$H_G = \Sigma \rho_i^2 m_i \omega \quad (2.17)$$

Kemudian, dapat ditulis dengan $\int \rho^2 dm$, ini didefinisikan sebagai momen massa inersia \bar{I} dari benda terhadap sumbu-z melalui G. (Momen massa inersia, lihat lampiran).

Maka H_G dapat ditulis,

$$H_G = \bar{I} \omega \quad (2.18)$$

Dimana \bar{I} adalah komponen tetap dari benda. Komponen ini adalah ukuran dari *rotational inertia*, dimana tidak berubah terhadap perubahan kecepatan rotasi karena distribusi jari-jari dari massa sekitar di sumbu-z melalui G. Dengan substitusi ini, persamaan momen dar persamaan 2.15 menjadi,

$$\Sigma M_G = \dot{H}_G = \bar{I}\dot{\omega} = \bar{I}\alpha \quad (2.19)$$

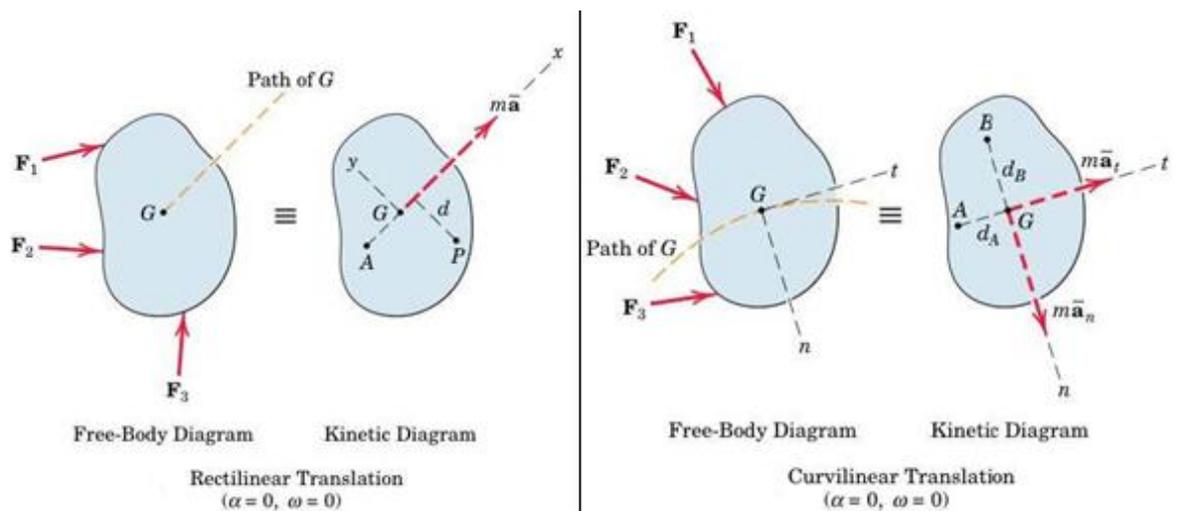
Dimana $\alpha = \dot{\omega}$ adalah percepatan angular dari benda. Maka persamaan momen dan bentuk vektor dari hukum kedua Newton adalah,

$$\Sigma \mathbf{F} = m\bar{\mathbf{a}} \quad (2.20)$$

$$\Sigma M_G = \bar{I}\alpha \quad (2.21)$$

2.4.2 Translasi

Seperti halnya pada analisa kinematika benda tegar, saat benda bergerak translasi, semua titik pada benda tersebut berpindah secara paralel, atau boleh dikatakan tetap setiap saat. Pada *rectilinear translation*, semua titik bergerak sesuai garis lurus, sedangkan pada *curvilinear translation*, semua titik bergerak sesuai garis kurva. Dengan kata lain, tidak terdapat gerak angular baik ω maupun α pada translasi benda, atau sama dengan nol. Pada gambar 2.18, terlihat semua momen inersia ditiadakan untuk gerak translasi pada sebuah benda.



Gambar 2.18 *Rectilinear* dan *curvilinear translation* [14].

