

BAB II

DASAR TEORI

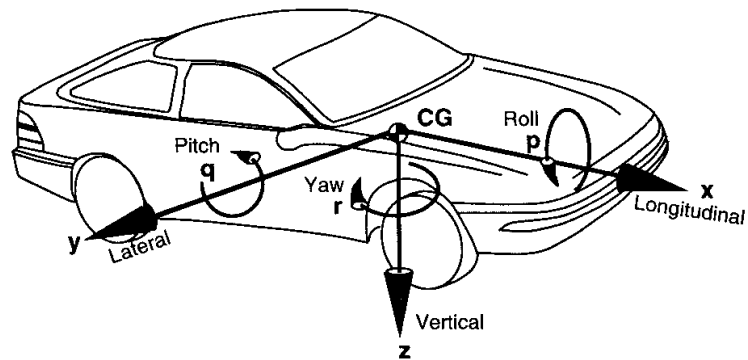
2.1. Kendaraan Jalan Raya

Kendaraan jalan raya merupakan kendaraan yang beroperasi di daratan, berbeda halnya dengan pesawat terbang dan juga kapal laut yang beroperasi di udara dan air. Kendaraan yang beroperasi di daratan dapat diklasifikasikan menjadi *guided* dan *nonguided*. *Guided vehicle* adalah kendaraan yang beroperasi pada jalur yang tetap dan terarah, seperti halnya kendaraan yang beroperasi diatas rel dan juga *track levitated vehicle*. *Nonguided vehicle* adalah kendaraan yang dapat bergerak secara bebas pada arah yang bervariasi seperti halnya pada jalan raya dan juga pada *off road vehicle*.

Pada umumnya, karakteristik dari kendaraan jalan raya dapat digambarkan pada tiga hal, yaitu unjuk kerja, *handling*, dan *ride*. Karakteristik unjuk kerja mengacu pada kemampuan dari kendaraan tersebut untuk dapat melaju, mengatasi rintangan yang ada di jalan raya, dan juga untuk melakukan pengereman. Karakteristik *handling* difokuskan pada respon kendaraan terhadap instruksi yang diberikan oleh pengemudi dan juga kemampuannya untuk menstabilkan gerak kendaraan tersebut terhadap gangguan dari luar. Karakteristik dari *ride* kendaraan berhubungan dengan getaran yang dihasilkan kendaraan karena permukaan jalan yang tidak rata serta menikung dan juga akibat pengaruh dari adanya penumpang dan barang-barang muatan dalam kendaraan tersebut. Berbagai teori dari kendaraan jalan raya ini difokuskan pada kajian tentang unjuk kerja, *handling*, dan juga *ride*.

2.2. Sistem Koordinat Kendaraan

Kendaraan jalan raya mampu bergerak ke segala arah tanpa dibatasi jalur atau track sesuai dengan perintah dari pengemudi kendaraan. Untuk lebih mudahnya, gerakan kendaraan didefinisikan dengan menggunakan sistem koordinat aturan tangan kanan, seperti terlihat pada Gambar 2.1. Melalui konvensi SAE, koordinat tersebut ditentukan sebagai berikut.



Gambar 2.1 SAE Vehicle Axis System [3].

2.2.1. Sistem Koordinat Global

Kendaraan memiliki sistem koordinat tetap pada kendaraan itu sendiri dengan menggunakan aturan tangan kanan. Namun demikian, pergerakan dari kendaraan harus didefinisikan ke dalam suatu sistem koordinat lain yang tetap atau tidak berubah terhadap kendaraan, sistem koordinat seperti ini dinamakan sistem koordinat global. Sistem koordinat global ini digunakan untuk mengevaluasi jalur lintasan atau trayektori dari kendaraan. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.2. Koordinat tersebut adalah :

X - arah depan

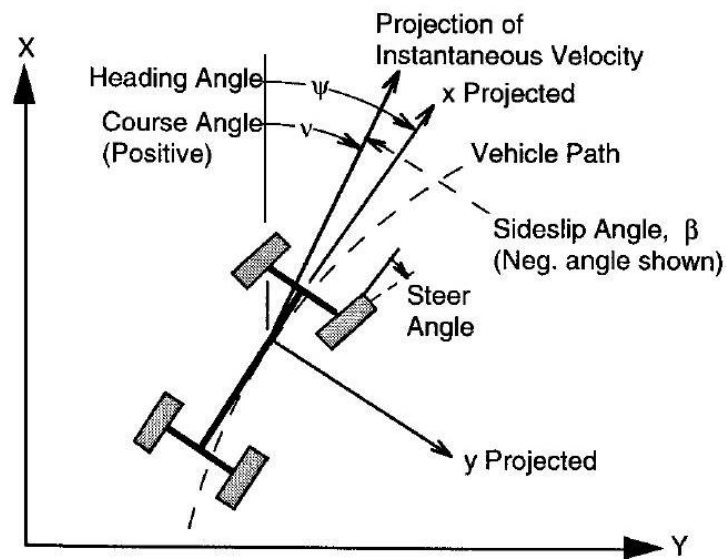
Y - arah ke kanan

Z - arah vertical (positif ke bawah)

Ψ - *heading angle* (sudut antara x dan X pada *ground plane*)

ν - *course angle* (sudut antara vector kecepatan kendaraan dengan sumbu $-X$)

β - *side slip angle* (sudut antara sumbu $-x$ dengan vector kecepatan kendaraan)



Gambar 2.2 *Vehicle in an Earth Fixed Coordinate System* [3].

2.3. Mekanika Ban

Ban merupakan komponen yang penting bagi kendaraan. Semua gaya-gaya penggerak yang menimbulkan pergerakan kendaraan jalan raya dihasilkan oleh ban. Di dalam kendaraan, semua kontrol utama dan gaya-gaya yang berpengaruh pada kendaraan terletak pada ban, kecuali gaya aerodinamik yang dihasilkan oleh fluida lingkungan, dalam hal ini udara. Dapat dikatakan bahwa kontrol terhadap gaya pada kendaraan yang menentukan apakah kendaraan tersebut akan berbelok, melakukan pengereman, dan mengalami percepatan dihasilkan oleh kontak antara ban dengan jalan yang luasnya tidak kurang daripada telapak tangan laki-laki dewasa. Pemahaman terhadap keterkaitan antara ban, kondisi operasi dari ban tersebut, dan gaya-gaya serta moment yang dihasilkan oleh ban tersebut merupakan suatu aspek yang penting terhadap karakteristik dinamik dari kendaraan secara keseluruhan.

Ban memegang peranan penting bagi kendaraan, ada tiga fungsi dasar ban bagi kendaraan, yaitu:

1. Menahan beban pada arah vertikal, ketika mengalami gangguan dari kondisi jalan yang tidak rata.
2. Menghasilkan gaya pada arah longitudinal ketika mengalami percepatan atau pengereman.
3. Menghasilkan gaya pada arah lateral ketika menikung.

