

## 2. STUDI LITERATUR

### 2.1. Sistem Suspensi

#### 2.1.1. Jenis-Jenis Sistem Suspensi

Sistem suspensi dalam mobil merupakan sistem suspensi yang umumnya terdiri dari pegas *coil* dan peredam hidrolis, menyambungkan sasis dengan roda jalan, menjaga keselamatan kendaraan dan performa berkendara (Yu et al., 2024). Fungsi dari sistem suspensi adalah untuk menopang berat kendaraan, memisahkan badan kendaraan dari gangguan di jalan, serta menjaga agar traksi antara ban dan permukaan jalan tetap terjaga (Yu et al., 2006). Pada dunia otomotif Sistem suspensi umumnya dibagi menjadi tiga jenis yaitu pasif, semi-aktif, dan aktif. Perilaku dinamis kendaraan ditentukan oleh sifat pegas dan peredam dalam suspensi pasif. Suspensi semi-aktif menggunakan peredam yang dapat diubah, sedangkan pada suspensi aktif yang pertama kali muncul pada awal 1950-an, sistem kontrol elektronik mengawasi bagaimana elemen-elemen suspensi bekerja (Youness & Lobusov, 2019).

Sistem suspensi mobil terdiri dari beberapa komponen yang penting. Pertama, ada link-link kaku seperti *wishbone* dan *tie rod*, yang menentukan jenis suspensi yang digunakan (MacPherson, multi-link, dll.) dan menghubungkan suspensi dengan bagian bawah mobil melalui sendi dengan bantalan. Selain itu, ada juga pegas, *anti-rollbars*, dan peredam kejut yang memberikan kekakuan dan redaman yang diperlukan untuk kenyamanan dan stabilitas berkendara. Terakhir, ada aktuator yang bisa dikontrol, digunakan dalam suspensi aktif atau semi-aktif, yang bisa menggantikan beberapa komponen pasif dan memungkinkan penyesuaian dinamis suspensi (Genta & Morello, 2009). Meskipun kebanyakan mobil hanya menggunakan link kaku dan komponen pegas serta peredam kejut untuk suspensi pasif, semakin banyak mobil produksi dilengkapi dengan suspensi semi-aktif atau aktif, yang memberikan kemampuan penyesuaian yang lebih baik untuk kinerja berkendara yang optimal (Theunissen et al., 2021). Hal tersebut terjadi karena sistem suspensi pasif yang banyak digunakan dalam kendaraan tidak mampu secara efektif mengurangi getaran kendaraan dalam berbagai kondisi operasional (Yu et al., 2006).

Suspensi semi-aktif mirip dengan suspensi pasif, hanya saja memiliki perbedaan pada koefisien redaman yang dapat berubah-ubah, ditambah dengan pegas tetap, dan tidak menggunakan sumber daya aktif tambahan. Dengan perangkat semacam ini, beralih dari penggunaan peredam pasif dengan koefisien redaman semi-aktif dapat dilakukan dengan lancar

(Jiregna & Sirata, 2020). Sesuai dengan kalimat sebelumnya dalam sistem suspensi semi-aktif, gaya yang dihasilkan selalu bertentangan dengan gerakan aktuator, sehingga aktuator berfungsi sebagai peredam dengan karakteristik kecepatan-kekuatan yang dapat berubah-ubah. Hal ini memiliki dampak besar terhadap kinerja yang dapat dicapai oleh sistem ini; misalnya, suspensi semi-aktif tidak dapat mengontrol ketinggian kendaraan, sudut miring dalam kondisi penjuror tetap, atau sudut *pitch* yang muncul akibat percepatan longitudinal. Namun, sistem suspensi semi-aktif dapat diimplementasikan menggunakan perangkat keras dengan konsumsi daya rendah. Ini berarti mereka memerlukan daya hanya untuk menggerakkan perangkat modulasi, bukan untuk menghasilkan gaya aktuator secara langsung, sehingga tidak berdampak besar pada konsumsi energi kendaraan secara keseluruhan (Theunissen et al., 2021).

Jenis-jenis aktuator semi-aktif yaitu, Peredam kejut hidrolik dengan area *orifice* yang dapat dikontrol diimplementasikan melalui penggunaan katup solenoid atau katup servo (Faraj et al., 2019; Savaresi et al., 2010). Selain itu, ada peredam *magnetorheological* (MR) dan *electrorheological* (ER) yang terdiri dari piston dengan katup dan silinder hidrolik yang berisi cairan MR atau ER. Sifat cairan ini dapat berubah sesuai dengan medan magnetik atau listrik yang diberikan, karena adanya partikel polarisasi berukuran mikron. Implementasi ini tidak memiliki bagian yang bergerak, sehingga sangat andal secara mekanik (Savaresi et al., 2010). Ada juga peredam elektromagnetik yang menggunakan interaksi antara gerakan kumparan dengan medan magnet dari magnet permanen atau elektromagnet untuk memberikan efek redaman. Tingkat redaman dapat disesuaikan dengan mengubah resistansi eksternal atau kekuatan medan magnet (Soliman & Kaldas, 2019).

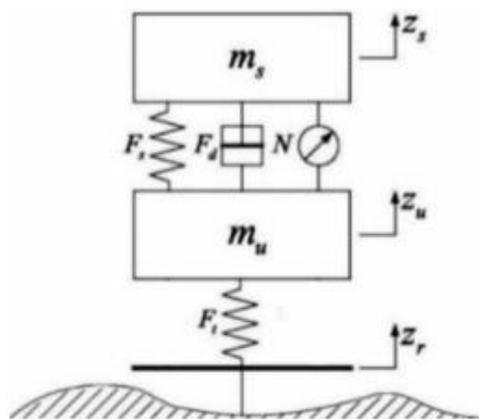
Pada sistem suspensi aktif, gaya yang dihasilkan oleh aktuator tidak bergantung pada arah atau kecepatan gerakan aktuator, yang memiliki manfaat besar dalam hal kinerja. Fungsi ini memungkinkan kompensasi terhadap gerakan *roll*, *pitch*, dan *heave* dari badan kendaraan yang disebabkan oleh percepatan lateral dan longitudinal, serta mengontrol tinggi kendaraan, seperti mengurangnya saat beroperasi dengan kecepatan tinggi untuk mengurangi drag aerodinamis dan konsumsi energi. Namun, untuk menghasilkan kerja mekanis positif diperlukan *input* daya yang cukup besar, serta penggunaan perangkat konversi daya seperti pompa hidrolik dan motor listrik, yang dapat memengaruhi konsumsi energi secara keseluruhan (Theunissen et al., 2021). Parameter kinerja yang paling menarik untuk dipertimbangkan saat merancang sistem suspensi kendaraan adalah kenyamanan berkendara, gerakan bodi kendaraan, pengendalian terhadap jalan, dan kinerja suspensi. Kenyamanan berkendara terkait dengan percepatan yang dirasakan oleh penumpang antara lain gerakan bodi kendaraan meliputi loncatan, *pitch*, dan *roll*

dari massa tergantung; penanganan jalan terkait dengan gaya kontak ban dan permukaan jalan; dan perjalanan suspensi didefinisikan sebagai perpindahan antara massa tergantung dan massa tak tergantung (Youness & Lobusov, 2019).

### 2.1.2. Active Suspension

Suspensi aktif dilengkapi dengan sistem kontrol elektronik yang mengatur aktivitas komponen suspensi. Sebagai contoh suspensi aktif, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2.1, terdiri dari aktuator, pegas mekanis, dan peredam kejut. Tugas dari aktuator tersebut adalah menghasilkan gaya penopang untuk memisahkan badan kendaraan dari gangguan jalan. Aktuator dalam sistem suspensi aktif memungkinkan suspensi menyerap energi percepatan roda, sehingga meminimalkan percepatan tubuh kendaraan (Jiregna & Sirata, 2020).

Sistem ini sangat responsif terhadap gaya vertikal yang timbul akibat perubahan akses jalan yang tidak terduga, karena gaya aktuator mengontrol kedua peredam kejut. Aktuator ini berfungsi dengan menghasilkan atau mendistribusikan daya sistem dan dapat diatur oleh berbagai jenis pengontrol, tergantung pada desain yang tersedia. Suspensi aktif mampu menciptakan keseimbangan yang lebih baik antara kenyamanan kendali kendaraan dan stabilitas berkendara, menghasilkan desain suspensi yang lebih optimal dengan metode kontrol yang sesuai (Jiregna & Sirata, 2020).



Gambar 2.1 Contoh model *free body diagram* dari sistem suspensi aktif

Sumber: Jiregna, I., & Sirata, G. (2020). A review of the vehicle suspension system. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4(44), 2, 109-114.

Deskripsi matematis persamaan gerak untuk sistem suspensi aktif diperoleh dari hukum gerak Newton. Dalam hukum ini, gaya total ( $F$ ) yang diterapkan pada massa tak terjepit (*unsprung*) dan massa terjepit (*sprung*) sama dengan produk massa mereka dan percepatan. Dengan demikian, ekspresi matematis sistem suspensi aktif terjepit dan tak terjepit dapat dirumuskan sebagai berikut (Jiregna & Sirata, 2020).

Untuk kasus masa terjepit:

$$\sum Fm_s = m_s \ddot{z}_s. \quad (2.1)$$

$$\sum Fm_s = F_d(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + F_s(z_u - z_s), \quad (2.2)$$

$$m_s \ddot{z}_s + F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_s(z_s - z_u) = 0, \quad (2.3)$$

Untuk kasus masa tidak terjepit:

$$\sum Fm_u = m_u \ddot{z}_u. \quad (2.4)$$

$$\sum Fm_s = F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_s(z_s - z_u) - F_t(z_u - z_r), \quad (2.5)$$

$$m_u \ddot{z}_u - F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - F_s(z_s - z_u) + F_t(z_u - z_r) = 0, \quad (2.6)$$

Dimana:

$z_s$  = Perpindahan vertikal massa terjepit (m),

$z_u$  = Perpindahan vertikal massa tak terjepit (m),

$z_r$  = Perpindahan vertikal akibat *input* jalan (m),

$m_s$  = Massa terjepit (kg),

$m_u$  = Massa tak terjepit (kg),

$F_s$  = Kekakuan pegas (kN/m),

$F_t$  = Kekakuan ban (kN/m),

$F_d$  = Koefisien redaman antara massa terjepit dan tak terjepit (kN.s/m),

$F_b$  = Koefisien redaman antara jalan dan massa tak terjepit (kN.s/m).

Beberapa peneliti baru-baru ini telah menginvestasikan waktu dan usaha dalam sistem suspensi aktif untuk meningkatkan stabilitas dan kemampuan mengemudi kendaraan. Hingga saat ini, banyak pendekatan kontrol telah digunakan dalam bidang sistem suspensi aktif, seperti

*Linear Quadratic Regulator (LQR), Linear Quadratic Gaussian (LQG), Adaptive Sliding Control (ASC), Fuzzy Logic (FL), Neural Network (NN)* dan masih banyak lagi metode kontrol yang dapat membantu meningkatkan kinerja sistem suspensi aktif (Youness & Lobusov, 2019). Oleh karena itu, sebagian besar peneliti telah mengakui bahwa jenis sistem suspensi aktif ini merupakan salah satu cara terbaik untuk meningkatkan kinerja keseluruhan karena kemampuannya untuk mengelola berbagai parameter (Na et al., 2020). Namun, ini adalah metode yang kompleks dan mahal yang hanya diterapkan pada sedikit model mobil penumpang atau truk berkualitas tinggi untuk penggunaan spesifik sistem ini.

#### **2.1.2.1. Air Type Adjustable Suspension**

*Air type adjustable suspension* (suspensi udara) adalah sistem di mana pegas udara atau kantong udara digunakan sebagai pengganti pegas logam (koil atau daun) untuk menopang kendaraan pada porosnya dengan pengaturan khusus kantong udara (Kumar, 2022). Sistem suspensi udara aktif merupakan sistem yang dikendalikan secara elektronik untuk menyesuaikan tinggi dan posisi kendaraan dengan mengembang dan mengempiskan pegas udara untuk melindungi bodi kendaraan di jalan bergelombang dan mengurangi hambatan udara. Saat digunakan bersama dengan peredam cairan *magnetoreologis*, sistem AAS lebih efektif dalam meningkatkan kenyamanan berkendara dan kemampuan *manuver* kendaraan dalam kondisi mengemudi yang kompleks dibandingkan dengan suspensi pasif dan semi-aktif konvensional (Zhao et al., 2023).

#### **2.1.2.2. Hydraulic or Pneumatic Active Suspensions**

*Hydraulic adjustable suspension* adalah sistem suspensi yang dapat disesuaikan ketinggian dan tingkat kekerasannya secara hidrolik mengacu pada suspensi yang dapat menyesuaikan diri sesuai dengan kecepatan dan kondisi jalan. Suspensi ini beroperasi dengan cara mengatur ketinggian sasis mobil melalui peningkatan atau penurunan minyak hidrolik. Inti dari sistem suspensi yang dapat disesuaikan secara hidrolik ini adalah modul terpadu elektronik dan hidrolik yang tertanam. Modul ini mampu mengolah informasi seperti data kecepatan kendaraan, frekuensi, dan derajat getaran dari *dampers*. Terdapat sensor akselerasi longitudinal dan lateral, serta sensor giroskopik pendulum horizontal yang terpasang di sekitar pusat gravitasi kendaraan untuk mengumpulkan sinyal tentang getaran tubuh, detak roda, tinggi tubuh, dan keadaan miring (Ding et al., 2019). Sinyal-sinyal ini dikirimkan ke komputer pengemudi, dan komputer dapat bekerja berdasarkan sinyal masukan dan program yang telah

ditetapkan untuk mengendalikan empat silinder penggerak. Dengan memanfaatkan kontrol adaptif, sistem dapat memperkirakan dan menyesuaikan parameter yang tidak pasti dalam *electro-hydraulic actuator*, termasuk kebocoran atau karakteristik nonlinier, sehingga dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi kendaraan (Liu et al., 2020).

### **2.1.2.3. Electromagnetic Adjustable Suspension**

*Electromagnetic adjustable suspension* adalah sistem suspensi aktif yang dapat diatur secara elektromagnetik dengan menggunakan respons elektromagnetik untuk meningkatkan ketinggian sasis mobil. Menurut kondisi jalan, suspensi ini dapat bereaksi dalam waktu 1 ms, menahan getaran, dan menjaga stabilitas tubuh kendaraan. Terutama, suspensi ini dapat menunjukkan keunggulannya dalam kondisi kecepatan tinggi dan ketika menghadapi beberapa rintangan. Kecepatan reaksi suspensi yang dapat diatur secara elektromagnetik ini lima kali lebih cepat dibandingkan dengan suspensi tradisional, bahkan di jalan yang penuh guncangan, dapat memastikan kendaraan tetap berjalan lancar (Ding et al., 2019).

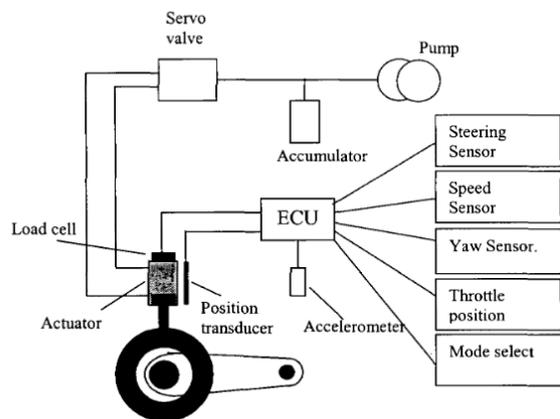
Kelebihan dari sistem ini mencakup kemampuan penyesuaian otomatis yang dapat meningkatkan kenyamanan berkendara, respons yang cepat terhadap perubahan kondisi jalan, dan kemampuan pengaturan yang lebih besar bagi pengemudi. Namun, kelemahan melibatkan biaya produksi yang lebih tinggi, penambahan berat pada kendaraan, dan perawatan yang kompleks karena kompleksitas teknologi elektronik yang terlibat. Meskipun memiliki kekurangan, sistem suspensi elektromagnetik yang dapat disesuaikan memberikan peningkatan yang signifikan dalam kinerja dan kenyamanan berkendara, dan keputusan untuk mengadopsinya harus mempertimbangkan manfaatnya terhadap biaya dan kompleksitas yang terkait.

### **2.1.3. Komponen Sistem Suspensi Aktif Sederhana**

Sebuah sistem suspensi yang sepenuhnya aktif merupakan sebuah sistem yang kompleks dengan menggunakan berbagai komponen penting. Komponen-komponen tersebut diantaranya adalah silinder hidrolik atau aktuator yang bertanggung jawab sebagai pembawa beban utama dan pompa hidrolik dengan *output* variabel hingga 4 galon per menit yang digunakan untuk mengatur tekanan dan aliran fluida dalam sistem utama suspensi aktif. Komponen selanjutnya yang tidak kalah penting yaitu sensor-sensor yang dipasang untuk mendeteksi tinggi pegas serta gerakan tubuh mobil dalam segala arah. Dengan adanya sensor, sistem suspensi aktif dapat merespons perubahan permukaan jalan dan kondisi pengemudi

secara *real-time*. Sistem ini juga dilengkapi dengan satu atau dua mikroprosesor sebagai unit kontrol yang mengoordinasikan operasi keseluruhan sistem. Setiap unit roda memiliki katup kontrol aliran dan kontrol tekanan hidroliknya sendiri untuk memastikan responsifitas yang optimal. Selain itu, satu atau lebih akumulator hidrolik digunakan untuk menyimpan energi dan mengurangi beban pompa hidrolik. Semua komponen ini dihubungkan oleh saluran hidrolik, yang memungkinkan aliran cairan silikon khusus dengan karakteristik yang tepat di bawah berbagai kondisi suhu, memastikan kinerja sistem yang optimal dalam semua situasi (Quiroz & Alfonso, 2003).