Untuk benda yang bertranslasi, maka persamaan dasar untuk bidang geraknya adalah,

$$\Sigma \mathbf{F} = m\bar{\mathbf{a}} \text{ dan } \Sigma M_G = \bar{I}\alpha = 0 \quad (2.22)$$

Pada *rectilinear translation*, di gambar 2.18, jika sumbu-x digunakan sebagai arah percepatan, maka persamaan dua skalar gayanya adalah $\Sigma F_x = m\bar{a}_x$ dan $\Sigma F_y = m\bar{a}_y = 0$. Untuk *curvilinear translation*, jika menggunakan koordinat n-t, persamaan skalar dua gayanya adalah $\Sigma F_n = m\bar{a}_n$ dan $\Sigma F_t = m\bar{a}_t$, dimana $\Sigma M_G = 0$.

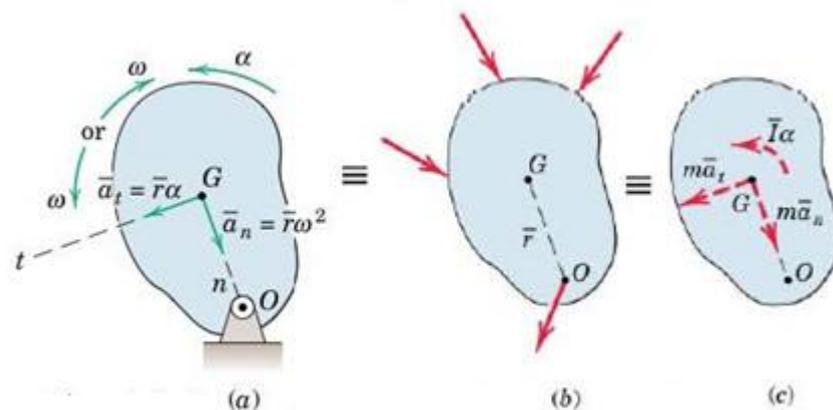
2.4.3 Rotasi pada Sumbu Tetap

Berbeda dengan translasi, titik-titik pada benda yang berotasi, berputar terhadap sumbu tertentu. Semua garis rotasi pada benda di bidang gerak memiliki kecepatan dan percepatan angular yang sama [14].

Komponen percepatan pada pusat massa untuk gerak melingkar digambarkan dengan koordinat n-t, maka menjadi,

$$a_n = \bar{r}\omega^2 \text{ dan } a_t = \bar{r}\alpha \quad (2.23)$$

untuk benda tegar yang berotasi pada sebuah sumbu tetap melalui O, seperti yang terlihat pada gambar 2.19a. Gambar 2.19b adalah diagram benda bebas dari benda tegar yang berotasi dan gambar 2.19c adalah diagram kinetiknya, dimana jumlah gaya $m\bar{\mathbf{a}}$ dalam komponen n- dan t- dan jumlah *couple* $\bar{I}\alpha$.



Gambar 2.19 (a) Rotasi benda tegar, (b) Diagram benda bebas, (c) Diagram kinetika, [14].

Jadi dua komponen skalar dari persamaan gaya menjadi $\Sigma F_n = m\bar{r}\omega^2$ dan $\Sigma F_t = m\bar{r}\alpha$. Untuk menentukan persamaan momen di G, maka diperlukan perhitungan momen dari gaya-gaya yang bekerja pada benda di O. Persamaan momen dititik O adalah

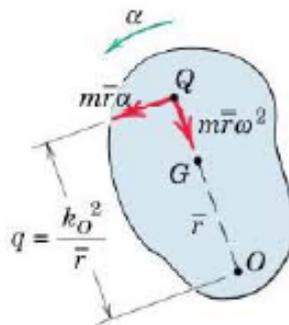
$$\Sigma M_O = I_O \alpha \quad (2.24)$$

Dari diagram kinetika pada gambar 2.19c, persamaan 2.24 didapat dari $\Sigma M_O = \bar{I}\alpha + m\bar{a}_t\bar{r}$. Momen inersianya adalah $I_O = \bar{I} + m\bar{r}^2$, maka $\Sigma M_O = (I\alpha - m\bar{r}^2)\alpha + m\bar{r}^2\alpha = I_O\alpha$.

Untuk kasus umum dari benda tegar yang berotasi terhadap sumbu tetap melalui pusat massa G, maka $\bar{\mathbf{a}} = 0$ dan $\Sigma \mathbf{F} = 0$. Jumlah gaya yang bekerja adalah *couple* $\bar{I}\alpha$.