Ban yang digunakan pada kendaraan jalan raya, adalah ban pneumatik. Ban pneumatik dapat memenuhi ketiga fungsi di atas dengan efektif dan efisien, sehingga ban jenis ini lazim digunakan pada kendaraan jalan raya, dan juga cukup populer digunakan pada kendaraan *off-road*. Kajian terhadap ban pneumatik ini sangat penting dilakukan untuk dapat memahami unjuk kerja serta karakteristik lainnya dari kendaraan jalan raya.

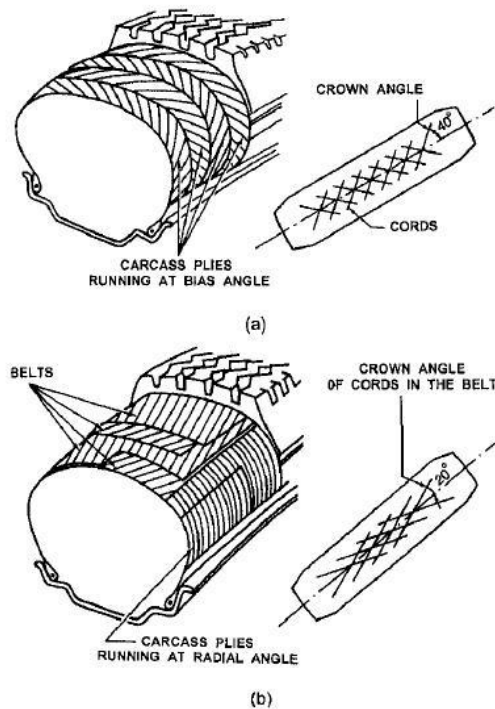
2.3.1. Struktur Ban Pneumatik

Ban pneumatik merupakan struktur yang sangat fleksibel berbentuk *toroid* serta diisi dengan udara yang dimampatkan. Elemen ban yang paling penting adalah *carcass*. *Carcass* ini terbuat dari beberapa lapis kawat-kawat fleksibel dengan modulus elastisitas yang tinggi. *Carcass* ini terbungkus dalam sebuah matriks *rubber* dengan modulus elastisitas yang rendah. Kawat-kawat yang menyusun *carcass* tersebut terbuat dari komposisi alami, sintetis, ataupun metal, dan direkatkan di sekeliling *beads* yang terbuat dari kawat baja dengan *tensile strength* yang tinggi. *Beads* tersebut berfungsi sebagai fondasi untuk *carcass*. Komposisi dari karet dipilih agar menghasilkan ban dengan properti yang spesifik. Karet yang digunakan sebagai pelapis dinding samping umumnya dibutuhkan dengan properti daya tahan yang tinggi terhadap *fatigue* dan *scuffing*, untuk hal ini *styrene butadiene* umum digunakan.

2.3.2. Tipe Ban Pneumatik

Terdapat dua tipe dasar dari ban pneumatik, ban tipe *radial* dan *bias ply*. Kedua tipe tersebut seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3. Ban dengan tipe *bias ply* merupakan standar ban untuk industri otomotif di Amerika pada sebelum tahun 1960-an, dimana pada tahun tersebut keuntungan menggunakan dari ban tipe *radial* telah diketahui kelebihannya, dan ban tipe ini di kembangkan di daratan Eropa. Selama lebih

dari beberapa dekade, ban tipe *radial* ini telah menggantikan ban tipe *bias ply* pada penggunaannya di kendaraan penumpang (*passenger car*), dan tipe *radial* menjadi standar penggunaan ban saat ini.



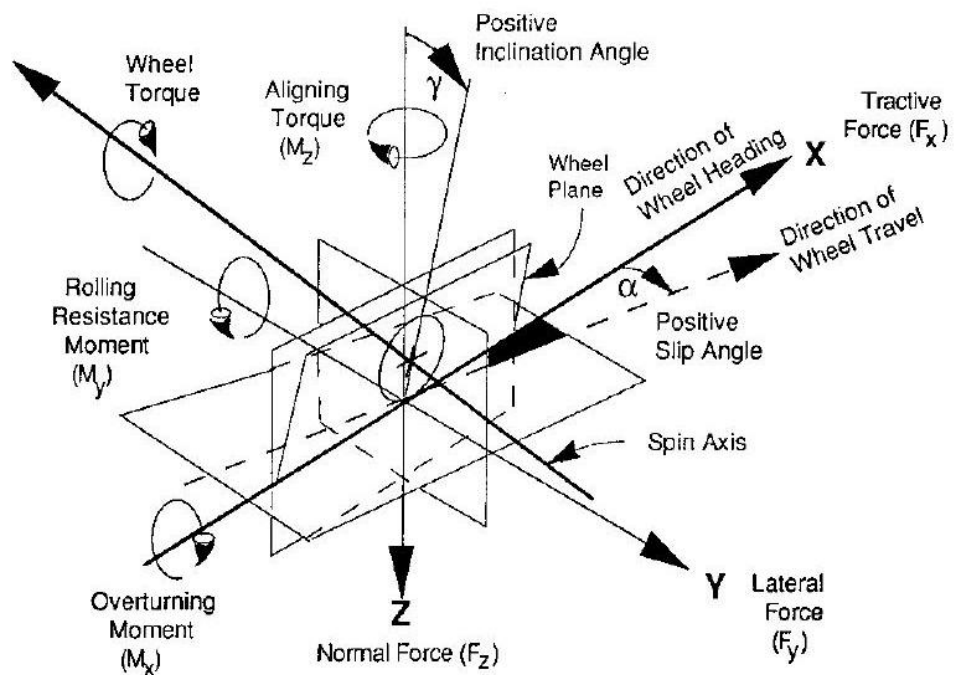
Gambar 2.3 *Tire Construction*. (a) *Bias-ply tire*, (b) *Radial-ply tire* [12].

Konstruksi dari ban tipe *radial* memiliki karakteristik dengan adanya *parallel plies* yang terletak melintang ban dari satu *bead* ke *bead* lainnya pada besaran sudut 90° . *Plies* tersebutlah yang lebih dikenal dengan istilah *carcass*. Tipe konstruksi seperti ini membuat dinding samping sangat fleksibel dan nyaman dikendarai tetapi memberikan sedikit ketidakstabilan dalam arah gerak. Kestabilan arah ban tipe ini dihasilkan dengan adanya *belt* yang terbuat dari kawat baja yang terletak mengelilingi ban di antara *carcass* dan *tread* di bagian luar. Sudut dari kawat-kawat yang terletak di dalam *belt* normalnya berkisar antara 20° . Dalam melakukan gerak menikung, *belts* tersebut membantu menstabilkan *tread*, menjaganya agar tetap datar dengan jalan. Kebanyakan ban tipe *radial* untuk kendaraan penumpang memiliki dua lapisan *carcass*, dan satu atau dua *belts* baja, serta dua hingga enam lapis *belts* hasil fabrikasi.