#### 2.1.4. Pengoperasian Sistem Suspensi Aktif Sederhana



Gambar 2.2 Skema umum sistem suspensi aktif sederhana

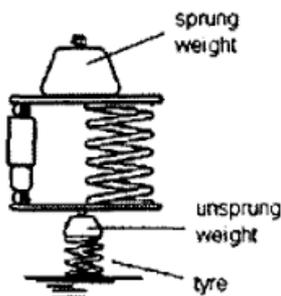
Sumber: Quiroz, M., & Alfonso, J. (2003, December 16). *Study of the active suspension impact in compat/sportive vehicles performance*. Institution Tecnológico de Monterrey, p. 9.

Sistem suspensi aktif bekerja ketika sensor-sensor mendeteksi peningkatan tekanan atau gerakan suspensi ke atas roda saat melewati gundukan, sistem secara otomatis mengurangi tekanan dalam aktuator. Hal ini bertujuan untuk secara signifikan mengurangi getaran yang dirasakan oleh pengemudi dan juga penumpang, serta mengurangi gerakan tubuh mobil pada gerakan ke atas, gerakan *pitch*, maupun gerakan *roll*. Saat roda mengatasi gundukan atau cekungan di jalan, cairan dipompa kembali ke dalam aktuator untuk mencegah terjadinya gerakan tubuh mobil ke bawah secara tiba-tiba. Salah satu sistem bahkan memiliki kecepatan respons yang luar biasa, mampu mengatur tekanan dalam aktuator dari tingkat nol hingga mencapai tekanan penuh dalam waktu sepersepuluh detik saja bahkan penelitian baru-baru ini

mampu membuat sistem suspensi aktif yang jauh lebih canggih. Selain itu, penting untuk dicatat bahwa setiap aktuator dikendalikan secara terpisah untuk mengoptimalkan pengendalian terhadap guncangan yang berbeda (lihat Gambar 2.2) (Quiroz & Alfonso, 2003).

#### 2.1.5. Perbedaan *Sprung* dan *Unsprung Weight*

Dari Gambar 2.3 dapat di lihat berat *unsprung weight* dari sebuah kendaraan merupakan berat total dari komponen-komponen seperti ban, rem, suspensi, dan elemen lain yang bergerak bersama-sama dengan roda. Semua komponen ini terletak di sisi jalan raya dari pegas suspensi, yang berarti mereka langsung berinteraksi dengan permukaan jalan dan merespons ketidakrataan yang ada. Di sisi lain, berat *sprung* adalah berat yang terletak di sisi sasis kendaraan dari pegas, yang meliputi berat dari bagian utama kendaraan seperti rangka, mesin, kabin, dan penumpang. Penting untuk dicatat bahwa perbandingan antara berat *sprung* dan *unsprung* merupakan salah satu faktor paling vital dalam menentukan karakteristik perjalanan dan penanganan kendaraan secara keseluruhan (Quiroz & Alfonso, 2003).



Gambar 2.3 Representasi getaran dari sebuah mobil

Sumber: Quiroz, M., & Alfonso, J. (2003, December 16). *Study of the active suspension impact in compat/sportive vehicles performance*. Institution Tecnológico de Monterrey, p. 9.

#### 2.2. Computer Tools

Analisis sistem pada era modern sudah sering memanfaatkan komputer digital untuk mempermudah proses pemodelan sistem yang kompleks serta menyelesaikan persamaan pemodelan yang dihasilkan. Saat ini sudah terdapat perangkat lunak atau program yang menyediakan teknik numerik yang baik untuk mensimulasikan berbagai macam fungsi *input*, menyelesaikan persamaan diferensial, dan memplot serta menganalisis hasilnya. Ini memungkinkan peneliti untuk mengembangkan model sistem dinamis yang kompleks dan

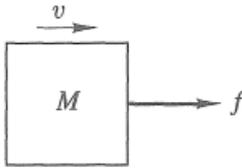
mengkaji responsnya. Dalam proses desain, dampak pemilihan nilai komponen yang berbeda dapat dengan mudah diamati.

Pada penelitian ini peneliti menggunakan perangkat lunak berupa MATLAB dan Simulink. MATLAB adalah program komputer interaktif yang berfungsi sebagai "laboratorium" yang praktis untuk perhitungan yang melibatkan matriks. Program ini menyediakan akses mudah ke perangkat lunak matriks yang dikembangkan oleh proyek LINPACK dan EISPACK (Moler & Little, 2020). MATLAB digunakan untuk merancang dan memodelkan sistem tertanam, yaitu pengontrol yang memiliki fungsi waktu nyata spesifik dalam sistem elektrik atau mekanik yang lebih besar. Pengontrol ini biasanya hanya menggunakan aritmatika titik mengambang tunggal atau titik tetap. Para perancang sistem tertanam ingin mengembangkan algoritma mereka dengan menggunakan aritmatika bawaan dari prosesor target. Keinginan ini mendorong MATLAB untuk menambahkan beberapa tipe data baru, namun tanpa perlu menggunakan deklarasi tipe secara eksplisit. MATLAB mendukung pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamis *linear* dan *non-linear* (Eshkabilov, 2022). Simulink menyediakan antarmuka pengguna grafis (GUI) untuk membangun model sebagai blok diagram, dengan menggunakan operasi *click-and-drag* menggunakan *mouse* (Chaturvedi, 2017). Di dalam perangkat Simulink terdapat berbagai blok-blok atau komponen-komponen, komponen *linear* dan *non-linear*, dan konektor yang dapat digunakan untuk membantu perhitungan maupun analisa teknis.

### **2.3. Element Laws**

Alat fisik digambarkan oleh satu atau lebih elemen ideal yang mengikuti prinsip-prinsip tertentu yang melibatkan variabel yang terkait dengan alat tersebut. Representasi sebuah alat memerlukan tingkat pendekatan tertentu dalam pemilihan elemen, dan perilaku elemen-elemen yang digunakan mungkin tidak secara akurat mencerminkan perilaku alat sebenarnya. Dalam sistem translasional, elemen-elemen yang digunakan meliputi massa, gesekan, kekakuan, dan tuas. Hukum-hukum yang mengatur elemen-elemen pertama tersebut berkaitan dengan gaya eksternal yang memengaruhi percepatan, kecepatan, atau pergeseran yang terkait dengan elemen tersebut (Close et al., 2001).

### 2.3.1. Mass



Gambar 2.4 Arah acuan

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 16.

Gambar 2.4 menunjukkan sebuah massa  $M$ , yang memiliki satuan kilogram (kg), yang dikenai oleh sebuah gaya  $f$  (Close et al., 2001). Hukum kedua Newton menyatakan bahwa jumlah gaya yang bekerja pada suatu benda sama dengan laju perubahan momentum terhadap waktu:

$$\frac{d}{dt}(Mv) = f \quad (2.7)$$

Untuk yang masanya konstan persamaan 2.7 dapat dituliskan sebagai:

$$M \frac{dv}{dt} = f \quad (2.8)$$

Agar persamaan (2.7) dan persamaan (2.8) berlaku, momentum dan percepatan harus diukur dengan mengacu pada suatu bingkai referensi inersia. Untuk sistem umum yang berada di atau dekat permukaan bumi, permukaan bumi dianggap sebagai pendekatan yang sangat dekat dengan kerangka referensi inersia, sehingga itulah yang digunakan sebagai kerangka referensi. Momentum, percepatan, dan gaya sebenarnya merupakan vektor, tetapi dalam konteks ini, peneliti membatasi gerakan massa hanya dalam satu arah, sehingga peneliti dapat menuliskan persamaan dalam bentuk skalar (Close et al., 2001).

Jika ingin menggunakan persamaan (2.8) terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan yaitu pada massa yang konstan dan mengabaikan efek relativistik. Oleh karena itu, massa dapat dimodelkan dengan hubungan aljabar antara percepatan  $dv/dt$  dan gaya eksternal  $f$ . Agar persamaan (2.8) berlaku, arah positif baik  $dv/dt$  maupun  $f$  harus sama, karena gaya

akan menyebabkan kecepatan meningkat ke arah di mana gaya tersebut bekerja (Close et al., 2001).

Energi dalam massa disimpan sebagai energi kinetik jika massa bergerak, dan sebagai energi potensial jika massa mengalami perpindahan vertikal relatif terhadap posisi referensi. Energi kinetik adalah:

$$w_k = \frac{1}{2} M v^2 \quad (2.9)$$

Dan energi potensial, dengan asumsi medan gravitasi yang seragam, adalah:

$$w_p = Mgh \quad (2.10)$$

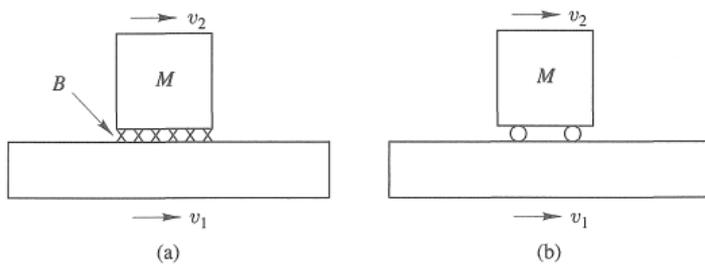
Di mana  $g$  adalah konstanta gravitasi (sekitar  $9.807 \text{ m/s}^2$  di permukaan bumi) dan  $h$  adalah ketinggian massa di atas posisi referensinya. Untuk menentukan respons pada  $t \geq t_0$  dari suatu sistem dinamis yang mengandung massa, peneliti harus mengetahui kecepatan awalnya  $v(t_0)$  dan, jika gerakan vertikal mungkin terjadi, ketinggian awalnya  $h(t_0)$  (Close et al., 2001).

### 2.3.2. *Friction*

Gaya yang merupakan fungsi aljabar dari kecepatan relatif antara dua benda dimodelkan oleh elemen gesek. Sebuah massa yang meluncur pada selaput minyak yang memiliki aliran laminar, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.5 (a), tunduk pada gesekan viskus dan mematuhi hubungan linier:

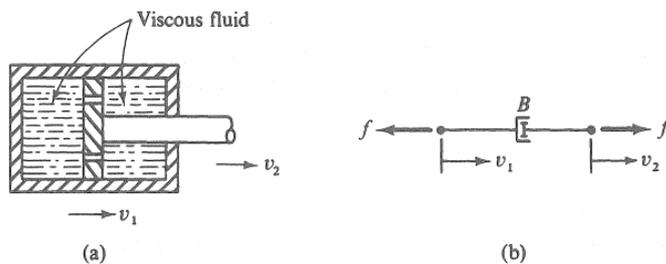
$$f = B\Delta v \quad (2.11)$$

Di mana  $B$  memiliki satuan newton-sekon per meter ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ) dan di mana  $\Delta v = v_2 - v_1$ . Arah gaya gesekan akan bertentangan dengan gerakan massa. Agar persamaan (2.11) berlaku untuk Gambar 2.5 (a), gaya  $f$  yang diberikan pada massa  $M$  oleh selaput minyak berada ke kiri. (Menurut hukum ketiga Newton, massa memberikan gaya  $f$  yang sama ke kanan pada selaput minyak.) (Close et al., 2001).



Gambar 2.5 (a) Gaya gesekan dijelaskan melalui persamaan  $\Delta v = v_2 - v_1$ . (b) bagian yang berdekatan dengan gesekan yang diabaikan

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 17.



Gambar 2.6 (a) Absorber. (b) Gambaran dari absorber

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 18.

Koefisien gesekan  $B$  berkaitan sebanding dengan luas kontak dan viskositas minyak, dan berbanding terbalik dengan ketebalan selaput. Massa yang lebih berat akan lebih menyusutkan selaput minyak, membuatnya lebih tipis dan meningkatkan nilai  $B$ . Terkadang gaya gesek pada benda-benda berdekatan yang memiliki gerakan relatif cukup kecil untuk diabaikan. Ini mungkin terjadi, misalnya, jika benda-benda tersebut dipisahkan oleh bantalan. Diagram untuk kasus seperti ini sering menunjukkan roda kecil di antara kedua benda, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.6 (b), untuk menekankan minimnya gaya gesek (Close et al., 2001).

### 2.3.3. Stiffness

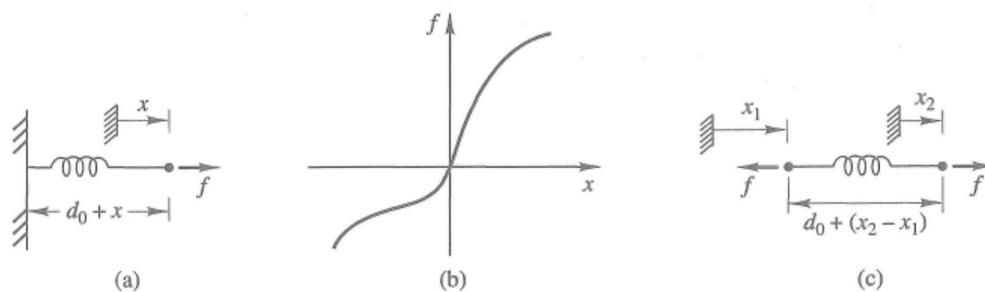
Setiap elemen mekanis yang mengalami perubahan bentuk ketika dikenai gaya dapat dicirikan oleh elemen kekakuan, asalkan hanya ada hubungan aljabar antara perpanjangan dan

gaya. Elemen kekakuan paling umum adalah pegas, meskipun sebagian besar elemen mekanis mengalami beberapa defleksi saat terkena tegangan. Untuk pegas yang digambarkan dalam Gambar 2.7 (a), peneliti tentukan  $d_0$  sebagai panjang pegas saat tidak ada gaya diterapkan dan  $x$  sebagai perpanjangan yang disebabkan oleh gaya  $f$ . Kemudian panjang total pada setiap instan adalah  $d(t) = d_0 + x$ , dan properti kekakuan merujuk pada hubungan aljabar antara  $x$  dan  $f$ , seperti yang digambarkan dalam Gambar 2.7 (b). Karena  $x$  telah didefinisikan sebagai perpanjangan dan plot menunjukkan bahwa  $f$  dan  $x$  selalu memiliki tanda yang sama, maka dapat disimpulkan bahwa arah positif dari  $f$  harus ke kanan dalam Gambar 2.7 (a); yaitu,  $f$  mewakili gaya tarik daripada gaya tekan. Untuk pegas linear, kurva dalam Gambar 2.7 (b) adalah garis lurus dan  $f = Kx$ , di mana  $K$  adalah suatu konstanta dengan satuan newton per meter (N/m) (Close et al., 2001).

Gambar 2.7 (c) menunjukkan pegas yang ujungnya digeser oleh jumlah  $x_1$  dan  $x_2$  relatif terhadap posisi referensi masing-masing. Jika  $x_1 = x_2 = 0$  sesuai dengan kondisi ketika tidak ada gaya yang diterapkan pada pegas, maka perpanjangan pada setiap instan adalah  $x_2 - x_1$ . Untuk pegas linear,

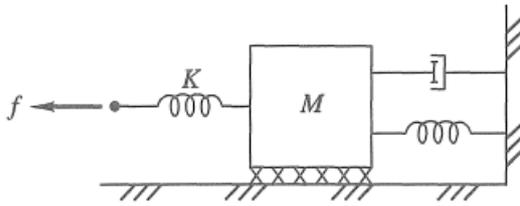
$$f = K\Delta x \tag{2.12}$$

di mana  $\Delta x = x_2 - x_1$ . Untuk perpanjangan kecil dari poros struktural,  $K$  berbanding lurus dengan luas penampang dan modulus Young dan berbanding terbalik dengan panjang (Close et al., 2001).



Gambar 2.7 Karakteristik dari per

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 19.



Gambar 2.8 Gaya yang disalurkan melalui sebuah per

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 20.

Ketika gaya  $f$  diterapkan pada satu sisi elemen kekakuan yang diasumsikan tidak memiliki massa, gaya sejajar namun berlawanan arah harus diberikan pada sisi lainnya. Dengan demikian, untuk sistem yang terlihat pada Gambar 2.8, gaya  $f$  melewati pegas pertama dan diberikan langsung pada massa  $M$  (Close et al., 2001).

#### 2.4. D'Alembert's Law

Hukum D'Alembert hanya merupakan pernyataan ulang dari hukum kedua Newton yang mengatur laju perubahan momentum. Untuk massa konstan, peneliti dapat menulis:

$$\sum_i (f_{ext})_i = M \frac{dv}{dt} \quad (2.13)$$

Di mana penjumlahan atas indeks  $i$  mencakup semua gaya eksternal  $(f_{ext})_i$  yang bekerja pada benda. Gaya dan kecepatan pada umumnya merupakan kuantitas vektor, tetapi dapat diperlakukan sebagai skalar asalkan gerakannya dibatasi untuk berada dalam suatu arah tetap. Persamaan (2.7) dapat ditulis menjadi:

$$\sum_i (f_{ext})_i - M \frac{dv}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

Menyarankan bahwa massa yang dimaksud dapat dianggap berada dalam keseimbangan, yaitu, jumlah gaya nol, asalkan istilah  $-M \frac{dv}{dt}$  dianggap sebagai gaya tambahan. Gaya fiktif ini disebut sebagai gaya inersia atau gaya D'Alembert, dan

menyertakannya bersama dengan gaya eksternal memungkinkan peneliti menuliskan persamaan gaya sebagai persamaan keseimbangan:

$$\sum_i f_i = 0 \quad (2.15)$$

Persamaan tersebut dikenal sebagai hukum D'Alembert. Tanda minus yang terkait dengan gaya inersia pada persamaan (2.14) menunjukkan bahwa ketika  $dv/dt > 0$ , gaya tersebut bekerja ke arah negatif (Close et al., 2001).