Komponen resultan gaya $m\bar{a}_t$ dan resultan *couple* $\bar{I}\alpha$ dapat digabungkan dengan memindahkan $m\bar{a}_t$ ke posisi paralel melalui titik Q di garis OG, seperti gambar 2.20, maka $m\bar{r}\alpha q = \bar{I}\alpha + m\bar{r}\alpha(\bar{r})$. Menggunakan teorema sumbu paralel dan $I_O = \bar{k}_O^2 m$, maka $q = \bar{k}_O^2 \sqrt{\bar{r}}$.

Titik Q disebut *center of percussion* dan memiliki komponen unik yaitu jumlah semua gaya yang bekerja pada benda harus melaluinya. Lalu, jumlah dari momen dari semua gaya pada *center of percussion* adalah selalu nol, $\Sigma M_Q = 0$.

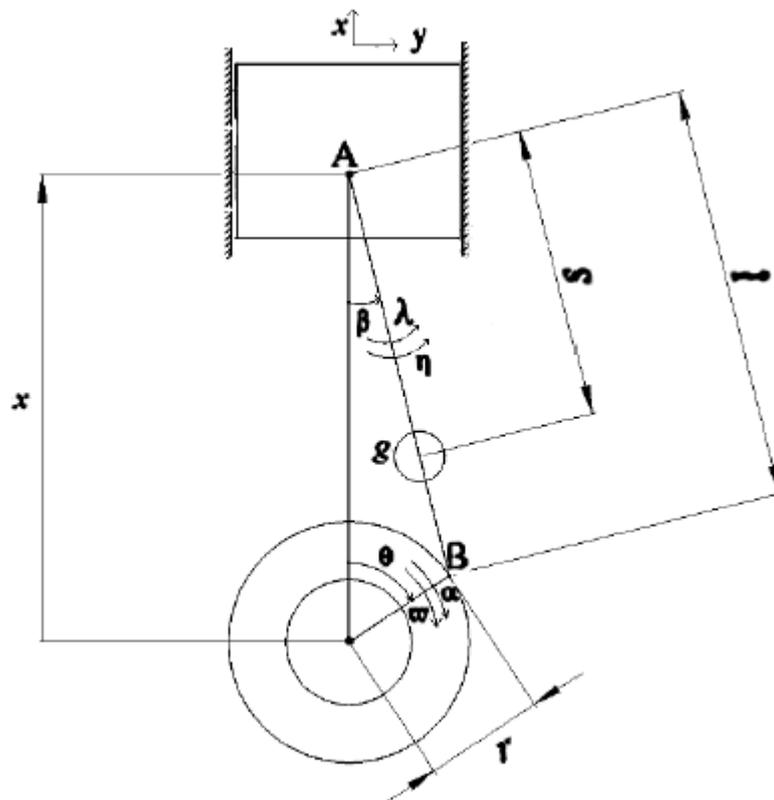


Gambar 2.20 Titik Q sebagai *center of percussion* [14].

2.5 Analisa Dinamis Mekanisme *Slider-Crank* 4-Silinder *In-Line*

2.5.1 Kinematika pada Mekanisme *Slider-Crank* dengan Taylor Series

Pada gambar 2.21 merupakan penyederhanaan gambar mekanisme mesin *slider-crank*,



Gambar 2.21 Mekanisme *slider-crank* [15].

Saat piston bergerak lurus ke arah x maka,

$$x = r \sin \theta + l \cos \beta \quad (2.46)$$

Dimana r adalah jari-jari poros engkol, L adalah panjang *connecting rod*, θ adalah sudut rotasi poros engkol dan β adalah sudut *connecting rod* terhadap sumbu x . Maka,

$$r \sin \theta = l \cos \beta \quad (2.47)$$

$$n = \frac{r}{l} \quad (2.48)$$

Kemudian,

$$x = r \cos \theta + l \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta} \quad (2.49)$$

Dengan menggunakan Taylor series pada persamaan 2.49:

$$\sqrt{1 - n^2 (\sin \theta)^2} = 1 - \frac{1}{2} (n \sin \theta)^2 + \frac{1}{8} (n \sin \theta)^4 - \frac{1}{16} (n \sin \theta)^6 + \dots \quad (2.50)$$

Karena kurang dari 1 (kira-kira 0.3), maka menjadi,

$$\sqrt{1 - n^2 (\sin \theta)^2} \cong 1 - \frac{1}{2} n^2 (\sin \theta)^2 = 1 - \frac{1}{4} n^2 - \frac{1}{4} n^2 \cos 2\theta \quad (2.51)$$