Pada konstruksi ban tipe *bias*, *carcass* dibuat lebih dari dua lapis yang terbentang dari satu *bead* ke *bead* yang lainnya dengan kawat-kawat bersudut besar ($35^\circ - 40^\circ$). Sudut yang besar tersebut menghasilkan kenyamanan dalam berendara, tetapi sudut yang kecil adalah yang paling baik jika ingin memperoleh kestabilan arah gerak. Meskipun *carcass* dari ban tipe ini secara lateral sangat kaku daripada tipe *radial*, dalam gerak menikung, ban tipe ini memungkinkan *tread*-nya mengalami *roll*, sehingga menyebabkan beban berlebih pada rangka luar. Konstruksi ban tipe ini pula menyebabkan lebih banyak distorsi pada *contact patch* ketika permukaan *toroid* terdeformasi menjadi rata, menyebabkan *tread* mengalami *squirm* pada area *contact patch* ketika ban berputar.

2.3.3. Sistem Sumbu

Untuk mempermudah menggambarkan model ban yang tepat terhadap kondisi operasi, gaya-gaya, dan moment yang dihasilkan oleh suatu ban, SAE telah mendefinisikan sistem sumbu seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.5. Sumbu X adalah perpotongan antara bidang roda dan bidang jalan dengan arah positif ke depan sesuai arah gerak maju kendaraan. Sumbu Z tegak lurus terhadap bidang jalan dengan arah positif menuju ke bawah. Sumbu Y terletak pada bidang jalan, arahnya dipilih untuk membuat sistem sumbu ini menjadi *orthogonal* dan sesuai dengan kaidah tangan kanan.



Gambar 2.4 SAE Tire Axis System [3].

Definisi berikut ini sangat penting dalam menggambarkan ban dan sistem sumbunya.

- *Wheel plane* – bidang sentral pada ban yang tegak lurus sumbu putar.
- *Wheel center* – perpotongan antara *wheel plane* dengan sumbu putar.
- *Center of tire contact* – perpotongan antara *wheel plane* dengan proyeksi dari sumbu putar pada bidang jalan.
- *Loaded radius* – jarak dari pusat kontak ban ke pusat roda pada bidang roda.
- *Longitudinal force (F_x)* – komponen gaya pada ban yang dihasilkan oleh jalan pada bidang jalan dan parallel terhadap perpotongan dari *wheel plane* dengan *road plane*. Komponen gaya pada arah gerak roda (komponen sinus dari *lateral force* dan kosinus dari *longitudinal force*) disebut *tractive force*.
- *Lateral force (F_y)* – komponen gaya pada ban yang dihasilkan oleh jalan pada bidang jalan dan tegak lurus terhadap perpotongan antara *wheel plane* dengan *road plane*.

- *Normal force (F_z)* – komponen gaya pada ban yang dihasilkan oleh jalan yang tegak lurus terhadap *road plane*. Gaya normal ini berharga negatif. Istilah beban vertikal didefinisikan sebagai kebalikan dari gaya normal, sehingga nilainya positif.
- *Overturning moment (M_x)* – moment yang bekerja pada ban yang diakibatkan oleh jalan pada bidang jalan dan parallel terhadap perpotongan antara *wheel plane* dengan *road plane*.
- *Rolling resistance moment (M_y)* – moment yang bekerja pada ban yang diakibatkan oleh jalan pada bidang jalan dan tegak lurus terhadap perpotongan antara bidang roda dan bidang jalan.
- *Aligning moment (M_z)* – moment yang bekerja pada ban yang diakibatkan oleh jalan yang tegak lurus terhadap bidang jalan.
- *Slip angle (α)* – sudut antara arah depan roda dengan arah pergerakan roda. Sudut slip positif apabila ban bergerak ke arah kanan.
- *Camber angle (γ)* – sudut antara bidang roda dan sumbu vertikal. Sudut camber positif apabila bagian atas roda berotasi mengarah keluar kendaraan.

2.4. Handling (Sistem Kemudi)

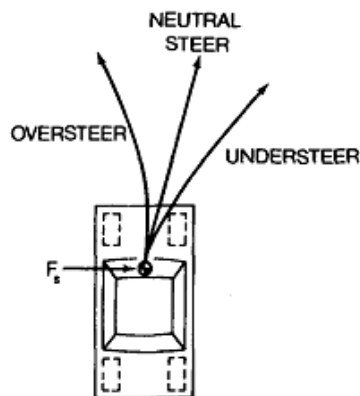
Karakteristik *handling* merupakan perilaku atau respon sebuah kendaraan terhadap perintah kemudi maupun pengaruh lingkungan seperti hembusan angin dan gangguan-gangguan jalan yang memberikan pengaruh terhadap arah laju kendaraan. Dimana ada dua pokok dasar dalam menangani kendaraan : pertama adalah kontrol arah gerak dari suatu kendaraan kemudian kemampuan untuk menstabilkan arah gerakan terhadap gangguan dari luar (eksternal).

Kendaraan jalan raya sebagai *rigid body* memiliki 6 derajat kebebasan (6 DOF), yaitu translasi pada sumbu x, y dan z dan juga rotasi di ketiga sumbu tersebut. Gerakan utama yang berhubungan dengan perilaku *handling* dari kendaraan adalah gerakan longitudinal (translasi sumbu x), lateral (translasi sumbu y), yaw (rotasi sumbu z), sedangkan faktor yang mempengaruhi *handling characteristics* dari suatu kendaraan antara lain adalah : sifat ban, letak dari *center of gravity* (CG), penambahan kecepatan,

dan kontrol arah, serta keseimbangan. Respon suatu kendaraan terhadap masukan (*input*) *steering* dan keseimbangan arah berhubungan dengan *steering wheel* yang ditetapkan [12].

Karakteristik *handling* sangatlah penting karena menentukan jenis *steering*, pengontrolan, dan keamanan dari desain kendaraan yang dibuat, karakteristik *handling* sendiri dipengaruhi oleh gaya lateral, distribusi beban antara depan dan belakang, dan penambahan kecepatan kendaraan. Karakteristik *handling* juga berguna bagi pengemudi untuk membantu mempermudah dalam mengontrol pada saat mengemudi.

Pada saat kendaraan berbelok ada tiga jenis kondisi yang kerap terjadi pada belokan yaitu *understeer*, *neutralsteer*, dan *oversteer*. Sebagai gambaran awal perhatikan gambar 2.5 berikut ini :



Gambar 2.5 Kondisi kendaraan pada saat berbelok [12].

Dimana ketiga kondisi tersebut dipengaruhi oleh koefisien *understeer*, K_{us} dan dinyatakan dalam radian [12]. Penjelasan tentang ketiga kondisi tersebut akan dibahas pada sub-bab berikut ini.