## 2.5. *State-Variable Equations*

Dalam membuat formula atau merumuskan model suatu sistem terdapat beberapa prosedur yang perlu dipahami salah satunya adalah dengan memulai dengan memilih seperangkat variabel keadaan (*state variables*). Seperangkat variabel ini harus sepenuhnya menjelaskan pengaruh sejarah masa lalu sistem terhadap responsnya di masa depan. Diperjelas bahwa variabel keadaan harus saling bebas. Artinya, tidak mungkin untuk menyatakan variabel keadaan apa pun sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan yang tersisa dan *input* (Close et al., 2001).

Dalam konteks ini, penting untuk memahami bahwa variabel keadaan harus bersifat independen, yang berarti tidak mungkin untuk menyatakan variabel keadaan mana pun sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan yang tersisa dan *input*. Variabel keadaan dalam sistem mekanikal umumnya berkaitan dengan energi yang disimpan di setiap elemen penyimpan energi sistem (*energy-storing elements*). Terkadang, jumlah variabel keadaan dalam suatu sistem berbeda dari jumlah elemen penyimpan energi karena interkoneksi khusus antar elemen menyebabkan variabel yang redundan atau karena ada kebutuhan untuk variabel keadaan yang tidak terkait dengan penyimpanan energi. Misalkan sistem memiliki  $n$  variabel keadaan (*state variables*),  $m$  *inputs*, dan  $p$  *outputs*. Setiap persamaan harus menyatakan turunan salah satu variabel keadaan sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan dan *input* (Close et al., 2001).

$$\dot{q}_1 = a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + a_{13}q_3 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 \quad (2.16)$$

$$\dot{q}_2 = a_{21}q_1 + a_{22}q_2 + a_{23}q_3 + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 \quad (2.17)$$

$$\dot{q}_3 = a_{31}q_1 + a_{32}q_2 + a_{33}q_3 + b_{31}u_1 + b_{32}u_2 \quad (2.18)$$

Keluaran yang menarik perhatian kemudian diungkapkan sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan dan *input* (Close et al., 2001). Misalnya, jika sistem *linear* yang dijelaskan oleh persamaan (2.16, 2.17, dan 2.18) memiliki dua keluaran, maka persamaan keluaran biasanya memiliki bentuk sebagai berikut:

$$y_1 = c_{11}q_1 + c_{12}q_2 + c_{13}q_3 + d_{11}u_1 + d_{12}u_2 \quad (2.19)$$

$$y_2 = c_{21}q_1 + c_{22}q_2 + c_{23}q_3 + d_{21}u_1 + d_{22}u_2 \quad (2.20)$$

Pada sistem *linear* tetap, semua koefisien yang diberikan oleh  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ , dan  $d_{ij}$  adalah konstan. Untuk sistem *linear* yang parameter-parameternya bervariasi seiring waktu, beberapa koefisien tersebut menjadi fungsi waktu. Hanya pada elemen *nonlinear*, beberapa koefisien itu sendiri dapat menjadi fungsi dari variabel keadaan atau *input*. Sebuah pengecualian yang jarang terjadi di mana turunan dari *input* harus muncul dalam persamaan (2.19 dan 2.20) akan diilustrasikan dalam salah satu contoh. Sebuah variabel keluaran mungkin identik dengan variabel keadaan, dalam hal ini (2.19 dan 2.20) dapat berisi satu atau lebih persamaan seperti  $y_i = q_i$ . Ketika semua *output* identik dengan beberapa variabel keadaan, (2.19 dan 2.20) menjadi sepele dan dapat diabaikan (Close et al., 2001).

Energi yang tersimpan dalam sistem mekanikal translasional harus terkait dengan massa atau pegas. Oleh karena itu, logis untuk mempertimbangkan kecepatan massa dan elongasi pegas sebagai variabel keadaan. Ketika menggambar diagram gaya bebas, peneliti berusaha menyatakan gaya dalam bentuk variabel keadaan dan *input*, dengan cara yang menghindari turunan yang tidak perlu. Oleh karena itu, peneliti biasanya memberi label gaya inersia dan gesekan dalam bentuk  $M\dot{v}$  dan  $Bv$ , bukan  $M\ddot{x}$  dan  $B\dot{x}$  (Close et al., 2001).

Pada sisa bagian ini, berbagai contoh mengilustrasikan teknik penurunan model matematis dalam bentuk variabel keadaan. Pendekatan umumnya adalah sebagai berikut:

1. Ketika mengidentifikasi variabel keadaan dan menuliskan persamaan variabel keadaan tidak diperlukan *free body diagrams*, seperti persamaan dalam bentuk  $\dot{x} = v$ .
2. Menggambar *free body diagrams* untuk setiap massa independen dan titik sambungan yang dapat bergerak dengan gerakan yang tidak diketahui. Jumlahkan gaya pada setiap *free body diagrams* secara terpisah untuk mendapatkan sejumlah persamaan diferensial.

3. Manipulasikan persamaan menjadi bentuk variabel keadaan. Untuk setiap variabel keadaan, harus ada persamaan yang menyatakan turunannya sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan, *input*, dan mungkin waktu.
4. Menyatakan variabel keluaran sebagai fungsi aljabar dari variabel keadaan, *input*, dan mungkin waktu. Dalam beberapa kasus yang tidak biasa, mungkin perlu ada turunan *input* di sisi kanan persamaan keluaran. Namun, sebaiknya hindari penggunaan turunan *input* bila memungkinkan.

## 2.6. State-space model

*State-space model* merupakan alat representasi matematis dari sistem dinamis dalam bentuk ruang vektor yang dapat menghasilkan *plant modeling*. *Plant modeling* itu sendiri adalah proses dari pembuatan replika digital dari tiap-tiap proses, sebuah peralatan, maupun alur kerja di dalam suatu pabrik atau Perusahaan. Variabel-variabel keadaan dari *state-space model* membentuk sebuah set dari variabel-variabel internal yang merupakan satu set lengkap, dalam arti bahwa, jika variabel-variabel ini diketahui pada suatu waktu, maka keluaran tanaman apa pun,  $y(t)$ , dapat dihitung, pada semua waktu di masa depan, sebagai fungsi dari variabel-variabel keadaan dan nilai-nilai saat ini serta masa depan dari *input* (Close et al., 2001).

*State-space model* adalah suatu representasi matematis dari sistem dinamis dalam bentuk ruang vektor. Model ini terdiri dari dua bagian utama yaitu variabel keadaan (*state variables*) dan persamaan keadaan (*state equations*). Persamaan gerak untuk sistem dinamis linear yang berdimensi terbatas merupakan sekumpulan dari beberapa persamaan diferensial orde dua sebanyak  $n$ , di mana  $n$  merupakan jumlah koordinat independen. Pada persamaan terdapat  $M$ ,  $R$ , dan  $K$  yang masing-masing merupakan matriks massa, redaman, dan kekakuan. Persamaan gerak dapat diungkapkan dalam notasi matriks sebagai berikut:

$$M\ddot{x}(t) + R\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (2.21)$$

Pada persamaan (2.21) terdapat  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ , dan  $x(t)$  yang masing-masing secara berurutan merupakan vector percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Sedangkan  $F(t)$  itu sendiri merupakan fungsi *force* dari hasil vektor-vektor tersebut. Di sisi lain, jika respons sistem dinamis diukur oleh  $m$  jumlah *output* dalam vektor *output*  $y(t)$ , maka persamaan *output* dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$y(t) = C_a \ddot{x}(t) + C_v \dot{x}(t) + C_d x(t) \quad (2.22)$$

Pada persamaan (2.22) terdapat  $C_a$ ,  $C_v$ , dan  $C_d$  yang masing-masing merupakan output dari percepatan, kecepatan, dan perpindahan (Close et al., 2001). Matriks ini menggambarkan hubungan antara vektor  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ , dan  $x(t)$  dan vektor pengukuran  $y(t)$ . Sedangkan  $z(t)$  merupakan vektor keadaan sistem:

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

### 2.6.1. *State-space model secara general*

Jika dinyatakan dengan  $x$  vektor yang sesuai dengan pilihan tertentu dari variabel keadaan, maka bentuk umum dari model variabel keadaan adalah sebagai berikut:

#### 2.6.1.1. Untuk Sistem Waktu Kontinu

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t) \quad (2.24)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (2.25)$$

#### 2.6.1.2. Untuk Sistem Waktu Diskrit

$$x[k + 1] = f_d(x[k], u[k], k) \quad (2.26)$$

$$y[k] = g_d(x[k], u[k], k) \quad (2.27)$$

Fakta bahwa keterbatasan ruang keadaan terstruktur mengelilingi persamaan differensial vektor pertama tingkat (lihat (2.24)) sering mengungguli solusi numerik untuk masalah kontrol. Hal ini terutama berlaku dalam kasus *linear* di mana upaya yang sangat besar telah dilakukan untuk menemukan cara yang numerik dan kokoh untuk menyelesaikan masalah kontrol yang terkait (Goodwin et al., 2000).

### 2.6.2. *Linear State Space Models*

Dinyatakan bahwa suatu sistem *linear* jika prinsip superposisi berlaku. Ini berarti jika kondisi awal  $x_{01}$  dan  $x_{02}$  menghasilkan respons  $h_{01}(t)$  dan  $h_{02}(t)$  masing-masing dengan

*input nol*, dan *input*  $u_1(t)$  dan  $u_2(t)$  menghasilkan respons  $h_{11}(t)$  dan  $h_{12}(t)$  masing-masing, dengan kondisi awal nol, maka respons terhadap *input*  $u_1(t) + u_2(t)$  dengan kondisi awal  $x_{01} + x_{02}$  adalah  $h_{01}(t) + h_{02}(t) + h_{11}(t) + h_{12}(t)$ .

Suatu sistem dikatakan invarian terhadap waktu jika respons terhadap *input* yang diterjemahkan dalam waktu adalah sekadar translasi waktu dari respons asli, yaitu jika *input*  $u_1(t)$  ( $\forall t \in R$ ) menghasilkan respons  $g_1(t)$  ( $\forall t \in R$ ), maka *input*  $u_2(t) = u_1(t + \tau)$  ( $\forall t \in R$ ) menghasilkan respons  $g_2(t) = g_1(t + \tau)$  ( $\forall t \in R$ ). Pada kasus *linear* dan invarian terhadap waktu, persamaan (2.28) dan (2.29) menjadi:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.28)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.29)$$

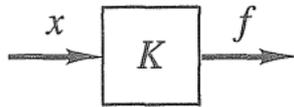
Di mana A, B, C, dan D adalah matriks dengan dimensi yang sesuai. Kami mengilustrasikan dengan membangun model ruang keadaan untuk sebuah jaringan listrik (Goodwin et al., 2000).

## 2.7. **Block Diagrams and Computer Simulation**

Dalam pembahasan ini, diperkenalkan dua bentuk utama persamaan pemodelan, yaitu *state-variable* dan *input-output*. Serta diperkenalkan alat yang sangat berguna untuk memecahkan persamaan ini dan mendapatkan respons suatu sistem terhadap berbagai *input*, yaitu komputer digital dengan menggunakan perangkat lunak simulasi numerik. Baik persamaan diferensial *linear* maupun *non-linear* dapat dipecahkan secara numerik dengan presisi tinggi dan kecepatan, memungkinkan perhitungan dan tampilan respons sistem untuk banyak fungsi *input*. Salah satu cara mudah untuk membuat antarmuka antara persamaan pemodelan sistem dan komputer digital adalah dengan menggunakan diagram blok yang dapat digambar dari persamaan diferensial sistem. Dengan bantuan perangkat lunak yang sesuai, diagram tersebut kemudian dapat digunakan untuk membuat program komputer yang memecahkan persamaan diferensial asli. Langkah awal adalah mendefinisikan komponen-komponen yang akan digunakan dalam diagram kami. Kami menggunakan bahasa komputasi bernama MATLAB dan antarmuka pengguna grafisnya, Simulink, untuk mendapatkan solusi dari diagram blok ini. Operasi yang umumnya digunakan dalam diagram blok adalah penjumlahan, *gain*, dan integrasi. Blok lain, termasuk elemen *non-linear* seperti perkalian, akar kuadrat, eksponensial, logaritma, dan fungsi lainnya, juga tersedia (Close et al., 2001).

### 2.7.1. Diagram Blocks

Diagram blok adalah interkoneksi blok yang mewakili operasi matematika dasar sedemikian rupa sehingga diagram keseluruhan setara dengan model matematika sistem. Dalam diagram tersebut, garis-garis yang menghubungkan blok-blok mewakili variabel-variabel yang menggambarkan perilaku sistem. Ini dapat berupa *input*, *output*, variabel keadaan, atau variabel terkait lainnya. Blok-blok tersebut mewakili operasi atau fungsi yang menggunakan satu atau lebih dari variabel-variabel ini untuk menghitung variabel lainnya. Sebagai contoh, gaya  $f$  yang dihasilkan oleh pegas dapat dihitung dari perpindahannya dengan mengalikan perpindahan  $x$  dengan konstanta pegas  $K$ . Dalam bentuk diagram blok, hal ini dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.9 (Close et al., 2001).

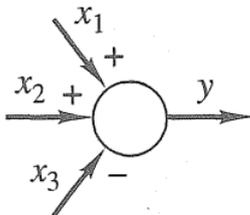


Gambar 2.9 Diagram blok yang mewakili persamaan  $f = Kx$

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 74.

#### 2.7.1.1. Summer

Penjumlahan dan pengurangan variabel diwakili oleh sebuah penjumlah, atau junction penjumlahan. Penjumlah biasanya digambarkan sebagai lingkaran atau persegi panjang yang memiliki sejumlah panah yang mengarah kepadanya (*input*) dan satu panah yang mengarah keluar dari sana (*output*). Sebagai contoh, sebuah penjumlah yang menghasilkan  $y = x_1 + x_2 - x_3$  ditunjukkan dalam Gambar 2.10 (Close et al., 2001).



Gambar 2.10 Penjumlahan dan pengurangan yang mewakili persamaan  $y = x_1 + x_2 - x_3$

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 74.

### 2.7.1.2. Gain

Perkalian variabel tunggal dengan suatu konstanta diwakili oleh *gain block*. Tidak ada batasan pada nilai penguatan, yang dapat bersifat positif, nol, atau negatif. Gambar 2.9 menunjukkan blok penguatan yang mengikuti hubungan  $f = Kx$  (Close et al., 2001).

### 2.7.1.3. Integrator

Pengintegrasian terhadap waktu dilakukan dalam blok integrator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a). *Output* dari integrator diberikan oleh

$$y(t) = y(0) + \int_0^t u(\lambda) d\lambda \quad (2.30)$$

Sehingga,

$$\dot{y}(t) = u(t) \quad (2.31)$$

Jika masukan ke blok ini adalah turunan dari  $y$  terhadap waktu, keluarannya harus menjadi  $y(t)$ . Ini ditunjukkan secara eksplisit pada Gambar 2.11 (b). Kondisi awal,  $y(0)$ , biasanya tidak ditunjukkan secara eksplisit dalam diagram blok, tetapi tetap penting dan harus ditentukan atau diasumsikan nol. Untuk saat ini, peneliti akan mengasumsikan kondisi awalnya nol (Close et al., 2001).

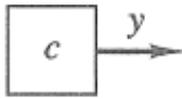


Gambar 2.11 Diagram blok untuk integrator

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 74.

### 2.7.1.4. Constant

Blok konstan pada Gambar 2.12 tidak memiliki masukan, dan keluarannya tidak pernah berubah. Seperti yang ditunjukkan, blok ini mengikuti hubungan  $y = c$  (Close et al., 2001).



Gambar 2.12 Diagram blok konstan

Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 75.

### 2.7.2. **Combining Blocks to Solve Modeling Equations**

Proses membuat gambar blok untuk model dalam bentuk *input-output* dapat dikembangkan dari awal yang sederhana ini (Close et al., 2001). Untuk sistem yang memiliki *output* satu dan tidak ada derivatif *input*, langkah-langkahnya sebagai berikut:

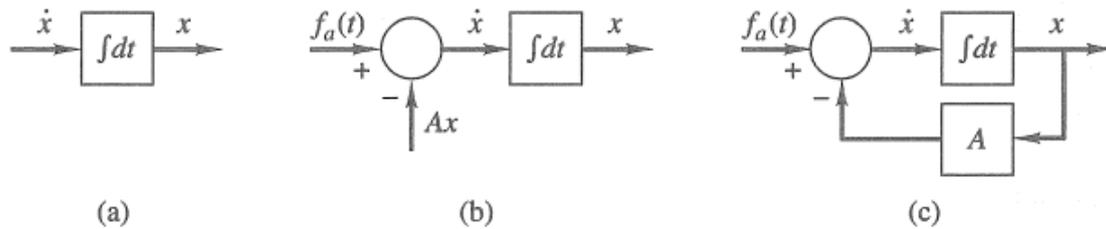
1. Solusi persamaan yang diberikan untuk derivatif *output* yang tertinggi yang tidak dikenal pasti.
2. Hubungkan blok integrator satu atau lebih secara seri untuk integrasi derivatif tersebut secara sukses sejumlah yang diperlukan untuk memproduksi variabel *output*.
3. Gunakan hasil langkah 1 untuk membentuk variabel *output* tertinggi sebagai *output* dari *summer* dan blok pengalahan. Signal yang masuk ke *summer* biasanya terdiri dari *output* dan derivatif-derivatifnya yang rendah, setiap disusun dengan konstan dan dengan tanda yang tepat. Ada juga sering ada term representasi *input*.