Dari persamaan 2.46 dan 2.51 didapat:

$$x = r \cos \theta + l \left(1 - \frac{1}{4} n^2 - \frac{1}{4} n^2 \cos 2\theta \right) \quad (2.52)$$

Untuk memudahkan perhitungan digunakan notasi berikut:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= nl \\ Q_2 &= \frac{n^2 l}{4} \\ Q_3 &= l \left(1 - \frac{n^2}{4} \right) \\ Q_4 &= 1 + \frac{n^2}{4} \\ Q_5 &= \frac{n^2}{4} \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

Persamaan 2.52 dan 2.53 menjadi:

$$x = Q_1 \cos \theta + Q_2 \cos 2\theta + Q_3 \quad (2.54)$$

Dimana ω adalah kecepatan rotasi *crankshaft*. Kecepatan piston didapat dengan menurunkan persamaan 2.54

$$v_p = -\omega Q_1 \cos \theta - \omega 2 Q_2 \cos 2\theta \quad (2.55)$$

Dan percepatan piston:

$$a_p = -\omega^2 Q_1 \cos \theta - \alpha Q_1 \sin \theta - 4\omega^2 Q_2 \cos 2\theta - 2\alpha Q_2 \sin 2\theta \quad (2.56)$$

Dari persamaan 2.56 dan Taylor series, maka didapat:

$$\lambda = n\omega \cos \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) \quad (2.57)$$

$$\eta = n\alpha \cos \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) - n\omega^2 \sin \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) + 2nQ_5 \omega^2 \cos \theta \sin 2\theta \quad (2.58)$$

Dimana λ adalah kecepatan rotasi *connecting rod* dan η adalah percepatan rotasi *connecting rod*.

Sekarang, kecepatan dan percepatan pusat massa *connecting rod* dapat dihitung.

Percepatan *connecting rod* adalah :

$$\vec{a}_g = \vec{a}_p + \vec{a}_{g/p} \quad (2.59)$$

Dimana $\vec{a}_{g/p}$ adalah vector percepatan relatif pusat massa *connecting rod* terhadap piston, lalu :

$$\vec{a}_{g/p} = \vec{\eta} \times \vec{r}_{g/p} + \vec{\lambda} \times (\vec{\lambda} \times \vec{r}_{g/p}) \quad (2.60)$$

Dimana $r_{g/p}$ adalah vector perpindahan relatif pusat massa conrod terhadap piston, maka :

$$\vec{r}_{g/p} = s(-i \cos \beta + j \sin \beta) = (-e(Q_3 + Q_2 \cos 2\theta))i + (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta)j \quad (2.61)$$

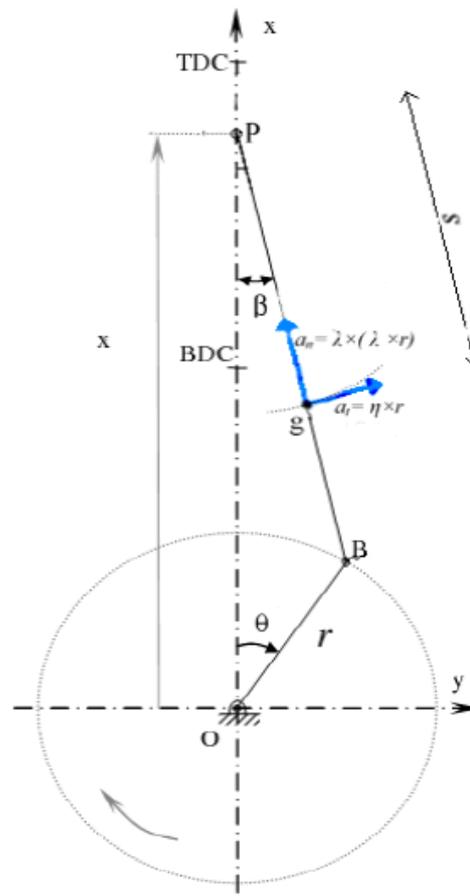
Dimana s adalah jarak antara pusat massa conrod dan piston dan $e = s/l$. untuk percepatan vertical pusat massa adalah :

$$a_{cx} = (-\omega^2 Q_1 \cos \theta - \alpha Q_1 \sin \theta - 4\omega^2 Q_2 \cos 2\theta - 2\alpha Q_2 \sin 2\theta - (-n\alpha \cos \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) + n\omega^2 \sin \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) - \frac{1}{2}n^3 \omega^2 \cos \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta)^2 e(Q_3 + Q_2 \cos 2\theta)))\vec{i} \quad (2.62)$$