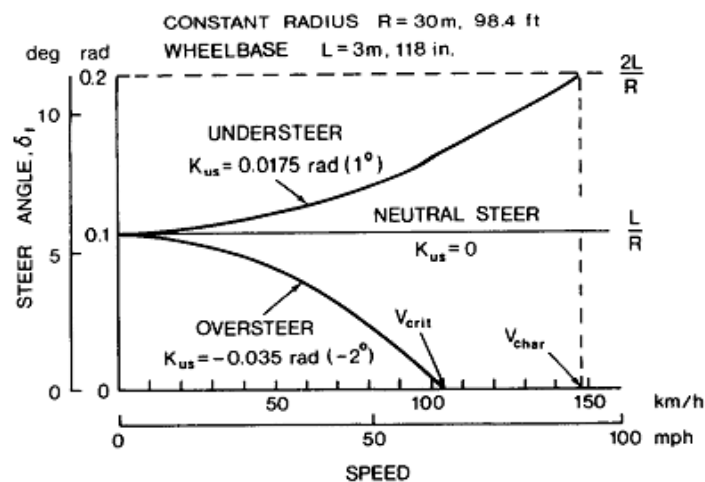
2.4.1 Neutral Steer

Ketika kendaraan memiliki koefisien understeer $K_{us} = 0$, dimana ekuivalen dengan sudut slip pada ban depan dan belakang sama (dapat ditulis α_f dan α_r dan $W_f / C_{\alpha f} = W_r / C_{\alpha r}$), pada keadaan ini sudut steer δ_f dikatakan berbanding lurus dengan

perbandingan *wheelbase* dan radius belok dari kendaraan tersebut [12] persamaannya dapat ditulis :

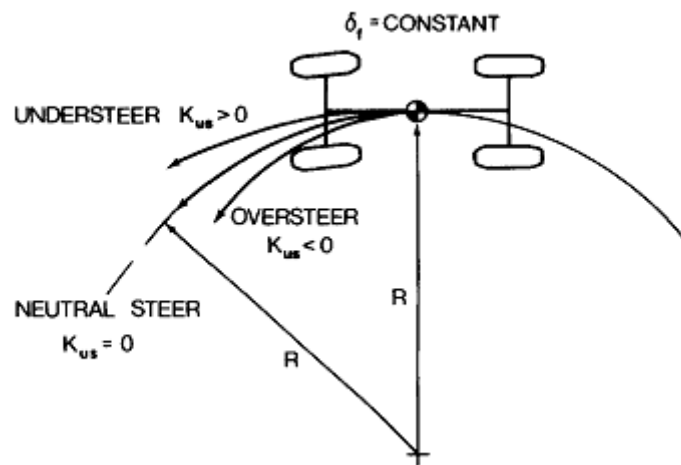
$$\delta_f = L/R \quad (2.1)$$

Kendaraan dengan kondisi diatas mempunya sifat handling yang disebut dengan “*neutral steer*” dimana karakteristik-karakteristik handling untuk radius belokan konstan diwakili oleh garis horizontal dalam diagram *steer angle-speed* yang ditunjukkan pada gambar 2.6 [12].



Gambar 2.6 Hubungan antara sudut *steer* dan kecepatan dari *neutral steer*, *understeer*, dan *oversteer* [12].

Pada saat kendaraan mengalami kondisi *neutral steer*, pengemudi harus menjaga posisi roda kemudi pada posisi tetap. Dengan kata lain, ketika kendaraan berakselerasi dengan *steering wheel* tetap, radius putar / beloknya juga tetap tidak berubah, sebagai ilustrasi terlihat pada gambar 2.7. Ketika *neutral steer* kendaraan akan berpindah sepanjang garis lurus, hal ini disebabkan oleh gaya-gaya menyamping yang terjadi pada pusat gravitasi, dan sudut *slip* akan sama dihasilkan pada saat ban depan dan belakang (e.i., $\alpha_f = \alpha_r$). Sehingga kendaraan bergerak pada garis edar mengikuti jalur pada sudut awalnya, seperti terlihat pada gambar dibawah ini [12].



Gambar 2.7 Kurva respon pada sudut *steer* tetap (*fixed*) [12].

2.4.2 Understeer

Ketika kendaraan memiliki koefisien understeer $K_{us} > 0$, dimana ekuivalen dengan sudut *slip* pada ban depan α_f menjadi lebih besar daripada ban belakang α_r (dapat ditulis $\alpha_f > \alpha_r$ dan $W_f / C_{\alpha f} > W_r / C_{\alpha r}$), pada sudut *steer* δ_f dibutuhkan untuk mengatasi kenaikan belokan yang diberikan dengan kuadrat dari kecepatan balik kendaraan (*lateral acceleration*). Kendaraan dengan sifat *handling* ini disebut dengan “*understeer*”, karakteristik-karakteristik *handling* untuk radius belokan konstan diwakili oleh sebuah parabola dalam diagram *steer angle-speed* seperti ditunjukkan pada gambar 2.6.

Untuk kendaraan *understeer*, saat berakselerasi pada belokan dengan radius konstan pengemudi harus menaikkan sudut *steer* dikarenakan jika sudut *steer* tetap, maka radius belok akan terus bertambah [12]. Disaat yang sama posisi *steering wheel* dan kecepatan balik kendaraan, radius belokan dari kendaraan *understeer* yang lebih besar daripada kendaraan *neutral steer*. Ketika penetapan gaya menyamping saat titik berat dari kendaraan *understeer* semula berpindah sepanjang garis lurus, ban-ban depan akan menghasilkan sudut *slip* yang lebih besar daripada ban-ban belakang (e.i., $\alpha_f > \alpha_r$).

Untuk kendaraan pada kondisi *understeer*, karakteristik kecepatan V_{char} mungkin dapat diketahui. Karakteristik kecepatan adalah kecepatan pada saat *steer angle* dibutuhkan untuk berbelok agar sama dengan $2L/R$, seperti terlihat pada gambar 2.6

$$V_{char} = \sqrt{\frac{gL}{K_{us}}} \quad (2.2)$$

2.4.3 Oversteer

Ketika kendaraan mempunyai koefisien understeer $K_{us} < 0$, dimana ekuivalen terhadap sudut *slip* pada ban depan α_f menjadi lebih kecil daripada ban belakang α_r (dapat ditulis $\alpha_f < \alpha_r$ dan $W_f / C_{af} < W_r / C_{ar}$), pada sudut *steer* δ_f dibutuhkan untuk mengatasi penurunan belokan yang diberikan dengan penambahan kecepatan balik kendaraan (*lateral acceleration*). Kendaraan dengan sifat *handling* ini disebut “*Oversteer*”[12].

Hubungan antara sudut *steer* yang dibutuhkan dengan kecepatan balik untuk macam-macam kendaraan saat radius belokan konstan diilustrasikan dalam gambar 2.6. Untuk kendaraan pada kondisi *oversteer*, ketika diakselerasikan dalam radius belokan konstan, maka pengemudi harus mengurangi sudut *steer* dikarenakan jika sudut *steer* tetap, maka radius belok akan terus berkurang sebagaimana terlihat pada gambar 2.7. Untuk posisi *steering wheel* yang sama dan kecepatan balik kendaraan, radius belok dari kendaraan *oversteer* adalah lebih kecil daripada kendaraan *neutral steer*. Ketika penetapan gaya menyamping saat titik berat dari kendaraan *oversteer* semula berpindah sepanjang garis lurus, maka sudut slip ban-ban depan akan kurang dari ban-ban belakang (e.i., $\alpha_f < \alpha_r$).