### 2.7.3. **Diagrams for Input-Output Equations**

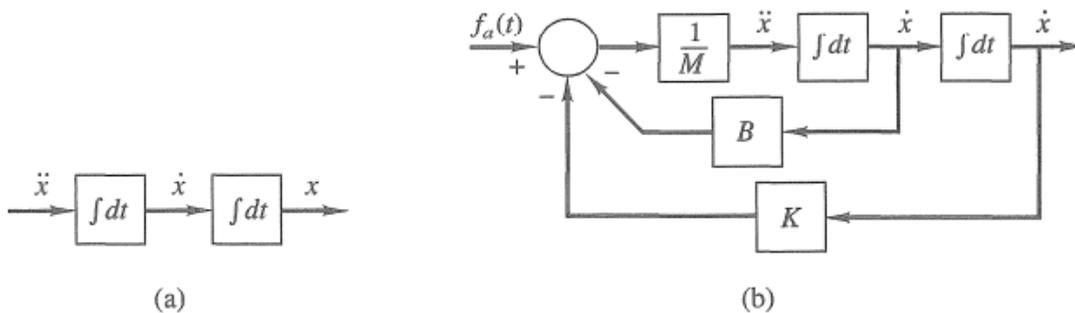
Proses pembuatan diagram blok untuk model dalam bentuk *input-output* dapat dimulai dari langkah-langkah sederhana berikut (Close et al., 2001). Untuk sistem yang memiliki satu keluaran dan tidak ada turunan masukan, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Selesaikan persamaan yang diberikan untuk turunan tertinggi dari variabel keluaran yang tidak diketahui.
2. Hubungkan satu atau lebih blok integrator secara berurutan untuk mengintegrasikan turunan tersebut secara bertahap sebanyak yang diperlukan untuk menghasilkan variabel keluaran.
3. Gunakan hasil dari langkah 1 untuk membentuk turunan tertinggi dari keluaran sebagai keluaran dari blok penjumlah dan penguat. Sinyal yang masuk ke penjumlah biasanya

terdiri dari keluaran dan turunannya yang lebih rendah, masing-masing dikalikan dengan konstanta, dan dengan tanda yang sesuai. Biasanya juga akan ada istilah yang mewakili masukan.



Gambar 2.13 Representasi diagram blok dari (1). (a), (b) Diagram parsial. (c) Diagram lengkap  
 Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 75.



Gambar 2.14 Representasi diagram blok dari (2). (a) Dua integrator. (b) Diagram lengkap  
 Sumber: Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2001, August 20). *Modeling and analysis of dynamic systems*. John Wiley & Sons, p. 76.

#### 2.7.4. Diagrams for State-Variable Models

Untuk menyusun diagram model variabel keadaan, langkah pertama adalah menggambar integrator untuk setiap variabel keadaan. Masukan pada integrator ini merupakan turunan pertama dari variabel keadaan yang bersangkutan. Kemudian, persamaan variabel keadaan digunakan untuk membentuk setiap turunan tersebut berdasarkan variabel keadaan dan masukan. Pada umumnya, setiap turunan akan dihasilkan dari keluaran blok penguat yang sebelumnya dilalui oleh penjumlahan, meskipun beberapa turunan mungkin dapat dibentuk dengan cara yang lebih sederhana. Langkah-langkah tersebut dapat disusun sebagai berikut (Close et al., 2001).

1. Gambarlah sebuah blok integrator untuk setiap variabel keadaan.
2. Kumpulkanlah istilah-istilah yang diperlukan untuk membentuk turunan dari setiap variabel keadaan, seperti yang dijelaskan dalam persamaan variabel keadaan. Istilah-istilah tersebut akan bergantung pada variabel keadaan dan masukan.
3. Siapkanlah blok-blok yang diperlukan untuk rumus keluaran, dengan menggunakan variabel keadaan dan masukan sesuai yang dibutuhkan.

### **2.7.5. Running Simulink with MATLAB**

Dengan menggunakan MATLAB beserta paket pendampingnya, yaitu Simulink, yang menyediakan *graphical user interface* (GUI) sehingga peneliti dapat membangun model-model sistem dan melakukan simulasi. Model-model ini dibangun dengan menggambar blok-blok yang saling terhubung yang mewakili persamaan aljabar dan diferensial yang menggambarkan perilaku sistem, mirip dengan diagram blok. MATLAB digunakan sebagai dukungan untuk menginisialisasi nilai-nilai parameter dan menghasilkan grafik respons sistem (Close et al., 2001).

Simulink menyediakan akses ke berbagai macam blok yang dapat melakukan beragam fungsi yang berguna untuk simulasi dan analisis sistem dinamis. Blok-blok ini dikelompokkan dalam perpustakaan berdasarkan jenis fungsi umumnya. Fungsi matematis seperti penjumlahan dan penguatan terletak dalam perpustakaan Matematika. Integrator terletak dalam perpustakaan *Continuous*. Konstanta, fungsi input umum, dan jam dapat ditemukan dalam perpustakaan sumber. Simulink adalah antarmuka grafis yang memungkinkan pengguna membuat program-program yang sebenarnya dijalankan di MATLAB. Saat program-program ini dijalankan, mereka menciptakan larik-larik variabel yang didefinisikan di Simulink yang dapat digunakan oleh MATLAB untuk analisis dan/atau *plotting*. Variabel-variabel yang akan digunakan di MATLAB harus diidentifikasi oleh Simulink menggunakan blok *To Workspace*, yang terdapat dalam perpustakaan *Sinks*. (Saat menggunakan blok ini, buka kotak dialognya dan tentukan bahwa format penyimpanan harus berupa Matriks, bukan default, yang disebut Struktur.) Perpustakaan *Sinks* juga memiliki *Scope*, yang memungkinkan variabel-variabel ditampilkan saat sistem simulasi merespons suatu *input* (Close et al., 2001).

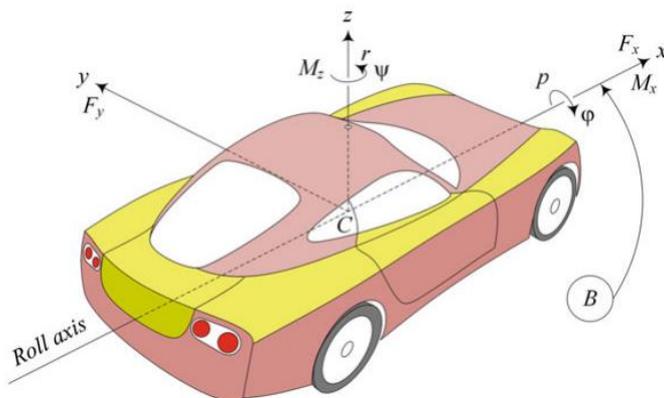
### **2.8. Vehicle Roll Dynamics**

Dalam konteks dinamis tentang kendaraan, *vehicle roll dynamics* merujuk pada fenomena gerakan-gerakan apa saja yang akan terjadi apabila kendaraan mengalami

perubahan arah. Pada *Vehicle Roll Dynamics* terdapat beberapa gerakan yang mempengaruhi yaitu gerakan kedepan/maju, gerakan lateral, gerakan yaw, dan gerakan *rolling* (Jazar, 2019). Model kendaraan ini lebih akurat dan realistis dibandingkan dengan *vehicle planar model*. Dengan menggunakan model ini, peneliti dapat menganalisa perilaku *rolling* pada kendaraan saat melakukan manuver. Gerakan-gerakan tersebut dapat terjadi karena adanya distribusi massa yang tidak merata sepanjang sumbu panjang kendaraan, khususnya pada mobil roda empat. Ketika kendaraan terkena lubang pada satu sisi rodanya, maka akan terciptanya momen *roll* dan *pitch* yang berupaya membuat kendaraan miring ke samping maupun ke depan.

Dinamika *roll* kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk distribusi massa, tinggi pusat massa, kekakuan suspensi, dan geometri suspensi. Faktor-faktor ini memiliki potensi untuk memengaruhi terjadinya gerakan *rolling*, yang perlu diperhatikan dalam pengembangan kendaraan. Analisis dinamika *roll* kendaraan melibatkan konsep transfer berat lateral, momen inersia, dan respons suspensi terhadap gerakan *rolling*. Penggunaan sistem anti-*roll* atau *sway bars* umumnya diimplementasikan untuk mengontrol gerakan *rolling* dan meningkatkan stabilitas kendaraan saat melakukan manuver lateral (Jazar, 2019).

Model dinamika *roll* kendaraan dapat dijelaskan dengan baik melalui empat variabel kinematik: gerakan ke depan  $x$ , gerakan lateral  $y$ , sudut *roll*  $\phi$ , dan sudut yaw  $\psi$ , bersama dengan empat persamaan untuk dinamika masing-masing roda. Pada model dinamika *roll* kendaraan, gerakan vertikal  $z$  dan gerakan *pitch*  $\theta$  tidak dipertimbangkan. Gambar 2.15 menunjukkan sebuah model *roll* kendaraan dengan kerangka koordinat badan B ( $xyz$ ) di titik pusat massa C, sistem gaya, dan variabel kinematiknya (Jazar, 2019).



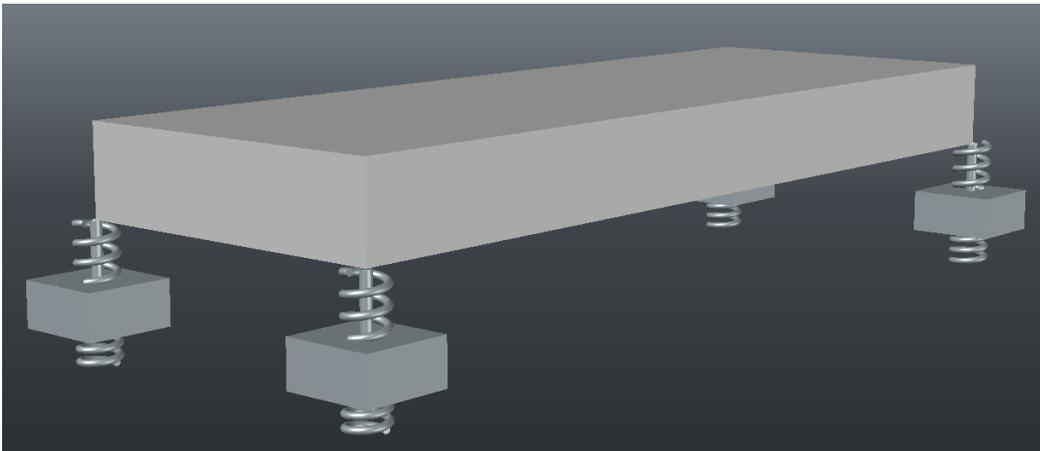
Gambar 2.15 Model dinamika *roll* kendaraan memiliki empat derajat kebebasan yang ditandai oleh:  $x$ ,  $y$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ .

Sumber: Jazar, R. N. (2019). *Advanced vehicle dynamics*, p. 216.

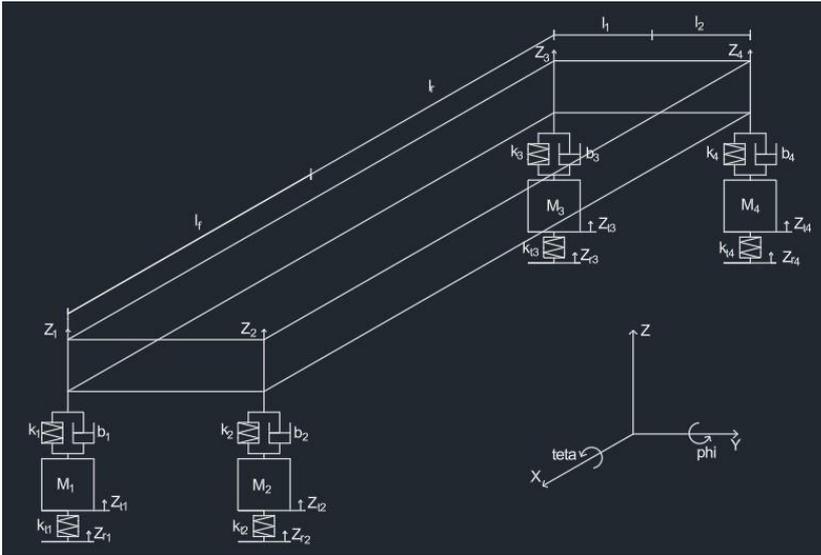
Kerangka koordinat badan dianggap sebagai kerangka koordinat utama kendaraan. Sumbu x adalah sumbu longitudinal yang melewati C dan mengarah ke depan. Sumbu y bergerak lateral ke kiri dari pandangan pengemudi. Sumbu z membentuk sistem koordinat menjadi triad tangan kanan. Sumbu z tegak lurus dengan tanah, berlawanan dengan percepatan gravitasi  $g$  pada jalan horizontal datar. Orientasi angular kendaraan diungkapkan melalui tiga sudut: *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$ , dan *yaw*  $\psi$ , sedangkan kecepatan angular kendaraan diungkapkan melalui laju mereka: *roll rate*  $p$ , *pitch rate*  $q$ , dan *yaw rate*  $r$  (Jazar, 2019).

### 2.8.1. Dinamika Kendaraan Planar Roda Empat (7 DOF)

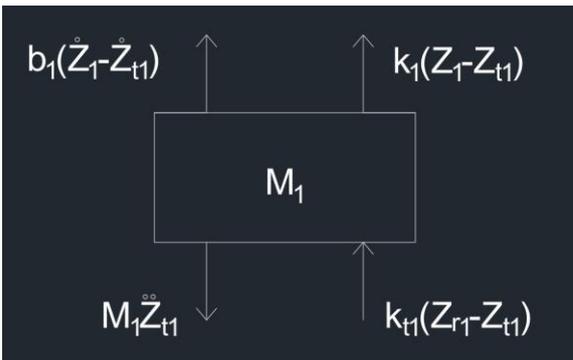
Fokus utama dalam analisis ini terletak pada pergerakan vertikal kendaraan. Untuk menjaga kesederhanaan analisis perjalanan, diasumsikan bahwa kendaraan bergerak lurus dengan kecepatan konstan. Sehingga, tidak ada implikasi penanganan dan/atau kinerja yang perlu dipertimbangkan dalam konteks ini. Pada penelitian ini peneliti secara khusus mendesain kondisi jalan yang tidak rata. Kendaraan roda empat memiliki derajat kebebasan (*degree of freedom*) sebanyak 7 DOF. Diantaranya 3 DOF dari bodi kendaraan yaitu gerakan naik turun, gerakan *pitching* dan gerakan *rolling*. Kemudian 4 DOF lainnya didapat dari derajat kebebasan roda. Masing-masing roda memiliki 1 DOF, yaitu gerakan naik turun yang disebabkan oleh gerakan suspensi (*shock breaker*) (Min et al., 2015).



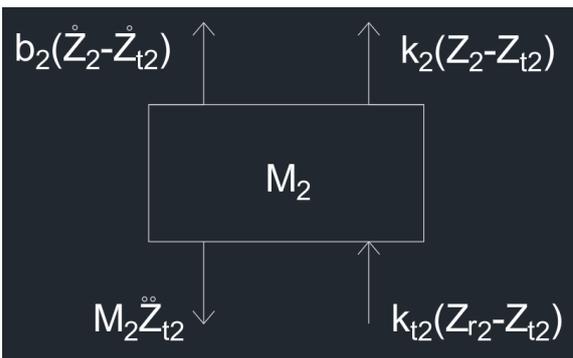
Gambar 2.16 Vehicle dynamics model 7 DOF 3D drawing



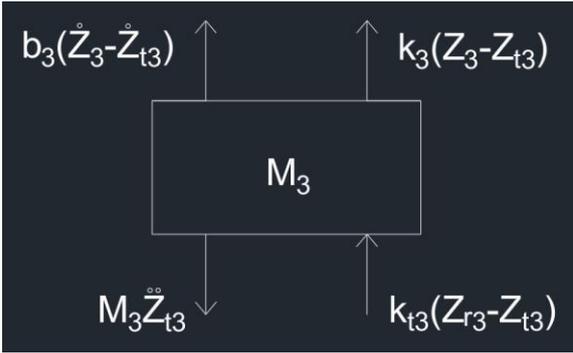
Gambar 2.17 Degree of freedom kendaraan roda empat



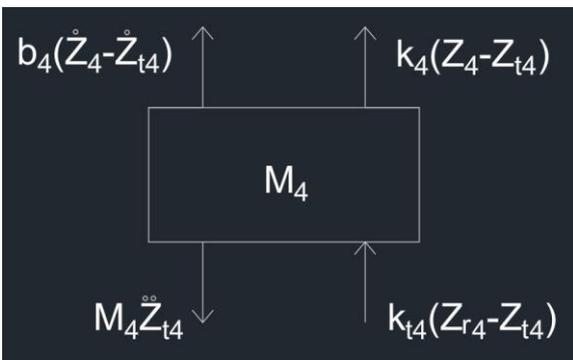
Gambar 2.18 Free body diagram M1 dari Gambar 2.17