Dan untuk percepatan horizontalnya :

$$\begin{aligned}
 a_{cy} = & \\
 & \left(- \left(n\alpha \cos \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) + n\omega^2 \sin \theta (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta) - \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{1}{2} n^3 \omega^2 \cos \theta \sin 2\theta \right) e(Q_3 + Q_2 \cos 2\theta) - \right. \\
 & \left. n^2 \omega^2 (\cos \theta)^2 (Q_4 - Q_5 \cos 2\theta)^2 e Q_1 \sin \theta \right) \vec{j} \quad (2.63)
 \end{aligned}$$

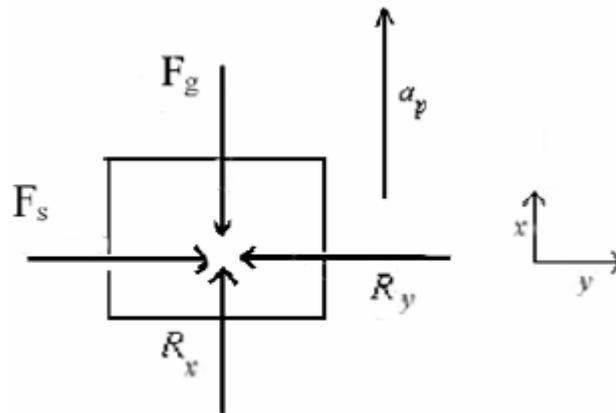
Gambar 2.22 merupakan proyeksi percepatan *connecting rod*,



Gambar 2.22 Percepatan *connecting rod* [15].

2.5.2 Kinetika pada Mekanisme *Slider-Crank*

Analisa kinetika dimulai dari piston, karena pada mekanisme *slider-crank* piston merupakan komponen pertama yang bergerak. Gambar 2.23 memperlihatkan diagram gaya pada piston,



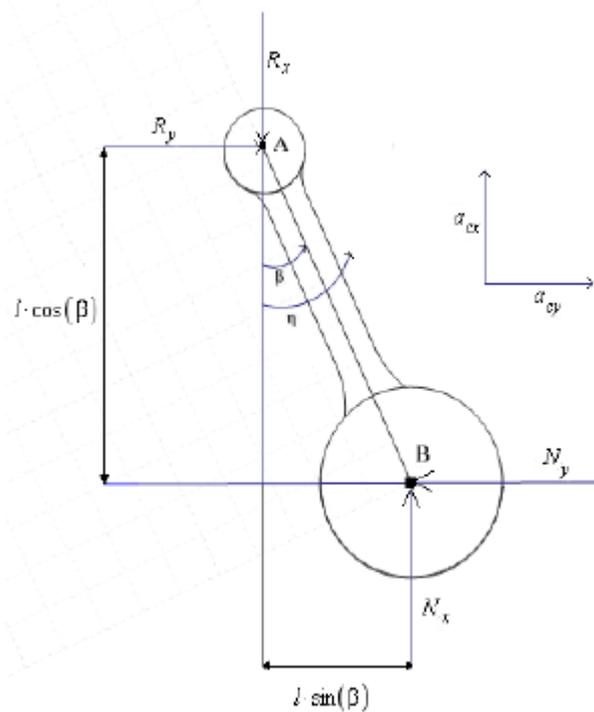
Gambar 2.23 Diagram gaya piston [15].

Didapat persamaan

$$\sum F_x = m_p a_p \quad (2.64)$$

$$R_x = F_g - m_p a_p \quad (2.65)$$

Gambar 2.24 memperlihatkan diagram gaya dari *connecting rod*,



Gambar 2.24 Diagram gaya *connecting rod* [15].