Untuk kendaraan *oversteer*, kecepatan kritis V_{crit} dapat diketahui. Yaitu kecepatan dimana sudut *steer* dibutuhkan untuk mengatasi belokan adalah nol, sebagaimana terlihat pada gambar 2.6 [12].

$$V_{char} = \sqrt{\frac{gL}{-K_{us}}} \quad (2.3)$$

2.4.4 Yaw Rate

Alasan sistem kemudi pada kendaraan adalah untuk mengubah *heading angle* yang dihasilkan oleh kecepatan *yaw* (terkadang disebut dengan “*yaw rate*”). Kecepatan

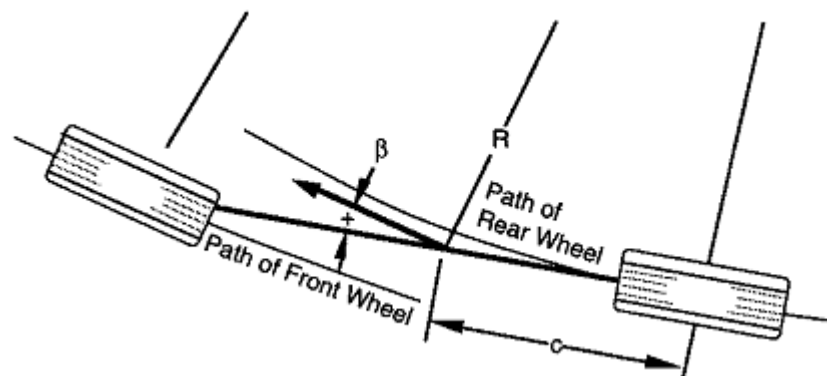
$\dot{\psi}$, r , adalah laju rotasi pada *heading angle*[3]. Untuk persamaan yang diberikan adalah :

$$r = 57.3 V/R \quad (\text{deg/sec}) \quad (2.4)$$

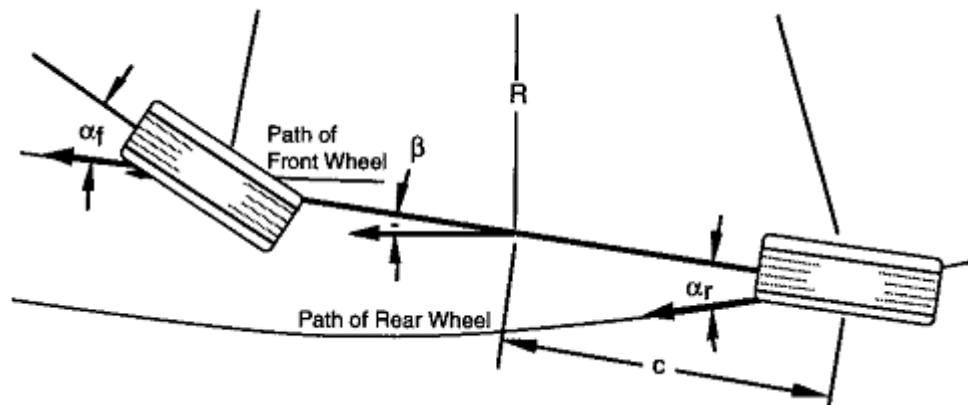
2.4.5 Slip Angle

Dari pembahasan perilaku kendaraan saat berbelok, hal ini jelas bahwa ketika percepatan lateral diabaikan, roda belakang berada di dalam lintasan roda depan. Tetapi ketika percepatan lateral meningkat, ban belakang kendaraan menyimpang keluar untuk menghasilkan *slip angle* pada ban belakang. Pada titik dari kendaraan, *sideslip angle* didefinisikan sebagai sudut antara sumbu longitudinal dan arah pergerakan kendaraan. Umumnya, *sideslip angle* berbeda pada setiap titik kendaraan selama pembelokan.

Dengan mengambil CG sebagai kasus, *sideslip angle* didefinisikan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8. Sideslip angle bernilai positif untuk kasus ini karena arah pergerakan (vektor kecepatan lokal) diorientasikan searah jarum jam dari sumbu longitudinal (searah jarum jam sudut dilihat dari atas bernilai positif pada aturan SAE). Pada kecepatan tinggi *slip angle* pada roda belakang menyebabkan *sideslip angle* pada CG yang menyebabkan *sideslip angle* bernilai negatif seperti yang ditunjukkan gambar 2.9 [3].



Gambar 2.8 *Sideslip Angle* pada belokan dengan kecepatan rendah [3].



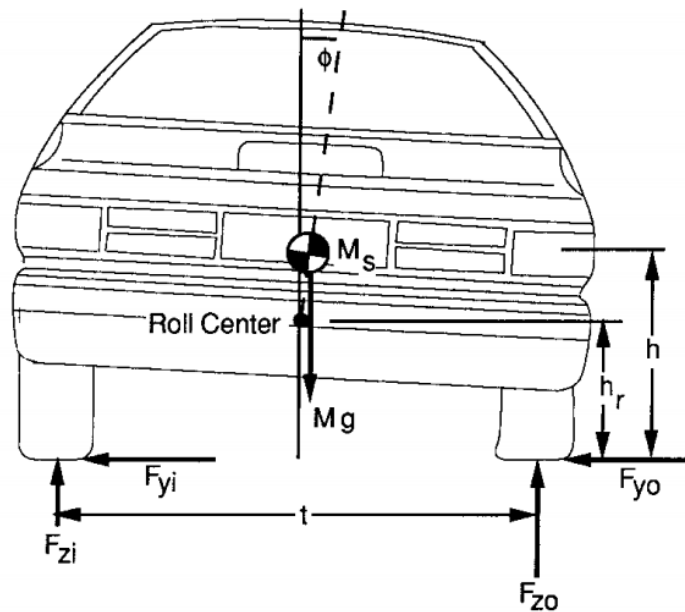
Gambar 2.9 *Sideslip Angle* pada belokan dengan kecepatan tinggi [3].