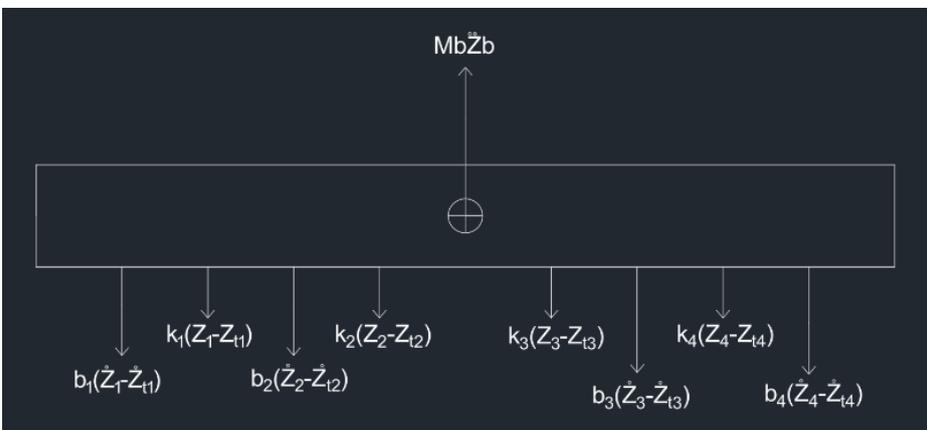
Gambar 2.19 Free body diagram M2 dari Gambar 2.17



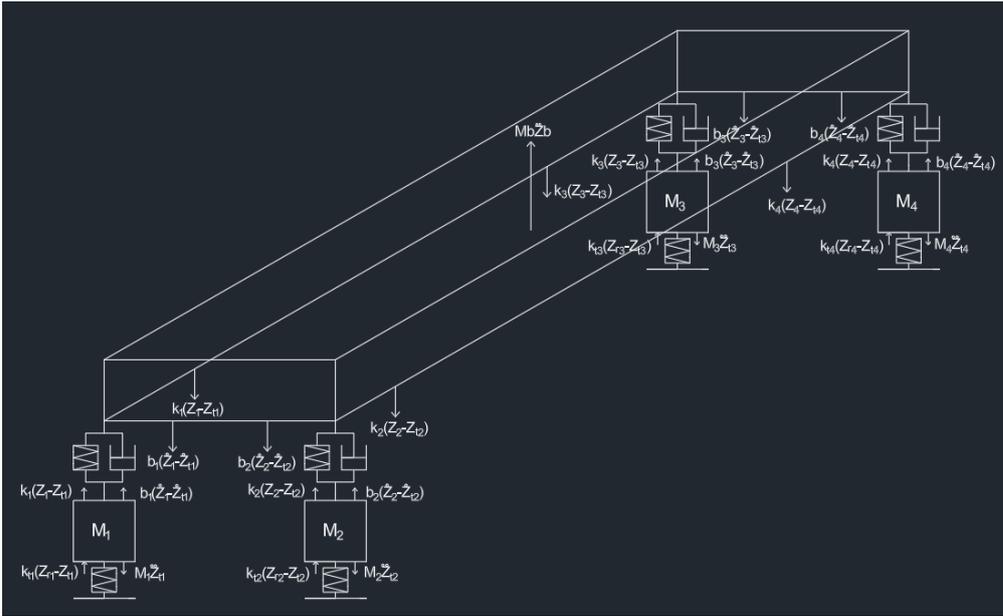
Gambar 2.20 Free body diagram M3 dari Gambar 2.17



Gambar 2.21 Free body diagram M4 dari Gambar 2.17



Gambar 2.22 Free body diagram Mb dari Gambar 2.17



Gambar 2.23 Free body diagram model 7 DOF

Dengan mengasumsikan posisi kendaraan bagian depan kanan terangkat Persamaan  $Z_1, Z_2, Z_3,$  dan  $Z_4$  dapat di jabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$Z_1 = Z - (\phi l_f) - (\theta l_1) \quad (2.32)$$

$$Z_2 = Z - (\phi l_f) + (\theta l_2) \quad (2.33)$$

$$Z_3 = Z + (\phi l_r) - (\theta l_1) \quad (2.34)$$

$$Z_4 = Z + (\phi l_r) + (\theta l_2) \quad (2.35)$$

Persamaan  $Z_1, Z_2, Z_3,$  dan  $Z_4$  apabila dipengaruhi oleh kecepatan konstan akan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z} - (\dot{\phi} l_f) - (\dot{\theta} l_1) \quad (2.36)$$

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z} - (\dot{\phi} l_f) + (\dot{\theta} l_2) \quad (2.37)$$

$$\dot{Z}_3 = \dot{Z} + (\dot{\phi} l_r) - (\dot{\theta} l_1) \quad (2.38)$$

$$\dot{Z}_4 = \dot{Z} + (\dot{\phi} l_r) + (\dot{\theta} l_2) \quad (2.39)$$

Persamaan dari *free body diagram* pada Gambar 2.18 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k_{t1}(Z_{r1} - Z_{t1}) + k_1(Z_1 - Z_{t1}) + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1}) - M_1\ddot{Z}_{t1} = 0 \quad (2.40)$$

$$\ddot{Z}_{t1} = \frac{1}{M_1} [k_{t1}(Z_{r1} - Z_{t1}) + k_1(Z_1 - Z_{t1}) + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1})] \quad (2.41)$$

$$\ddot{Z}_{t1} = \frac{1}{M_1} [k_{t1}(Z_{r1} - Z_{t1}) + k_1(Z - (\varphi l_f) - (\theta l_1) - Z_{t1}) + b_1(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t1})] \quad (2.42)$$

$$\ddot{Z}_{t1} = \frac{1}{M_1} [k_{t1} \cdot Z_{r1} - k_{t1} \cdot Z_{t1} + k_1 \cdot Z - k_1 \cdot \varphi \cdot l_f - k_1 \cdot \theta \cdot l_1 - k_1 \cdot Z_{t1} + b_1 \cdot \dot{Z} - b_1 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f - b_1 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 - b_1 \cdot \dot{Z}_{t1}] \quad (2.43)$$

$$\ddot{Z}_{t1} = \frac{1}{M_1} [Z_{r1}(k_{t1}) - Z_{t1}(k_1 + k_{t1}) + Z(k_1) - \varphi(k_1 \cdot l_f) - \theta(k_1 \cdot l_1) - \dot{Z}_{t1}(b_1) + \dot{Z}(b_1) - \dot{\varphi}(b_1 \cdot l_f) - \dot{\theta}(b_1 \cdot l_1)] \quad (2.44)$$

Persamaan (2.40 dan 2.41) disusun berdasarkan hukum D'Alembert yang merupakan pernyataan ulang berdasarkan hukum Newton ke dua. Hukum D'Alembert menyatakan bahwa dalam suatu sistem yang dalam keadaan seimbang atau bergerak dengan percepatan konstan, gaya inersia fiktif dapat diperkenalkan ke sistem tersebut untuk menggambarkan kondisi tersebut. Selain itu persamaan (2.40 dan 2.41) juga menggunakan hukum gaya reaksi dan hukum perpindahan. Persamaan (2.40 dan 2.41) disusun karena terdapat berbagai macam gaya yang mempengaruhi roda ketika dipengaruhi oleh percepatan sehingga terbentuk persamaan  $\ddot{Z}_{t1}$ . Pada  $M_1$  terdapat gaya berupa  $k_{t1}$  (konstanta kekakuan roda),  $k_1$  (konstanta pegas), dan  $M_1$  (konstanta redaman). Untuk gaya  $k_{t1}$  dipengaruhi oleh gaya yang diberikan oleh permukaan tanah ke ban pada sumbu  $Z$  sehingga membuat ban memiliki gaya dorong ke atas ( $Z_{r1}$ ) dan gaya terhadap ban ke roda pada sumbu  $Z$  ( $Z_{t1}$ ). Gaya  $k_1$  dipengaruhi oleh gaya sisi sudut mobil terhadap sumbu  $Z$  ( $Z_1$ ) dan  $Z_{t1}$ . Gaya  $b_1$  dipengaruhi oleh ( $\dot{Z}_1$ ) dan ( $\dot{Z}_{t1}$ ). Selanjutnya gaya  $Z_1$  dan  $\dot{Z}_1$  pada persamaan (2.41) disederhanakan menggunakan gaya  $Z_1$  persamaan (2.32) dan  $\dot{Z}_1$  persamaan (2.36) sehingga menjadi persamaan (2.42). Persamaan (2.42) selanjutnya disederhanakan sehingga menjadi persamaan (2.44).

Persamaan dari *free body diagram* pada Gambar 2.19 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k_{t2}(Z_{r2} - Z_{t2}) + k_2(Z_2 - Z_{t2}) + b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2}) - M_2\ddot{Z}_{t2} = 0 \quad (2.45)$$

$$\ddot{Z}_{t2} = \frac{1}{M_2} [k_{t2}(Z_{r2} - Z_{t2}) + k_2(Z_2 - Z_{t2}) + b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2})] \quad (2.46)$$

$$\ddot{Z}_{t2} = \frac{1}{M_2} [k_{t2}(Z_{r2} - Z_{t2}) + k_2(Z - (\varphi l_f) + (\theta l_2) - Z_{t2}) + b_2(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t2})] \quad (2.47)$$

$$\ddot{Z}_{t2} = \frac{1}{M_2} [k_{t2} \cdot Z_{r2} - k_{t2} \cdot Z_{t2} + k_2 \cdot Z - k_2 \cdot \varphi \cdot l_f + k_2 \cdot \theta \cdot l_2 - k_2 \cdot Z_{t2} + b_2 \cdot \dot{Z} - b_2 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f + b_2 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 - b_2 \cdot \dot{Z}_{t2}] \quad (2.48)$$

$$\ddot{Z}_{t2} = \frac{1}{M_2} [Z_{r2}(k_{t2}) - Z_{t2}(k_2 + k_{t2}) + Z(k_2) - \varphi(k_2 \cdot l_f) + \theta(k_2 \cdot l_2) - \dot{Z}_{t2}(b_2) + \dot{Z}(b_2) - \dot{\varphi}(b_2 \cdot l_f) + \dot{\theta}(b_2 \cdot l_2)] \quad (2.49)$$

Persamaan dari *free body diagram* pada Gambar 2.20 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k_{t3}(Z_{r3} - Z_{t3}) + k_3(Z_3 - Z_{t3}) + b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3}) - M_3\ddot{Z}_{t3} = 0 \quad (2.50)$$

$$\ddot{Z}_{t3} = \frac{1}{M_3} [k_{t3}(Z_{r3} - Z_{t3}) + k_3(Z_3 - Z_{t3}) + b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3})] \quad (2.51)$$

$$\ddot{Z}_{t3} = \frac{1}{M_3} [k_{t3}(Z_{r3} - Z_{t3}) + k_3(Z + (\varphi l_r) - (\theta l_1) - Z_{t3}) + b_3(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t3})] \quad (2.52)$$

$$\ddot{Z}_{t3} = \frac{1}{M_3} [k_{t3} \cdot Z_{r3} - k_{t3} \cdot Z_{t3} + k_3 \cdot Z + k_3 \cdot \varphi \cdot l_r - k_3 \cdot \theta \cdot l_1 - k_3 \cdot Z_{t3} + b_3 \cdot \dot{Z} + b_3 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r - b_3 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 - b_3 \cdot \dot{Z}_{t3}] \quad (2.53)$$

$$\ddot{Z}_{t3} = \frac{1}{M_3} [Z_{r3}(k_{t3}) - Z_{t3}(k_3 + k_{t3}) + Z(k_3) + \varphi(k_3 \cdot l_r) - \theta(k_3 \cdot l_1) - \dot{Z}_{t3}(b_3) + \dot{Z}(b_3) + \dot{\varphi}(b_3 \cdot l_r) - \dot{\theta}(b_3 \cdot l_1)] \quad (2.54)$$

Persamaan dari *free body diagram* pada Gambar 2.21 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k_{t4}(Z_{r4} - Z_{t4}) + k_4(Z_4 - Z_{t4}) + b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4}) - M_4\ddot{Z}_{t4} = 0 \quad (2.55)$$

$$\ddot{Z}_{t4} = \frac{1}{M_4} [k_{t4}(Z_{r4} - Z_{t4}) + k_4(Z_4 - Z_{t4}) + b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})] \quad (2.56)$$

$$\ddot{Z}_{t4} = \frac{1}{M_4} [k_{t4}(Z_{r4} - Z_{t4}) + k_4(Z + (\varphi l_r) + (\theta l_2) - Z_{t4}) + b_4(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t4})] \quad (2.57)$$

$$\ddot{Z}_{t4} = \frac{1}{M_4} [k_{t4} \cdot Z_{r4} - k_{t4} \cdot Z_{t4} + k_4 \cdot Z + k_4 \cdot \varphi \cdot l_r + k_4 \cdot \theta \cdot l_2 - k_4 \cdot Z_{t4} + b_4 \cdot \dot{Z} + b_4 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r + b_4 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 - b_4 \cdot \dot{Z}_{t4}] \quad (2.58)$$

$$\ddot{Z}_{t4} = \frac{1}{M_4} [Z_{r4}(k_{t4}) - Z_{t4}(k_4 + k_{t4}) + Z(k_4) + \varphi(k_4 \cdot l_r) + \theta(k_4 \cdot l_2) - \dot{Z}_{t4}(b_4) + \dot{Z}(b_4) + \dot{\varphi}(b_4 \cdot l_r) + \dot{\theta}(b_4 \cdot l_2)] \quad (2.59)$$

Persamaan dari *free body diagram* pada Gambar 2.22 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$M_b\ddot{Z}_b - k_1(Z_1 - Z_{t1}) - b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1}) - k_2(Z_2 - Z_{t2}) - b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2}) - k_3(Z_3 - Z_{t3}) - b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3}) - k_4(Z_4 - Z_{t4}) - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4}) = 0 \quad (2.60)$$

$$\ddot{Z}_b = \frac{1}{M_b} [-k_1(Z_1 - Z_{t1}) - b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1}) - k_2(Z_2 - Z_{t2}) - b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2}) - k_3(Z_3 - Z_{t3}) - b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3}) - k_4(Z_4 - Z_{t4}) - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})] \quad (2.61)$$

$$\ddot{Z}_b = \frac{1}{M_b} [-k_1(Z - (\varphi l_f) - (\theta l_1) - Z_{t1}) - b_1(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t1}) - k_2(Z - (\varphi l_f) + (\theta l_2) - Z_{t2}) - b_2(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t2}) - k_3(Z + (\varphi l_r) - (\theta l_1) - Z_{t3}) - b_3(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t3}) - k_4(Z + (\varphi l_r) + (\theta l_2) - Z_{t4}) - b_4(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t4})] \quad (2.62)$$

$$\ddot{Z}_b = \frac{1}{M_b} [-k_1 \cdot Z + k_1 \cdot \varphi \cdot l_f + k_1 \cdot \theta \cdot l_1 + k_1 \cdot Z_{t1} - b_1 \cdot \dot{Z} + b_1 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f \quad (2.63)$$

$$+ b_1 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 + b_1 \cdot \dot{Z}_{t1} - k_2 \cdot Z + k_2 \cdot \varphi \cdot l_f - k_2 \cdot \theta \cdot l_2 \\ + k_2 \cdot Z_{t2} - b_2 \cdot \dot{Z} + b_2 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f - b_2 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 + b_2 \cdot \dot{Z}_{t2} \\ - k_3 \cdot Z - k_3 \cdot \varphi \cdot l_r + k_3 \cdot \theta \cdot l_1 + k_3 \cdot Z_{t3} - b_3 \cdot \dot{Z} \\ - b_3 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r + b_3 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 + b_3 \cdot \dot{Z}_{t3} - k_4 \cdot Z - k_4 \cdot \varphi \cdot l_r \\ - k_2 \cdot \theta \cdot l_2 + k_2 \cdot Z_{t4} - b_4 \cdot \dot{Z} - b_4 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r - b_4 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 \\ + b_4 \cdot \dot{Z}_{t4}]$$

$$\ddot{Z}_b = \frac{1}{M_b} [-Z(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) - \dot{Z}(b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \quad (2.64)$$

$$+ \varphi \left( (k_1 \cdot l_f) + (k_2 \cdot l_f) + (-k_3 \cdot l_r) + (-k_4 \cdot l_r) \right) \\ + \theta \left( (k_1 \cdot l_1) + (-k_2 \cdot l_2) + (k_3 \cdot l_1) + (-k_4 \cdot l_2) \right) \\ + \dot{\varphi} \left( (b_1 \cdot l_f) + (b_2 \cdot l_f) + (-b_3 \cdot l_r) + (-b_4 \cdot l_r) \right) \\ + \dot{\theta} \left( (b_1 \cdot l_1) + (-b_2 \cdot l_2) + (b_3 \cdot l_1) + (-b_4 \cdot l_2) \right) \\ + Z_{t1}(k_1) + Z_{t2}(k_2) + Z_{t3}(k_3) \\ + Z_{t4}(k_4) + \dot{Z}_{t1}(b_1) + \dot{Z}_{t2}(b_2) + \dot{Z}_{t3}(b_3) + \dot{Z}_{t4}(b_4)]$$

Persamaan (2.60 dan 2.61) merupakan persamaan yang terbentuk karena ada gaya yang terdapat pada bodi kendaraan pada percepatan menjadi  $\ddot{Z}_b$ . Pada  $M_b$  terdapat gaya  $k$  dan  $b$ . Selanjutnya persamaan tersebut disederhanakan sehingga menjadi persamaan (2.64).