Didapat:

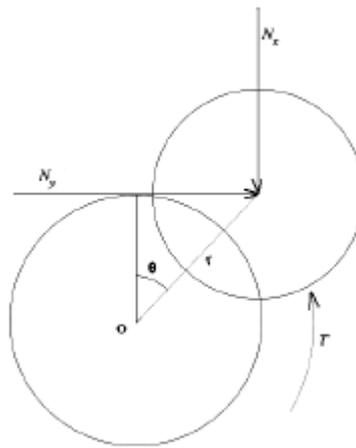
$$\sum F_x = m_c a_{cx}$$

$$N_x - R_x = m_c a_{cx} \quad (2.66)$$

$$N_x = R_x + m_p a_p + m_c a_{cx} \quad (2.67)$$

2.5.3 Torsi Mekanisme *Slider-Crank 4-Silinder In-Line*

Torsi mesin dapat dicari dengan melihat gambar 2.25,



Gambar 2.25 Diagram gaya *crankshaft* [15].

Didapat:

$$T = N_x r \sin \theta + N_y r \cos \theta \quad (2.68)$$

Untuk N_y ,

$$\sum M_A = I_A \eta \quad (2.69)$$

$$N_y = \frac{N_x r \sin \theta - I_A \eta}{Q_3 + Q_2 \cos 2\theta} \quad (2.70)$$

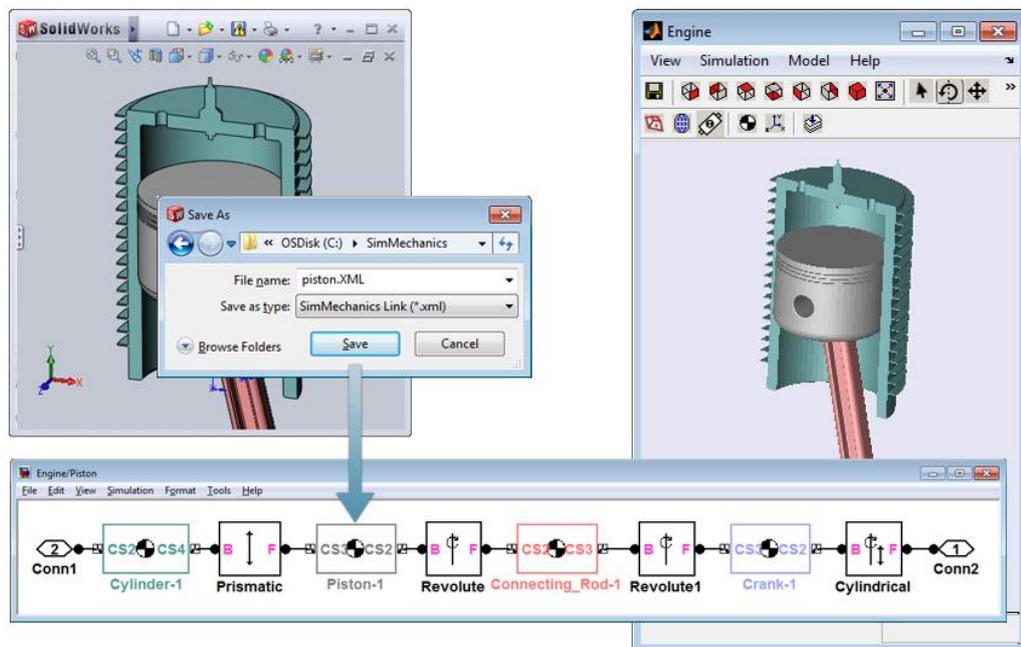
Dimana I_A adalah inersia dari *connecting rod*. Dan untuk torsi *crankshaft*nya adalah :

$$T_C = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2.71)$$

2.6 Software Simmechanic

Simmechanic adalah software yang merupakan bagian dari software Matlab-Simulink sub bagian dari Simscape. Simmechanic menyediakan lingkungan simulasi *multibody* untuk sistem mekanik 3D, seperti robot, kendaraan suspensi, peralatan konstruksi, dan peralatan pesawat mendarat. Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem *multibody* menggunakan blok yang mewakili tubuh, sendi, kendala, dan unsur-unsur kekuatan, dan kemudian SimMechanics merumuskan dan memecahkan persamaan gerak untuk sistem mekanik lengkap. Model dari sistem CAD, termasuk massa, inersia, bersama, kendala, dan geometri 3D, dapat diimpor ke SimMechanics lalu divisualisasikan dinamika sistemnya melalui animasi 3D secara otomatis [16].

Seperti gambar 2.26 merupakan salah satu contoh cara meng-import gambar CAD kedalam blok Simmechanic.



Gambar 2.26 Contoh pengkonversian gambar 3D ke dalam simmechanic [16].