Untuk setiap kecepatan, nilai *sideslip angle*, β , pada CG menjadi :

$$\beta = 57.3 \, c/R - \alpha_r \quad (2.5)$$

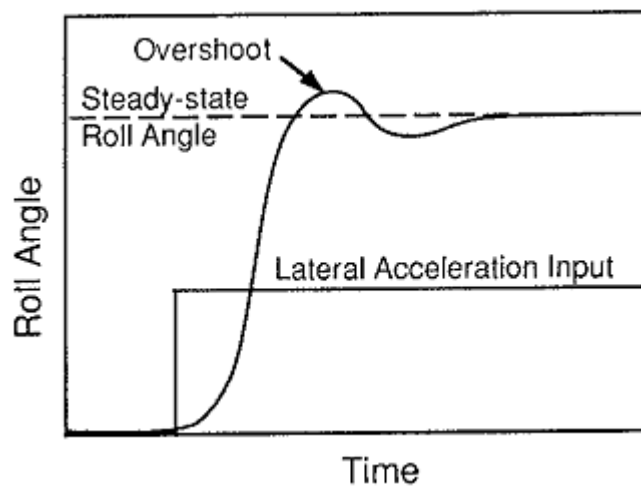
2.4.6 Roll

Untuk mengetahui respon kendaraan pada kondisi akselerasi *lateral* yang berubah dengan cepat, model transien diperlukan. Respon transien untuk memperlihatkan variasi *roll* seiring waktu. Pendekatan paling sederhana untuk mengetahui respon *roll* transien adalah dengan pemodelan yang hampir sama dengan kendaraan bersuspensi, dimana ditambahkan momen inersia *roll* untuk *sprung mass* sebagaimana pada gambar 2.10. Momen inersia *roll* I_{xxS} . Yang tidak ditunjukkan adalah kekakuan suspensi dan peredaman pada sisi kiri dan kanan kendaraan. Komponen dari ban dan suspensi bagian depan dan belakang digabungkan untuk mempermudah analisa [3].



Gambar 2.10 Pemodelan untuk perilaku *Roll* [3].

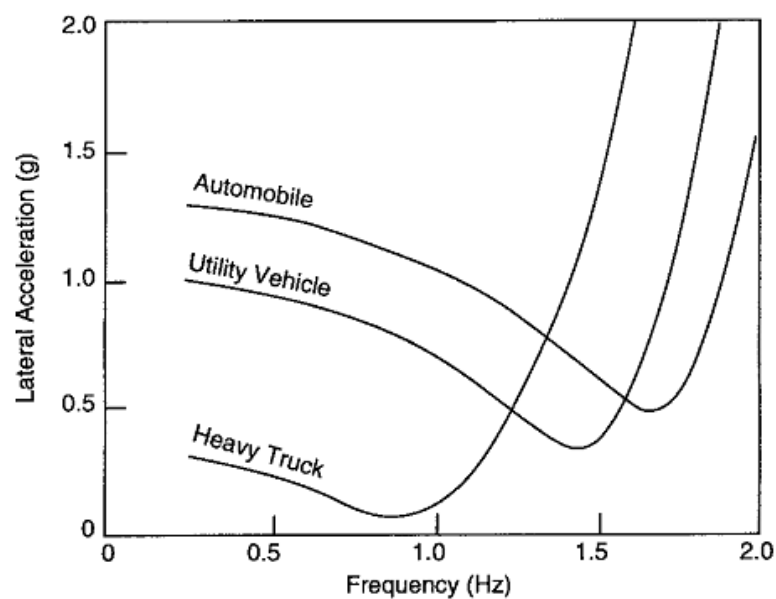
Pemodelan ini dapat berguna untuk meneliti respon kendaraan pada aplikasi akselerasi *lateral* pada saat melakukan *step input*. Hal ini juga mewakili transien yang muncul saat kendaraan meluncur dengan rem terkunci dan penggambaran pengembalian tiba-tiba dari gaya berbelok ketika rem dilepaskan. Atau mensimulasikan pengaruh pergeseran pada permukaan rendah dengan gaya gesek rendah menuju ke tingkat gaya gesek tinggi [3].



Gambar 2.11 Respon Roll pada *step input* [3].

Fakta bahwa sudut *roll* dapat dihentikan/*overshoot* berarti bahwa terangkatnya ban dapat terjadi pada tingkat yang rendah dari input akselerasi *lateral* dalam manuver transien daripada kasus *quasi-static*. Manuver *step steer* yang menghasilkan level akselerasi *lateral* dibawah *threshold quasi-static* dapat dihasilkan dalam *rollover* dalam kasus transien dikarenakan hentakan yang terjadi. Sehingga *threshold rollover* lebih rendah pada manuver transien.

Pada akselerasi *lateral* sinusoidal respon kendaraan akan tergantung pada frekuensi input. Gambar 2.12 menunjukkan ketergantungan frekuensi dari *threshold* akselerasi *lateral* dimana *rollover* (roda terangkat) muncul untuk *automobile*, *utility vehicle*, dan *heavy truck*. Pada frekuensi nol *threshold* mendekati nilai *steady-state* yang didapat dari model *quasi-static* dari kendaraan bersuspensi. Dengan meningkatnya frekuensi *threshold* menurun, melalui nilai minimum dimana menanggapi frekuensi *roll resonant* [3].



Gambar 2.12 *Threshold rollover* sebagai fungsi frekuensi pada *sinusoidal steer* [3].

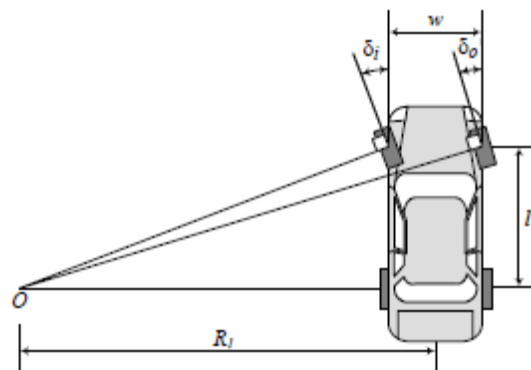
Utility vehicle dan *automobile* dimana dengan perbandingan memiliki rasio tinggi CG dengan lebar sumbu roda lebih rendah, memiliki frekuensi resonansi *roll* pada 1.5 Hz dan lebih besar. Untuk menuju resonansi *roll*, osilasi *steer* yang cepat dan beruntun diperlukan [3].

2.4.7 Kinematika Sistem Kemudi

Berdasarkan sistem kemudi roda depan pada kendaraan 4WS yang membelokkan roda ke arah kiri seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Ketika kendaraan bergerak secara perlahan, terdapat kondisi kinematika antara roda bagian dalam dan luar yang memberikan roda-roda tersebut untuk berbelok secara bebas atau tergelincir. Kondisi ini disebut dengan kondisi *Ackerman* dan dirumuskan dengan

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{w}{l} \quad (2.6)$$

Dimana δ_i adalah sudut kemudi dari roda bagian dalam, dan δ_o sudut kemudi dari roda bagian luar. Roda-roda bagian dalam dan luar didefinisikan berdasarkan pada titik pusat belokan O.



Gambar 2.13. Kendaraan dengan sistem kemudi roda depan dan kondisi Ackerman [4].

Jarak antara sumbu kemudi dari roda kemudi disebut dengan *track* dan dinotasikan dengan w . Jarak antara gandar depan dan gandar sebenarnya disebut dengan *wheelbase* dan dinotasikan dengan l *track* w dan *wheelbase* l dianggap sebagai lebar kinematis dan jarak dari kendaraan.