Dengan membuat dinamika kendaraan 7 DOF pada Gambar 2.23 dapat dibentuk persamaan sebagai berikut:

$$-I_y \ddot{\varphi} + k_1(Z_1 - Z_{t1})l_f + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1})l_f + k_2(Z_2 - Z_{t2})l_f \quad (2.65)$$

$$+ b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2})l_f - k_3(Z_3 - Z_{t3})l_r - b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3})l_r \\ - k_4(Z_4 - Z_{t4})l_r - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})l_r = 0$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{I_y} [k_1(Z_1 - Z_{t1})l_f + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1})l_f + k_2(Z_2 - Z_{t2})l_f \quad (2.66)$$

$$+ b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2})l_f - k_3(Z_3 - Z_{t3})l_r - b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3})l_r \\ - k_4(Z_4 - Z_{t4})l_r - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})l_r]$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{I_y} [k_1(Z - (\varphi l_f) - (\theta l_1) - Z_{t1})l_f \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} & - b_1(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t1})l_f \\ & + k_2(Z - (\varphi l_f) + (\theta l_2) - Z_{t2})l_f \\ & + b_2(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t2})l_f \\ & - k_3(Z + (\varphi l_r) - (\theta l_1) - Z_{t3})l_r \\ & - b_3(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t3})l_r \\ & - k_4(Z + (\varphi l_r) + (\theta l_2) - Z_{t4})l_r \\ & - b_4(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t4})l_r] \end{aligned}$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{I_y} [k_1 \cdot Z \cdot l_f - k_1 \cdot \varphi \cdot l_f \cdot l_f - k_1 \cdot \theta \cdot l_1 \cdot l_f - k_1 \cdot Z_{t1} \cdot l_f + b_1 \cdot \dot{Z} \cdot l_f \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} & - b_1 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f \cdot l_f - b_1 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 \cdot l_f - b_1 \cdot \dot{Z}_{t1} \cdot l_f + k_2 \cdot Z \cdot l_f \\ & - k_2 \cdot \varphi \cdot l_f \cdot l_f + k_2 \cdot \theta \cdot l_2 \cdot l_f + k_2 \cdot Z_{t2} \cdot l_f + b_2 \cdot \dot{Z} \cdot l_f \\ & - b_2 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f \cdot l_f + b_2 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 \cdot l_f - b_2 \cdot \dot{Z}_{t2} \cdot l_f - k_3 \cdot Z \cdot l_r \\ & - k_3 \cdot \varphi \cdot l_r \cdot l_r + k_3 \cdot \theta \cdot l_1 \cdot l_r + k_3 \cdot Z_{t3} \cdot l_r - b_3 \cdot \dot{Z} \cdot l_r \\ & - b_3 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r \cdot l_r + b_3 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 \cdot l_r + b_3 \cdot \dot{Z}_{t3} \cdot l_r - k_4 \cdot Z \cdot l_r \\ & - k_4 \cdot \varphi \cdot l_r \cdot l_r - k_4 \cdot \theta \cdot l_2 \cdot l_r + k_4 \cdot Z_{t4} \cdot l_r - b_4 \cdot \dot{Z} \cdot l_r \\ & - b_4 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r \cdot l_r - b_4 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 \cdot l_r + b_4 \cdot \dot{Z}_{t4} \cdot l_r] \end{aligned}$$

$$\ddot{\varphi} \quad (2.69)$$

$$\begin{aligned} & = \frac{1}{I_y} [Z((k_1 \cdot l_f) + (k_2 \cdot l_f) + (-k_3 \cdot l_r) + (-k_4 \cdot l_r)) \\ & + \varphi((-k_1 \cdot l_f \cdot l_f) + (-k_2 \cdot l_f \cdot l_f) + (-k_3 \cdot l_r \cdot l_r) + (-k_4 \cdot l_r \cdot l_r)) \\ & + \theta((-k_1 \cdot l_1 \cdot l_f) + (k_2 \cdot l_2 \cdot l_f) + (k_3 \cdot l_1 \cdot l_r) + (-k_4 \cdot l_2 \cdot l_r)) \\ & + \dot{Z}((b_1 \cdot l_f) + (b_2 \cdot l_f) + (-b_3 \cdot l_r) + (-b_4 \cdot l_r)) \\ & + \dot{\varphi}((-b_1 \cdot l_f \cdot l_f) + (-b_2 \cdot l_f \cdot l_f) + (-b_3 \cdot l_r \cdot l_r) + (-b_4 \cdot l_r \cdot l_r)) \\ & + \dot{\theta}((-b_1 \cdot l_1 \cdot l_f) + (b_2 \cdot l_2 \cdot l_f) + (b_3 \cdot l_1 \cdot l_r) + (-b_4 \cdot l_2 \cdot l_r)) \\ & + Z_{t1}(-k_1 \cdot l_f) + Z_{t2}(-k_2 \cdot l_f) + Z_{t3}(k_3 \cdot l_r) \\ & + Z_{t4}(k_4 \cdot l_r) + \dot{Z}_{t1}(b_1 \cdot l_f) + \dot{Z}_{t2}(b_2 \cdot l_f) + \dot{Z}_{t3}(b_3 \cdot l_r) + \dot{Z}_{t4}(b_4 \cdot l_r)] \end{aligned}$$

Dengan membuat dinamika kendaraan 7 DOF pada Gambar 2.23 dapat dibentuk persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 -I_x \ddot{\theta} + k_1(Z_1 - Z_{t1})l_1 + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1})l_1 - k_2(Z_2 - Z_{t2})l_2 & \quad (2.70) \\
 - b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2})l_2 + k_3(Z_3 - Z_{t3})l_1 + b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3})l_1 \\
 - k_4(Z_4 - Z_{t4})l_2 - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})l_2 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} = \frac{1}{I_x} [k_1(Z_1 - Z_{t1})l_1 + b_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_{t1})l_1 - k_2(Z_2 - Z_{t2})l_2 & \quad (2.71) \\
 - b_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_{t2})l_2 + k_3(Z_3 - Z_{t3})l_1 + b_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_{t3})l_1 \\
 - k_4(Z_4 - Z_{t4})l_2 - b_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_{t4})l_2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} = \frac{1}{I_x} [k_1(Z - (\varphi l_f) - (\theta l_1) - Z_{t1})l_1 & \quad (2.72) \\
 + b_1(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t1})l_1 \\
 - k_2(Z - (\varphi l_f) + (\theta l_2) - Z_{t2})l_2 \\
 - b_2(\dot{Z} - (\dot{\varphi} l_f) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t2})l_2 \\
 + k_3(Z + (\varphi l_r) - (\theta l_1) - Z_{t3})l_1 \\
 + b_3(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) - (\dot{\theta} l_1) - \dot{Z}_{t3})l_1 \\
 - k_4(Z + (\varphi l_r) + (\theta l_2) - Z_{t4})l_2 \\
 - b_4(\dot{Z} + (\dot{\varphi} l_r) + (\dot{\theta} l_2) - \dot{Z}_{t4})l_2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} = \frac{1}{I_x} [k_1 \cdot Z \cdot l_1 - k_1 \cdot \varphi \cdot l_f \cdot l_1 - k_1 \cdot \theta \cdot l_1 \cdot l_1 - k_1 \cdot Z_{t1} \cdot l_1 + b_1 \cdot \dot{Z} \cdot l_1 & \quad (2.73) \\
 - b_1 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f \cdot l_1 - b_1 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 \cdot l_1 - b_1 \cdot \dot{Z}_{t1} \cdot l_1 - k_2 \cdot Z \cdot l_2 \\
 + k_2 \cdot \varphi \cdot l_f \cdot l_2 - k_2 \cdot \theta \cdot l_2 \cdot l_2 + k_2 \cdot Z_{t2} \cdot l_2 - b_2 \cdot \dot{Z} \cdot l_2 \\
 + b_2 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_f \cdot l_2 - b_2 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 \cdot l_2 + b_2 \cdot \dot{Z}_{t2} \cdot l_2 + k_3 \cdot Z \cdot l_1 \\
 + k_3 \cdot \varphi \cdot l_r \cdot l_1 - k_3 \cdot \theta \cdot l_1 \cdot l_1 - k_3 \cdot Z_{t3} \cdot l_1 + b_3 \cdot \dot{Z} \cdot l_1 \\
 + b_3 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r \cdot l_1 - b_3 \cdot \dot{\theta} \cdot l_1 \cdot l_1 - b_3 \cdot \dot{Z}_{t3} \cdot l_1 - k_4 \cdot Z \cdot l_2 \\
 - k_4 \cdot \varphi \cdot l_r \cdot l_2 - k_4 \cdot \theta \cdot l_2 \cdot l_2 + k_4 \cdot Z_{t4} \cdot l_2 - b_4 \cdot \dot{Z} \cdot l_2 \\
 - b_4 \cdot \dot{\varphi} \cdot l_r \cdot l_2 - b_4 \cdot \dot{\theta} \cdot l_2 \cdot l_2 + b_4 \cdot \dot{Z}_{t4} \cdot l_2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\theta} \tag{2.74} \\
&= \frac{1}{I_x} \left[ Z((k_1 \cdot l_1) + (-k_2 \cdot l_2) + (k_3 \cdot l_1) + (-k_4 \cdot l_2)) \right. \\
&+ \varphi \left( (-k_1 \cdot l_f \cdot l_1) + (k_2 \cdot l_f \cdot l_2) + (k_3 \cdot l_r \cdot l_1) + (-k_4 \cdot l_r \cdot l_2) \right) \\
&+ \theta \left( (-k_1 \cdot l_1 \cdot l_1) + (-k_2 \cdot l_2 \cdot l_2) + (-k_3 \cdot l_1 \cdot l_1) + (-k_4 \cdot l_2 \cdot l_2) \right) \\
&+ \dot{Z}((b_1 \cdot l_1) + (-b_2 \cdot l_2) + (b_3 \cdot l_1) + (-b_4 \cdot l_2)) \\
&+ \dot{\varphi} \left( (-b_1 \cdot l_f \cdot l_1) + (b_2 \cdot l_f \cdot l_2) + (b_3 \cdot l_r \cdot l_1) + (-b_4 \cdot l_r \cdot l_2) \right) \\
&+ \dot{\theta} \left( (-b_1 \cdot l_1 \cdot l_1) + (-b_2 \cdot l_2 \cdot l_2) + (-b_3 \cdot l_1 \cdot l_1) + (-b_4 \cdot l_2 \cdot l_2) \right) \\
&+ Z_{t1}(-k_1 \cdot l_1) + Z_{t2}(k_2 \cdot l_2) + Z_{t3}(-k_3 \cdot l_1) \\
&\left. + Z_{t4}(k_4 \cdot l_2) + \dot{Z}_{t1}(-b_1 \cdot l_1) + \dot{Z}_{t2}(b_2 \cdot l_2) + \dot{Z}_{t3}(-b_3 \cdot l_1) + \dot{Z}_{t4}(b_4 \cdot l_2) \right]
\end{aligned}$$

Persamaan (2.65) sampai (2.69) merupakan persamaan yang disusun berdasarkan reaksi yang terjadi karena gaya *pitch* yang membuat mobil berputar terhadap sumbu transversal atau sumbu y. Sedangkan persamaan (2.70) sampai (2.74) merupakan persamaan yang di susun berdasarkan reaksi yang terjadi karena gaya *roll* yang membuat mobil berputar terhadap sumbu memanjang atau sumbu x. Pada persamaan-persamaan tersebut terdapat gaya  $k$  dan  $b$  yang dipengaruhi oleh dimensi kendaraan dan titik CoG kendaraan tersebut.

## 2.9. Sistem Kontrol

Sistem kontrol pada suspensi aktif merupakan inti dari teknologi canggih yang memungkinkan kendaraan untuk secara dinamis mengatur karakteristik suspensi sesuai dengan kondisi jalan dan preferensi pengemudi. Dengan menggunakan kontrol elektronik yang canggih, sistem ini dapat secara otomatis menyesuaikan tingkat kekerasan suspensi, ketinggian kendaraan, dan distribusi tenaga pada setiap roda. Hal ini bertujuan untuk memberikan respons yang optimal terhadap berbagai kondisi jalan, sehingga meningkatkan kenyamanan berkendara, stabilitas, dan keamanan. Dalam dunia kontrol sistem, beberapa metode yang umum digunakan meliputi PID (*Proportional-Integral-Derivative*) Control, *Fuzzy Logic Control* (FLC), *Model Predictive Control* (MPC), *Sliding Mode Control* (SMC), *Integral of Sign of the Error Feedback* (ISF), dan *Bang-Bang Control*. *PID Control* memberikan respons optimal terhadap selisih antara setpoint dan *output*, FLC mengatasi ketidakpastian dengan logika *fuzzy*, MPC memprediksi dan mengoptimalkan respons, SMC merancang kontroler untuk mode geser, ISF menggunakan integral dari tanda kesalahan, dan *Bang-Bang Control* memberikan respons on-off pada batas ambang tertentu. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik masing-masing metode

kontrol ini penting untuk aplikasi yang spesifik sesuai dengan tujuan dan kondisi sistem yang dikendalikan.

### 2.9.1. PID

Sistem Kontrol PID, atau yang dikenal sebagai *Proportional-Integral-Derivative*, adalah suatu metode kontrol yang menggunakan tiga komponen utama untuk mengatur respons suatu sistem terhadap perubahan. Komponen pertama, *Proporsional (P)*, memberikan respons sesuai dengan besarnya selisih antara nilai yang diinginkan (*setpoint*) dengan nilai yang sebenarnya. Komponen kedua, *Integral (I)*, menanggapi kesalahan kumulatif dari waktu ke waktu dan berkontribusi untuk menghilangkan kesalahan statis. Komponen terakhir, *Derivatif (D)*, memberikan respons terhadap tingkat perubahan kesalahan, membantu dalam mengendalikan *overshoot* atau osilasi berlebih. Dengan mengombinasikan ketiga komponen ini, kontroler PID dapat menyesuaikan *output* untuk mencapai dan mempertahankan setpoint dengan respons yang cepat dan stabil. Metode ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti kendali suhu, posisi, atau kecepatan pada sistem otomatis (Ogata, 2010).

Struktur yang umum digunakan untuk kontroler PID adalah tipe parallel dan series dimana diuraikan sebagai berikut:

1. Tipe Parallel: Pada bentuk ini, aksi *Proporsional P*, *integral I*, atau *derivatif D* terjadi dalam persamaan terpisah, dan dengan efek gabungan mereka, jumlahnya dihasilkan. Pada tipe ini, setiap parameter independen satu sama lain, dan hukum kontrol yang sesuai direpresentasikan sebagai:

$$u(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.75)$$

Dalam hal ini, *gain* proporsional adalah  $K_p = K_c$ , waktu integral adalah  $T_i$  dan  $K_i = \frac{K_c}{T_i}$ , waktu derivatif adalah  $T_d$  dan  $K_d = K_c T_d$ . Hal ini juga dikenal sebagai representasi ideal.

2. Tipe Series: Tipe ini atau persamaan interaktif utamanya berasal dari karakteristik sirkuit pneumatik dan elektronik analog. Sama seperti pada persamaan PID ideal, perubahan dalam  $K_c$  memengaruhi ketiga aksi, tetapi konstanta derivatif dan integral memiliki pengaruh pada aksi proporsional. Tipe ini memiliki hukum kontrol sebagai berikut:

$$e1(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.76)$$

$$u(t) = K_c(e1(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt) \quad (2.77)$$

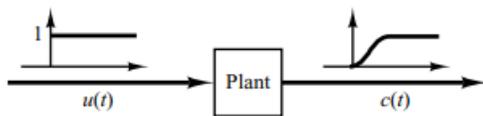
Dalam konteks ini, pengaruh *gain*  $K_c$  memengaruhi ketiga komponen dari struktur PID. Sebaliknya, nilai-nilai parameter tuning integral dan derivatif  $T_d$  dan  $T_i$  juga memengaruhi istilah proporsional. Oleh karena itu, penyesuaian  $T_d$  cenderung memengaruhi baik aksi derivatif (D) maupun proporsional (P), penyesuaian  $T_i$  memiliki dampak pada aksi integral (I) dan proporsional (P), dan penyesuaian  $K_c$  memengaruhi ketiga aksi tersebut. Sebagian besar kontroler komersial umumnya menggunakan algoritma seri, terutama dalam bentuk non-interaktif (ideal), meskipun ada yang menggunakan bentuk interaktif (Ogata, 2010). Menemukan model yang sempurna dalam dunia praktis seringkali menantang. Oleh karena itu, prosedur manipulasi dan uji coba masih berguna. Sebagai contoh, jika suatu *loop* terlalu agresif dan mengalami osilasi berlebihan, mengurangi *gain* adalah penyesuaian yang wajar. Hal ini memperlambat respons dan meningkatkan kekokohan pada *loop*. Namun, pendekatan ini hanya berlaku pada algoritma seri. Pada algoritma paralel, mengurangi *gain* juga meningkatkan fasa kontroler, yang dapat menyebabkan lebih banyak osilasi dan ketidakstabilan tergantung pada penyetelan keseluruhan. Oleh karena itu, pemahaman perilaku PID secara intuitif lebih mudah dengan algoritma seri, sementara menjadi lebih kompleks dengan algoritma ideal. Pada algoritma ideal, baik peningkatan maupun penurunan *gain* dapat menghasilkan ketidakstabilan, sedangkan pada algoritma seri, penurunan *gain* seringkali meningkatkan stabilitas, terutama untuk proses *self-regulating* (Borase et al., 2020).

Dalam menentukan konstanta untuk pengendali proporsional, integral, dan derivatif memerlukan perhatian khusus. Salah satu metode umum untuk menentukan nilai-nilai konstanta tersebut adalah dengan metode *trial and error*. Walaupun metode ini dapat memberikan hasil terbaik, sayangnya, memerlukan waktu yang cukup lama. Sebagai bantuan untuk memberikan estimasi nilai awal konstanta pada sistem dinamis yang akan dikendalikan menggunakan PID, sering digunakan metode aturan Ziegler-Nichols. Metode ini terdiri dari dua langkah, dimana langkah pertama melibatkan pemberian *input* nilai step pada sistem, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.24 (Ogata, 2010).