Titik pusat massa dari kendaraan akan berbelok pada lingkaran dengan radius R ,

$$R = \sqrt{a^2} + l^2 \cot 2\delta \quad (2.7)$$

Dimana δ adalah cot rata-rata dari sudut kemudi dalam dan luar

$$\text{Cot } \delta = \frac{\text{Cot } \delta_o + \text{Cot } \delta_i}{2} \quad (2.8)$$

Sudut δ adalah sudut kemudi ekuivalen dari kendaraan yang mempunyai *wheelbase* l dan radius putar R yang sama.

2.5. Unjuk Kerja Rem

2.5.1. Prinsip Dasar Pengereman

Pada setiap kendaraan bermotor, kemampuan sistem pengereman menjadi suatu hal yang sangat penting karena dapat mempengaruhi keselamatan kendaraan tersebut. Semakin tinggi kemampuan kendaraan tersebut untuk melaju maka semakin tinggi pula tuntutan kemampuan sistem rem yang lebih handal dan optimal untuk menghentikan atau memperlambat laju kendaraan tersebut. Untuk mencapainya, diperlukan perbaikan-perbaikan dalam sistem pengereman. Sistem rem yang baik adalah sistem rem yang jika dilakukan pengereman baik dalam kondisi apapun pengemudi tetap dapat mengendalikan arah dari laju kendaraannya. Pada umumnya sistem pengereman pada mobil baik dalam kondisi kering maupun basah tetap dapat bekerja dengan baik. Tetapi, jika kondisi itu berubah yaitu jika salah satu sisi roda menapak pada jalan yang basah sedangkan sisi yang lain menapak pada jalan yang kering maka sistem pengereman itu tidak mampu untuk membaca situasi tersebut sehingga akan terjadi kegagalan pengereman dengan menariknya kendaraan pada satu sisi akibat tidak proporsinya pengereman antara roda kanan dan roda kiri.

Kendaraan berinteraksi dengan jalan mengakibatkan gaya kontak yang dihasilkan oleh ban. Setiap gaya pengereman, kemudi atau percepatan disebabkan oleh tapak ban yang berkontak dengan permukaan jalan. Hanya gaya-gaya yang sama atau kurang dari gaya normal dan koefisien gesek antara ban dengan jalan yang dapat meneruskan profil ban dan roda. Ketika sistem pengereman ideal tidak dapat memberikan gaya tarik daripada ban dan jalan [5].

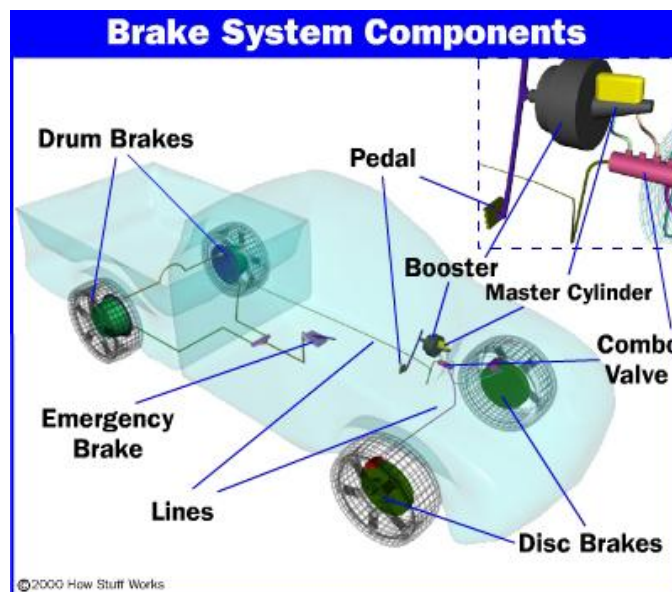
Penggunaan rem pada umumnya dapat diformulasikan dalam 3 fungsi dasar :

1. Perlambatan kendaraan termasuk pada saat berhenti.
2. Menjaga kecepatan kendaraan pada saat berkendara di jalan yang menurun.
3. Menjaga kendaraan agar tetap seimbang pada saat berkendara di tanjakan.

2.5.2. Cara kerja Rem

Perancangan dasar dari sistem pengereman telah digunakan pada aplikasi lainnya selama beberapa tahun. Rem dalam mobil menggunakan prinsip yang sederhana dari hidrolik. Prinsip ini mengurangi jumlah kerja yang dibutuhkan oleh pengguna.

Ketika mendorong pedal rem, tekanan hidrolik yang dihasilkan dalam silinder *master* yang diteruskan ke aktuator-silinder roda dan piston-caliper melalui jalur rem dan menghasilkan rem.



Gambar 2.14. Komponen Sistem Pengereman [10].

Masalah pada sistem pengereman konvensional adalah gaya yang diberikan oleh rem pada roda yang tidak dapat melebihi gaya gesekan antara roda dan jalan. Jika gaya pengereman melebihi gaya gesek jalan maka kendaraan akan mengalami selip. Hal ini akan membawa pada penemuan ABS (sistem pengereman yang mencegah ban

mengunci). ABS mengamati perubahan yang drastis dalam hal kecepatan roda. Ketika perlambatan diamati oleh ABS maka ABS akan mengurangi tekanan hidrolis yang dialirkan ke sistem pengereman hingga roda memulai untuk percepatan kembali. Ketika percepatan mendeteksi tekanan dan meningkat kembali sampai jumlah yang tidak biasanya dari perlambatan yang diamati.

Operasi dari sistem pengereman tergantung pada integritas sistem hidrolis, silinder *master* harus mampu menghasilkan beberapa ratus pound per inchi persegi dari tekanan dan seluruh sistem harus mempertahankan tekanan tanpa bocor.

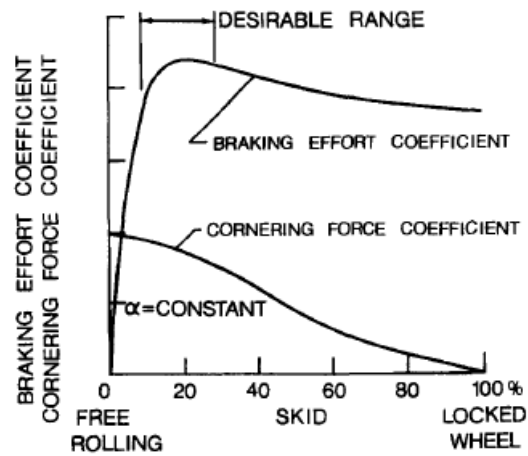
Kebanyakan sistem otomotif yang digunakan saat menggunakan rem *disk* depan dan belakang drum rem, tapi sistem roda 4 cakram juga cukup umum. Dengan rem cakram, rotor berputar dengan roda dan bantalan pindah dan menggesek rotor ketika diterapkan Rem cakram sebagian besar menggunakan *caliper* mengambang, *slide caliper* masuk dan keluar sebagai rem diterapkan dan dilepaskan piston bergerak keluar dalam dan mendorong *pad-pad* keluar ke rotor dengan menggeser *caliper* kembali ke rotor. Dengan perakitan rem drum, drum, berbentuk seperti piring *pie*, berputar dengan roda dan sepatu tetap pindah melibatkan drum ketika rem diterapkan.