Pada metode pertama, peneliti memperoleh respons pabrik secara eksperimental terhadap *input* langkah satuan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.24. Jika pabrik tidak melibatkan integrator atau kutub konjugat kompleks dominan, maka kurva respons langkah

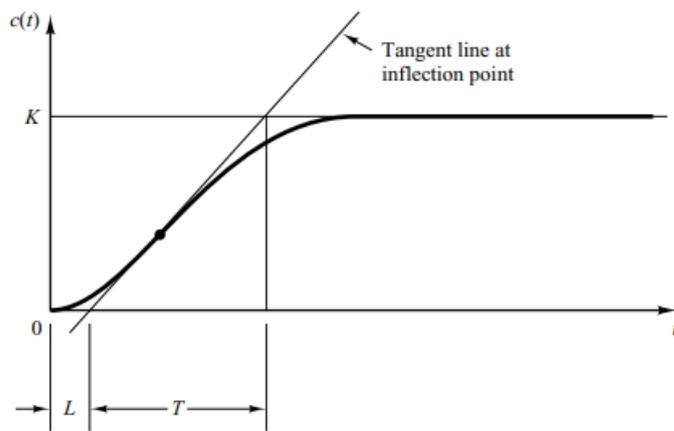
satuan tersebut mungkin berbentuk S, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.25. Metode ini berlaku jika respons terhadap *input* langkah menunjukkan kurva berbentuk S. Kurva respons langkah semacam itu dapat dihasilkan secara eksperimental atau melalui simulasi dinamis pabrik (Ogata, 2010).

Kurva berbentuk S dapat dikarakterisasi oleh dua konstanta, yaitu waktu tunda  $L$  dan konstanta waktu  $T$ . Waktu tunda dan konstanta waktu ditentukan dengan menggambar garis singgung pada titik infleksi kurva berbentuk S dan menentukan titik potong garis singgung dengan sumbu waktu dan garis  $c(t) = K$ , sebagaimana terlihat pada Gambar 2.25 (Ogata, 2010).



Gambar 2.24 Unit-step response of a plant

Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 569.



Gambar 2.25 S-Shaped response curve

Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 569.

Dengan menggunakan nilai  $T$  &  $L$  yang diperoleh dari grafik respons sistem, konstanta PID dapat diintegrasikan ke dalam persamaan sebagai berikut:

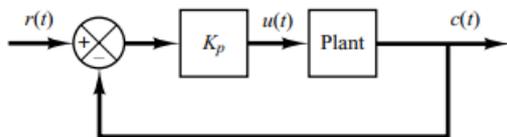
Tabel 2.1

Metode Pertama *Ziegler-Nichols Rule*

<i>Controller Type</i>	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

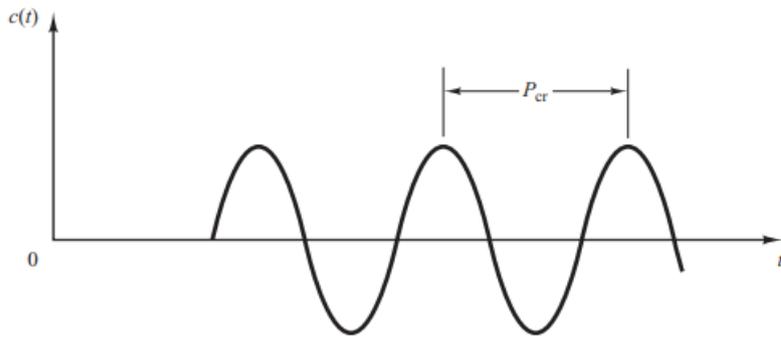
Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 570.

Pada metode kedua, peneliti pertama-tama menetapkan  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Dengan menggunakan aksi kontrol proporsional saja (dapat dilihat pada Gambar 2.26), meningkatkan  $K_p$  dari 0 hingga nilai kritis  $K_{cr}$  di mana keluaran pertama kali menunjukkan osilasi berkelanjutan. (Jika keluaran tidak menunjukkan osilasi berkelanjutan untuk nilai  $K_p$  apa pun, maka metode ini tidak berlaku.) Dengan demikian, *gain* kritis  $K_{cr}$  dan periode yang sesuai  $P_{cr}$  ditentukan secara eksperimental (lihat Gambar 2.27). Ziegler dan Nichols menyarankan bahwa peneliti menetapkan nilai-nilai parameter dan sesuai dengan formula yang ditunjukkan dalam Tabel 2.2 (Ogata, 2010).



Gambar 2. 26 *Closed-Loop system with a proportional controller*

Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 570.



Gambar 2.27 Sustained oscillation with period  $P_{er}$ . ( $P_{er}$  is measured in sec.)

Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 571.

Tabel 2.2

Metode Kedua Ziegler-Nichols Rule

Controller Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{er}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{er}$	$\frac{1}{1.2}P_{er}$	0
PID	$0.6K_{er}$	$0.5P_{er}$	$0.125P_{er}$

Sumber: Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5<sup>th</sup> ed.). Pearson Education, Inc, p. 571.

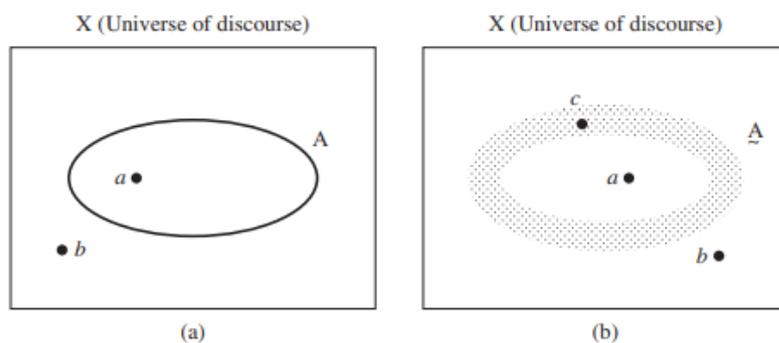
Sistem kontrol PID (*Proporsional, Integral, dan Derivatif*) memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu diperhatikan dalam implementasinya. Kelebihan utama PID adalah kemudahannya dalam pemahaman dan implementasi, serta sifatnya yang cukup tangguh terhadap variasi parameter sistem dan gangguan. PID juga bersifat adaptif dan dapat diaplikasikan pada berbagai jenis sistem dengan relatif mudah, memberikan respons cepat terhadap perubahan *setpoint* atau gangguan. Meskipun demikian, kekurangan PID meliputi ketergantungan yang cukup besar pada penyetelan parameter yang tepat. Kesalahan penyetelan dapat mengakibatkan respons sistem yang tidak optimal, terutama pada sistem kompleks atau sistem dengan dinamika yang berubah-ubah. Selain itu, PID tidak optimal untuk beberapa jenis sistem tertentu, seperti sistem dengan waktu tunda yang signifikan atau sistem *non-linear* yang kompleks. Kendati demikian, popularitas dan kemudahan penggunaan PID menjadikannya pilihan yang luas, dan kekurangan tersebut dapat diatasi dengan metode

penyetelan yang tepat atau dengan menggabungkannya dengan teknik kontrol lanjutan (Ogata, 2010).

### 2.8.2. Fuzzy Logic

Sistem kontrol logika *fuzzy* adalah pendekatan kontrol yang menggunakan konsep logika *fuzzy* untuk mengatasi ketidakpastian dalam suatu sistem. Logika *fuzzy* memungkinkan pengolahan variabel yang tidak tegas atau memiliki keanggotaan pada suatu himpunan dengan tingkat tertentu. Dalam sistem kontrol *fuzzy*, variabel *input* dan *output* diterjemahkan menjadi nilai linguistik melalui himpunan-himpunan *fuzzy*. Aturan-aturan *fuzzy* digunakan untuk membuat keputusan kontrol berdasarkan nilai keanggotaan dari variabel *input*. Proses ini memungkinkan sistem untuk merespons secara adaptif terhadap kondisi yang tidak pasti atau kompleks. Kelebihan sistem kontrol *fuzzy* adalah kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan kompleksitas, sehingga sering digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti kontrol mesin, kendaraan, dan sistem kecerdasan buatan (Ross, 2010).

Himpunan klasik dikenal sebagai himpunan dengan batasan yang tegas, sementara himpunan *fuzzy* memberikan ruang bagi batasan yang tidak jelas mengenai apakah suatu objek termasuk dalam himpunan tersebut. Gambar 2.28 memberikan contoh visual dari himpunan klasik dan himpunan *fuzzy*. Dalam himpunan klasik, objek hanya memiliki dua pilihan: termasuk dalam himpunan (seperti titik a) atau tidak termasuk dalam himpunan (seperti titik b). Sebaliknya, himpunan *fuzzy* mencakup objek dengan posisi yang tidak jelas mengenai keanggotaannya dalam himpunan atau di luar himpunan (seperti titik c) (Ross, 2010).

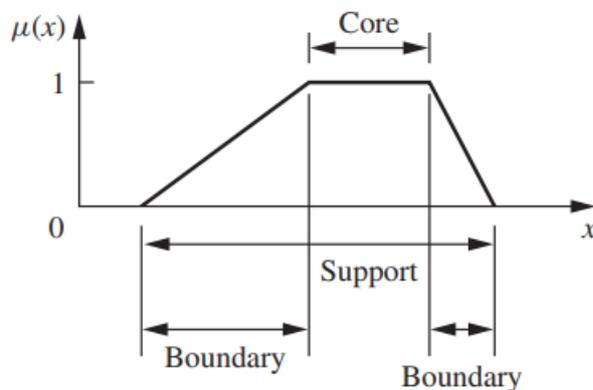


Gambar 2.28 (a) *Crisp set boundary* and (b) *Fuzzy set boundary*

Sumber: Ross, T. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Wiley, p. 26.

Menghitung, merasionalkan, dan memodelkan informasi *fuzzy* merupakan satu hal; namun, menerapkan hasil *fuzzy* ke dunia di sekitar peneliti adalah hal lain. Meskipun sebagian besar informasi yang peneliti serap setiap hari bersifat kabur, sebagian besar tindakan atau keputusan yang dilaksanakan oleh manusia atau mesin bersifat tegas atau *biner*. Keputusan yang peneliti buat yang memerlukan tindakan bersifat *biner*, perangkat keras yang peneliti gunakan bersifat *biner*, dan tentu saja komputer yang peneliti gunakan didasarkan pada instruksi digital biner (Ross, 2010).

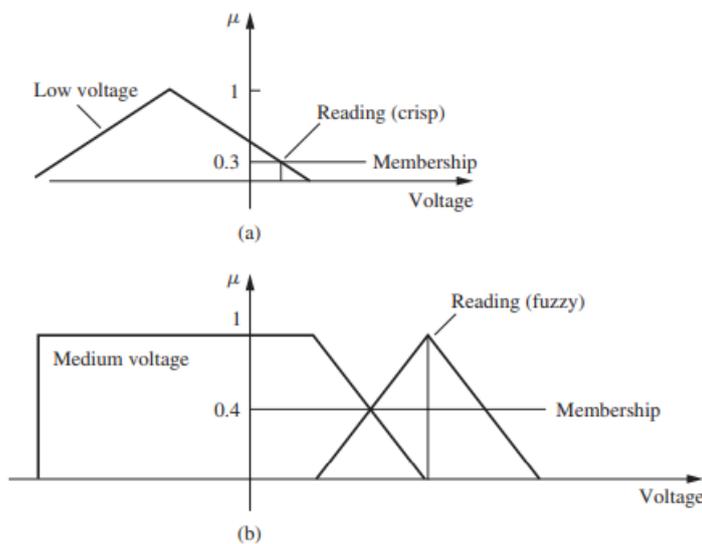
Dengan mempertimbangkan bahwa seluruh informasi yang terkandung dalam suatu himpunan *fuzzy* dijelaskan oleh fungsi keanggotaannya, maka berguna untuk mengembangkan suatu leksikon istilah yang dapat menjelaskan berbagai fitur khusus dari fungsi ini. Untuk keperluan kesederhanaan, fungsi yang ditunjukkan dalam gambar-gambar tersebut akan bersifat kontinu, tetapi istilah-istilah tersebut berlaku sama baiknya untuk himpunan *fuzzy* yang bersifat diskrit maupun kontinu. Gambar 2.29 dapat membantu dalam penjelasan ini (Ross, 2010).



Gambar 2.29 Core, support, and boundaries of a fuzzy set

Sumber: Ross, T. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Wiley, p. 90.

Dari Gambar 2.29 dapat dilihat terdapat tiga bagian utama: inti, dukungan, dan batas. Di inti, fungsi keanggotaan menunjukkan karakteristik keanggotaan penuh, atau dengan kata lain, derajat keanggotaan adalah 1. Di dukungan, terdapat daerah dengan derajat keanggotaan yang tidak nol. Sementara di bagian batas, objek masih dianggap sebagai bagian dari himpunan *fuzzy*, tetapi derajat keanggotaannya berada antara 0 dan 1 (Ross, 2010).



Gambar 2. 30 Comparisons of fuzzy sets and crisp or fuzzy readings: (a) Fuzzy set and crisp reading; (b) Fuzzy set and fuzzy reading

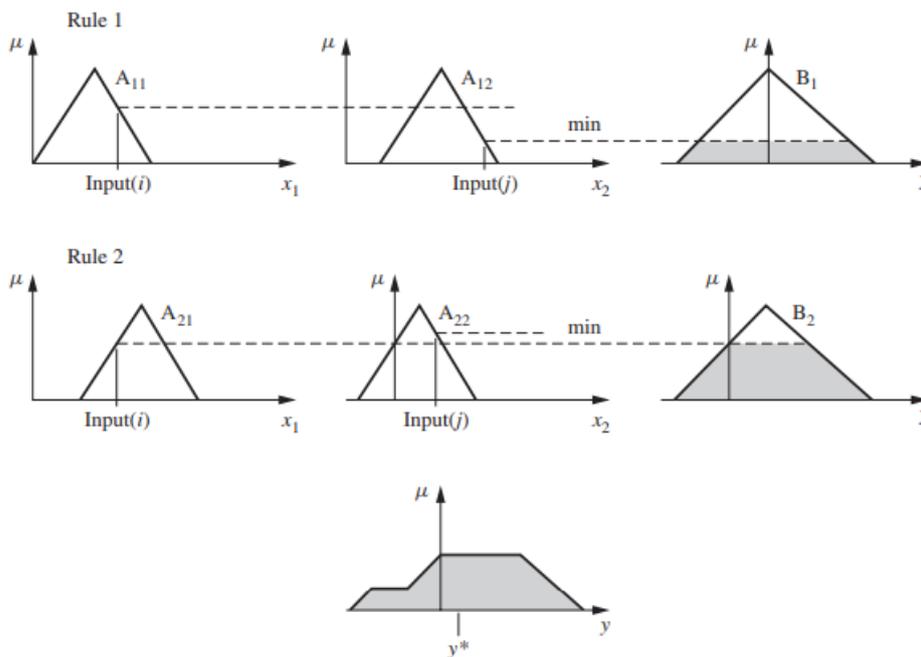
Sumber: Ross, T. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Wiley, p. 94.

Dalam menggunakan sistem *fuzzy* kontrol terdapat dua proses utama yang perlu diperhatikan. Pertama adalah proses *fuzzyfication*, di mana nilai pasti dari variabel *fuzzy* ditentukan. Penting untuk dicatat bahwa nilai pasti dalam konteks ini mencakup ketidakpastian. Seperti yang terlihat dalam Gambar 2.30, pembacaan nilai pasti dari suatu tegangan tertentu dalam himpunan *fuzzy* adalah 0.3. Proses kedua adalah proses *defuzzyfication*. Proses *defuzzyfication* merupakan langkah di mana nilai derajat keanggotaan dipertahankan, tetapi nilai yang dihasilkan dari himpunan *fuzzy* dicari. Proses *defuzzyfication* merupakan kebalikan dari proses *fuzzyfication*. Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam proses *defuzzyfication* adalah metode *centroid* (titik berat) (Ross, 2010). Persamaan untuk proses *defuzzification* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$z = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_c(z) \, dz} \quad (2. 78)$$

Untuk menghubungkan antara proses *fuzzyfication* dan *defuzzyfication*, diperlukan suatu aturan yang mengatur kondisi atau keadaan sebenarnya. Aturan umum yang biasa digunakan adalah "jika maka". Setelah proses *fuzzyfication*, nilai tersebut dimasukkan ke dalam aturan yang telah ditentukan. Jika nilai *input* melebihi satu, maka dapat digunakan penghubung

"dan" atau "atau". Perbedaannya adalah jika menggunakan penghubung "dan", nilai keanggotaan terkecil yang akan diambil, sedangkan jika menggunakan penghubung "atau", nilai terbesar yang akan diambil. Nilai tersebut kemudian diproses oleh proses *defuzzyfication*, yang prosesnya dapat digambarkan pada Gambar 2.31 (Ross, 2010).



Gambar 2.31 *Graphical mamdani (Max–Min) inference method with crisp inputs*

Sumber: Ross, T. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Wiley, p. 149.

Sistem kontrol *fuzzy* memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian dan variabilitas dalam sistem, membuatnya efektif untuk situasi di mana model matematis sulit didefinisikan. *Fuzzy logic* memberikan cara untuk melakukan perhitungan dengan ketidakpastian dan kekaburan. *Fuzzy logic* dapat digunakan untuk merepresentasikan beberapa jenis keahlian manusia. Keandalan, kehandalan, efisiensi, dan daya tahan kontrol logika *fuzzy* membuatnya populer. Kecepatan dan kompleksitas produksi aplikasi tidak akan mungkin tanpa sistem seperti *fuzzy logic* (Gupta, 2021). Sistem ini juga menawarkan fleksibilitas dan kemampuan adaptasi, serta *output* yang lebih mudah diinterpretasikan oleh manusia. Namun, implementasinya sering membutuhkan komputasi yang intensif, dan desain aturan dapat bersifat subjektif. Performa sistem sangat tergantung pada pemilihan fungsi keanggotaan, dan analisis matematis dapat menjadi sulit karena sifat *fuzzy*. Meskipun efektif untuk banyak aplikasi, sistem kontrol *fuzzy* mungkin kurang cocok untuk masalah dengan tingkat kompleksitas yang

sangat tinggi atau ketidakpastian yang ekstrem. Oleh karena itu, penggunaan dan desainnya perlu dipertimbangkan dengan cermat sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan spesifik aplikasi yang dituju (Ross, 2010).

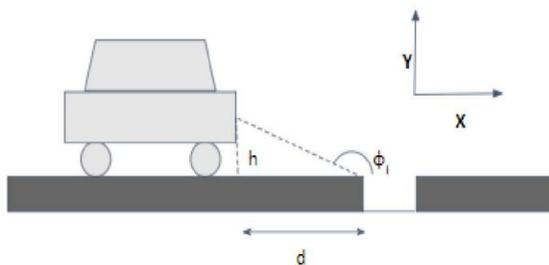
## **2.10. Perancangan Sistem Suspensi Aktif**

### **2.10.1. Radar cross section (RCS)**

Dalam menghadapi tantangan perawatan infrastruktur jalan, radar pendeteksi lubang di jalan menjadi solusi canggih yang membantu mendeteksi dan mengidentifikasi kerusakan pada permukaan jalan secara efisien. Dengan teknologi ini, pengawasan kondisi jalan dapat dilakukan secara *real-time*, memungkinkan tindakan preventif yang tepat waktu untuk memastikan keamanan dan kenyamanan perjalanan. Lubang jalan merujuk pada segala jenis kerusakan permukaan jalan pada aspal yang memiliki diameter lebih dari 150 mm. Lubang jalan disebabkan oleh adanya air dalam struktur tanah aspal dan lalu lintas berat secara bersamaan (Jo & Ryu, 2015). Baru-baru ini, deteksi lubang jalan telah diselidiki dengan berbagai jenis sensor termasuk laser, kamera dengan visual 2 dimensi, kamera dengan visual 3 dimensi yang berbasis berdasarkan kamera *stereo*, dan sensor getaran dengan akselerometer. Masing-masing dari sensor memiliki beberapa keterbatasan. Data gambar dari kamera tidak tersedia (tidak dapat terlihat) pada malam hari dan dalam kondisi jarak pandang yang buruk. Selain itu, kamera tidak dapat mendeteksi lubang di jalan ketika permukaan tanah tergenang air. Pada kasus data *stereo*, terdapat banyak masalah yang lebih rumit masalah semakin rumit dengan kebutuhan asosiasi data antara tampilan yang sesuai dari dua kamera, terutama karena tampilan permukaan jalan biasanya kabur dan berbutir. Sistem laser mahal dan tidak banyak digunakan dalam kebanyakan sistem ADAS (Srivastava et al., 2020).

*Radar Cross Section* (RCS) merupakan kemampuan dari suatu objek dalam memantulkan kembali radar sinyal kembali kepada sumber pemancarnya. Sifat pantulan dari target radar dicirikan sebagai *Radar Cross Section* (RCS), yang dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk geometri, sifat material, kekasaran permukaan, frekuensi, dan sudut serangan, dan lain sebagainya (Liao et al., 2018). Pada awalnya penggunaan RCS berkaitan dengan perkembangan teknologi radar dan kebutuhan dalam berbagai aplikasi militer dan sipil. Pada awalnya, perhatian utama adalah meningkatkan kemampuan radar untuk mendeteksi pesawat musuh. Namun, seiring berjalannya waktu, perhatian beralih ke cara-cara untuk mengurangi RCS pesawat sendiri agar sulit terdeteksi oleh radar musuh. Di sektor sipil, penggunaan RCS juga berkembang dalam berbagai aplikasi seperti penelitian cuaca, navigasi penerbangan, dan pemantauan lingkungan.

Di dunia otomotif itu sendiri penggunaan sistem radar sudah mulai digunakan. Radar pencegahan tabrakan telah diadopsi dengan cepat dan diharapkan menjadi fitur keselamatan standar dalam waktu dekat. Pita gelombang milimeter cocok untuk radar jarak pendek dan menengah. Ini menyediakan fungsi-fungsi seperti deteksi pejalan kaki, bantuan pengereman darurat, bantuan perubahan jalur, dan deteksi titik buta. Menurut peneliti sebelumnya yaitu Geary et al. (2013), tingkat RCS yang diukur dari mobil dan truk berkisar antara 20 hingga 30 dBsm saat dilihat dari belakang dan samping di kedua pita 24 dan 77 GHz. Sebaliknya, target lain di jalan, seperti pejalan kaki, sepeda, dan sepeda motor, memiliki nilai RCS yang lebih kecil. Pada 77 GHz, tingkat RCS pejalan kaki yang diukur bervariasi antara -20 hingga 0 dBsm (Chen et al., 2014).



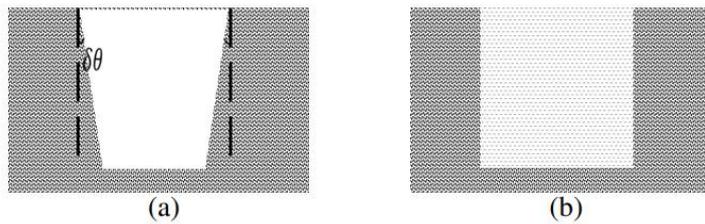
Gambar 2.32 Radar otomotif yang dipasang pada mobil pada ketinggian  $h = 0.6 \text{ m}$  melihat ke depan pada jarak  $d$  terhadap lubang di jalan, sudut insiden radar terhadap lubang adalah  $\phi_i$ , saat  $d$  bervariasi dari 150m hingga 10,14m,  $\phi_i$  berubah dari  $112^\circ$  hingga  $93.4^\circ$

Sumber: Srivastava, A., Goyal, A., & Ram, S. S. (2020, April). Radar cross-section of potholes at automotive radar frequencies. *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, p. 485.

Parameters	Values
Radar center frequency	79 GHz
Radar Bandwidth	4 GHz
Aspect angle ( $\phi_i$ )	$90^\circ$ to $110^\circ$
Pothole width ( $W$ )	0.2m or 0.4m
Pothole depth ( $H$ )	0.1m or 0.2m
Pothole curvature ( $\delta\theta$ )	$0^\circ$ to $27^\circ$
Ground dielectric constant ( $\epsilon_r^g$ )	4 (Asphalt), 10 (Concrete)
Ground conductivity ( $\sigma_c^g$ )	0.006 S/m
Pothole dielectric constant ( $\epsilon_r^p$ )	1 (Air), 4.3 (Rainwater)
Pothole conductivity ( $\sigma_c^p$ )	0 (Air), 0.003 (Rainwater)

Gambar 2.33 Parameters radar dan lubang di jalan yang dipertimbangkan dalam penyiapan eksperimen yang dilakukan oleh srivastava et al., (2020).

Sumber: Srivastava, A., Goyal, A., & Ram, S. S. (2020, April). Radar cross-section of potholes at automotive radar frequencies. *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, p. 485.



Gambar 2.34 Konfigurasi lubang di jalan (a) dengan lengkungan sepanjang dinding samping; (b) Dengan air hujan di dalam *aperture*

Sumber: Srivastava, A., Goyal, A., & Ram, S. S. (2020, April). Radar cross-section of potholes at automotive radar frequencies. *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, p.485.

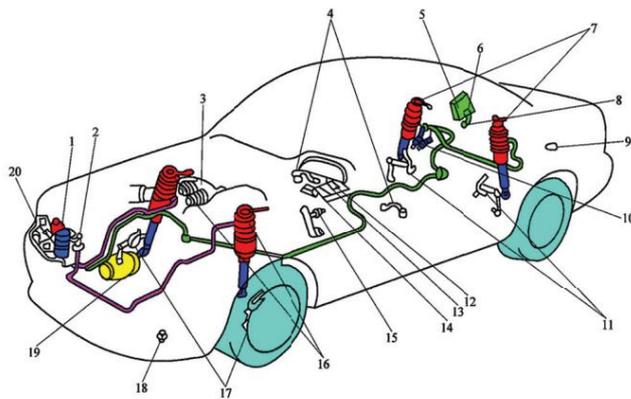
Menurut Srivastava et al., (2020) hasil penelitian yang dilakukan menggunakan teknik simulasi FDTD untuk memperkirakan *radar cross-section* (RCS) dari lubang di jalan. Hasilnya menunjukkan bahwa lubang hanya memberikan *backscatter* yang signifikan jika sifat listrik dari material lubang berbeda dengan material tanah di sekitarnya. Selain itu, ukuran, kedalaman, dan kelengkungan lubang hanya memberikan variasi kecil pada *radar cross-section*. Lubang yang diisi dengan udara dan air hujan memiliki *radar cross-section* yang sebanding karena konstanta dielektrik dan konduktivitas air hujan yang rendah. Lubang dengan dinding yang membentuk segitiga memberikan kembali yang lebih kuat daripada lubang dengan penampang berbentuk persegi. Berdasarkan hasil penelitian tersebut penggunaan RCS sebagai radar untuk sistem suspensi aktif memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi karena spesifikasi radar dari RCS yang bervariasi dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna.

### 2.10.2. *Active Electromagnetic Suspension System (AEMSS)*

Untuk mendapatkan respon yang cepat dalam pengendalian ketinggian suspensi pada kendaraan peneliti memilih menggunakan Sistem suspensi elektromagnetik yang dapat disesuaikan adalah suatu teknologi suspensi pada kendaraan yang menggunakan medan elektromagnetik untuk mengatur keempukan dan ketinggian kendaraan. Menurut Ding et al. (2019) suspensi ini dapat bereaksi dalam waktu 1 ms, menahan getaran, dan menjaga stabilitas tubuh kendaraan. Sensor pada sistem kontrol suspensi elektronik mengubah kondisi permukaan jalan kendaraan (termasuk getaran, kecepatan, saat mulai, percepatan, pengemudian, pengereman, dan informasi lainnya) menjadi sinyal listrik dan mengirimkannya ke unit kontrol elektronik (ECU). Proses integrasi sinyal listrik yang dikirim oleh sensor dilakukan oleh ECU suspensi, dan kemudian sinyal kontrol kekakuan suspensi, koefisien redaman, dan ketinggian

tubuh kendaraan diberikan. Sistem aktuator suspensi terdiri dari katup elektromagnetik, motor langkah, dan motor pompa.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.35., 1: Kompresor pengendali ketinggian; 2: Katup pengendali ketinggian No. 1; 3: Sensor posisi throttle utama; 4: Saklar lampu kesopanan; 5: ECU suspensi; 6: Relay pengendali ketinggian No. 2; 7: Aktuator pengendali suspensi belakang; 8: Konektor pengendali ketinggian; 9: Saklar pengendali ketinggian; 10: Katup pengendali ketinggian No. 2 dan katup overflow. Kemudian, 11: Sensor pengendali ketinggian; 12: Saklar LRC; 13: Saklar pengendali ketinggian; 14: Sensor kemudi; 15: Saklar lampu rem; 16: Aktuator pengendali suspensi depan; 17: Sensor pengendali ketinggian; 18: Relay pengendali ketinggian No. 1; 19: Regulator IC; 20: Pengering dan katup pembuangan.

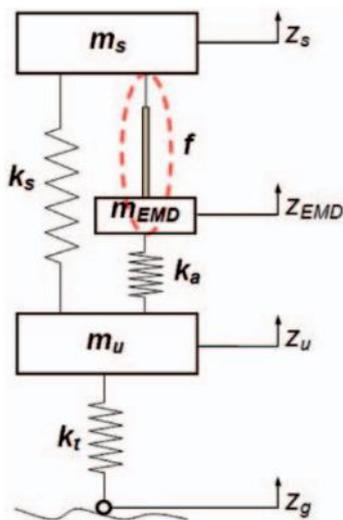


Gambar 2.35 *Electronic controlled active suspension system*

Sumber: Ding, Z., Lei, Z., & Singh, A. K. (2019, October 9). The design of automotive electronic control suspension system based on digital simulation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(3), 3205–3215.

*The electromagnetic dampers (EMDs)* merupakan sistem suspensi aktif penghasil energi yang menggunakan motor elektromagnetik searah (DC) *linear* sebagai aktuator. EMD berfungsi sebagai aktuator aktif dalam menyediakan redaman yang memadai untuk isolasi getaran sambil menghasilkan energi dari pergerakan relatif antara massa terapung dan massa yang tidak terapung dengan mempertimbangkan strategi kontrol hibrid. Strategi kontrol hibrid merupakan kombinasi *linear* dari strategi kontrol *skyhook* dan *groundhook*. Sistem ini menggunakan dua motor elektromagnetik DC. Satu motor, yang disebut sebagai regenerative damper, ditempatkan di suspensi primer dan motor lainnya, yang disebut sebagai aktuator, terletak di suspensi sekunder. Pengendalian getaran aktif yang menggunakan satu aktuator yang

bertenaga sendiri. Aktuator menghasilkan daya ketika kecepatan armatur tinggi. Daya yang dihasilkan akan digunakan saat kecepatan armatur rendah. Dengan menggunakan sistem suspensi elektromagnetik aktif (AEMSS) yang telah menggunakan strategi kontrol hibrid dapat memberikan beberapa keuntungan bagi peneliti. Sistem ini dapat meningkatkan kinerja sistem dan efisiensi energi. Sistem ini dapat meregenerasi energi dari eksitasi jalan dan mengubahnya menjadi energi listrik, serta meminimalkan perjalanan suspensi untuk keamanan dan kenyamanan berkendara (Montazeri-Gh & Kavianipour, 2013).



Gambar 2.36 Modified electromagnetic suspension model. EMD: Electromagnetic Damper

Sumber: Montazeri-Gh, M., & Kavianipour, O. (2013, November 11). Investigation of the active electromagnetic suspension system considering hybrid control strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(10), 1658–1669.

Jika peneliti ingin menggunakan motor linear dalam aplikasi suspensi aktif kendaraan peneliti perlu menambahkan metode kompensasi adaptif dengan menggunakan filter adaptif FxRLS untuk mengurangi pengaruh non-linieritas pada kontrol sistem. penggunaan motor *linear* memiliki non-linieritas yang dapat mempengaruhi kinerja suspensi aktif elektromagnetik. Non-linieritas seperti gesekan dan fluktuasi gaya dapat mengurangi keluaran gaya efektif suspensi aktif. Namun, dengan menggunakan metode kompensasi adaptif yang diusulkan, pengaruh non-linieritas dapat diminimalkan, bahkan pada resonansi orde pertama, dan keluaran gaya efektif suspensi dapat diperbesar (Li et al., 2020).

## **2.11. Jenis-jenis Halangan Pada Jalan Raya**

### **1.11.1. Polisi Tidur (*Road Hump*)**

Polisi tidur (*road hump*) merupakan rintangan yang dengan sengaja dibuat untuk memperlambat kecepatan kendaraan yang melewati jalan tersebut. Dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia No PM 14 Tahun 2021 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 82 Tahun 2018 Tentang Alat Pengendali dan Pengaman Pengguna Jalan disebutkan peraturan tentang alat pengendali atau pembatas kecepatan (*road humps*), *road humps* adalah kelengkapan tambahan pada jalan yang berfungsi untuk membuat pengemudi kendaraan bermotor mengurangi kecepatannya (Setiawan et al., 2023). Polisi tidur biasanya sering sekali ditemukan pada jalan-jalan kecil seperti gang, jalanan perumahan, maupun di jalanan dengan kecepatan tinggi yang terdapat tempat-tempat penting seperti rumah ibadah, sekolah, rumah sakit, dan lain sebagainya. Dengan dipasangnya polisi tidur pada beberapa ruas jalan terbukti bahwa pemasangan polisi tidur meningkatkan persepsi risiko dan mendorong pengemudi untuk memperlambat kendaraan, sehingga pejalan kaki yang menyeberang jalan menjadi lebih aman. Selain itu pemasangan polisi tidur terbukti dengan adanya penurunan kecepatan, sehingga jumlah kecelakaan lalu lintas dengan cedera berkurang dari lima menjadi satu (Antić et al., 2013). Polisi tidur itu sendiri biasanya terbuat dari beton, aspal, atau bahan lain yang cukup kuat untuk menahan berat kendaraan. Dalam membuat desain polisi tidur, dimensi polisi tidur tersebut sangat berpengaruh bagi pengendara karena kesalahan kecil pun dapat menyebabkan masalah seperti kerusakan pada kendaraan, ketidaknyamanan bagi penumpang akibat guncangan yang kuat, dan bahkan cedera dalam kasus yang parah. Salah satu masalah lainnya adalah penurunan kecepatan yang tidak memadai karena desain yang tidak efisien (Lav et al., 2018). Dalam Pasal 2 Permenhub 82/2018 tersebut, dijelaskan ada tiga jenis polisi tidur yang boleh dibangun di jalanan, yaitu *Road hump*, *Speed Hump*, dan *Speed Table* (kompas.com, 2019).

### **1.11.2. Jenis-jenis Kerusakan Pada Jalan**

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006, jalan adalah sarana transportasi darat yang mencakup semua bagian jalan, termasuk bangunan dan perlengkapannya yang digunakan untuk lalu lintas. Jalan ini bisa berada di permukaan tanah, di atas tanah, di bawah tanah, atau di atas air, kecuali untuk jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel. Menurut manual pemeliharaan jalan No: 03/MN/B/1983 yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, kerusakan jalan dapat dibedakan menjadi 6 jenis yaitu retak (*cracking*),

distorsi (*distortion*), cacat permukaan (*disintegration*), pengausan (*polished aggregate*), kegemukan (*bleeding of flushing*), dan penurunan pada bekas penanaman utilitas (Yudaningrum & Ikhwanudin, 2017).