Kebanyakan sistem menggunakan *booster* yang menggunakan mesin vakum untuk meningkatkan daya yang diterapkan untuk pedal rem. Rem *disk* memerlukan tekanan aplikasi yang lebih tinggi daripada drum karena mereka tidak dapat bergerak sendiri. Ketika drum rem menerapkan sepatu dalam membawa sepatu di belakang tabung.

2.5.3. Antilock Braking System (ABS)

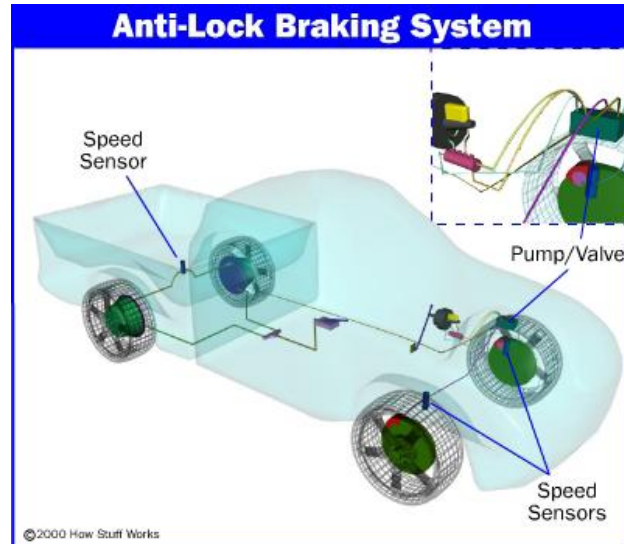
Ketika ban terkunci (100% slip), nilai koefisien adhesi jalan turun terhadap nilai gelincir dan kemampuan untuk mempertahankan gaya pada sisi yang dikurangi hampir tidak ada. Sebagai hasilnya, kendaraan akan kehilangan dalam mengontrol arah atau stabilitas dan jarak berhenti akan bertambah panjang dari nilai minimum yang didapatkan. Gambar 2.15 menunjukkan karakteristik pada umumnya dari koefisien gaya pengereman (rasio dari gaya pengereman terhadap beban normal dari ban) dan koefisien

dari gaya menyudut (rasio dari gaya menyudut terhadap beban normal ban) diberikan sudut gelincir sebagai fungsi dari slip untuk ban pneumatis.



Gambar 2.15. Efek dari slip pada koefisien gaya menyudut dari ban [12].

ABS terdiri dari sensor kecepatan, katup, pompa, dan *controller*. Letak dari perangkat-perangkat kendaraan tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.16



Gambar 2.16. Desain Sistem ABS [10].

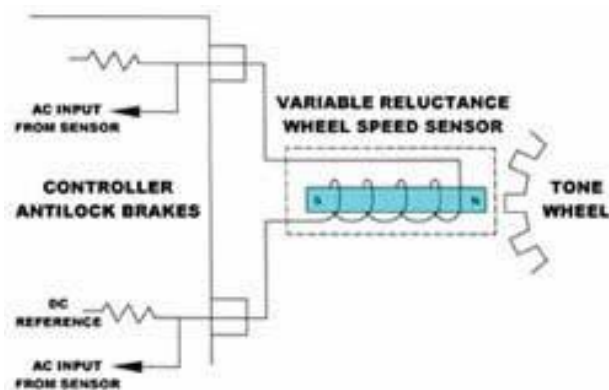
1. Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan digunakan untuk menentukan percepatan atau perlambatan roda. Gambar dari sensor tersebut ditunjukkan dalam gambar 2.17.



Gambar 2.17. Sensor kecepatan pada ABS [10].

Sensor tersebut menggunakan magnet dan kumparan dari kabel untuk menyederhanakan sinyal. Rotasi dari roda atau perbedaan induksi magnetik disekitar sensor. Fluktuasi dari magnetik ini menyamakan tegangan terhadap sensor. Skema dari sistem ini ditunjukkan pada gambar 2.18. Pengaturan ABS mengintepretasikan sinyal ini.



Gambar 2.18. Skema Sensor Kecepatan [10].

Ketika tegangan diinduksi sensor adalah hasil dari roda yang berputar, sensor ini dapat menjadi tidak akurat pada kecepatan rendah. Rotasi yang lebih lambat dari roda dapat menyebabkan tidak akuratnya fluktuasi dalam lingkup magnetik dan menyebabkan tidak akuratnya dalam pembacaan *controller*.

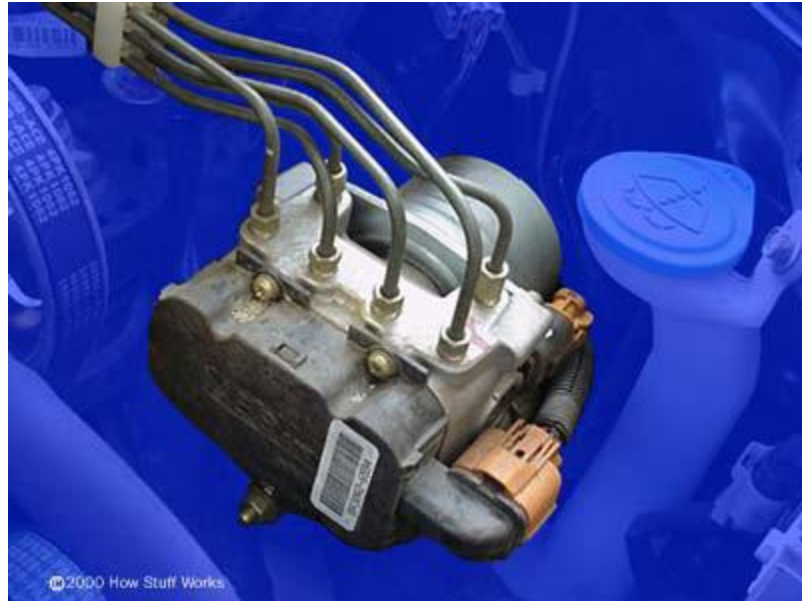
2. Katup

Katup dengan ABS menyediakan 3 fungsi yang tidak lazim. Fungsi pertama dari katup ialah membuka dan memberi jalan fluida hidrolis dari pedal rem atau pompa untuk mencapai sistem pengereman. Fungsi kedua dari katup untuk mengatur tekanan sebelumnya untuk diberikan ke sistem pengereman. Hal ini dapat dicapai dengan menutup katup untuk menahan tekanan lebih lanjut dari pedal rem. Fungsi ketiga dari katup tersebut ialah untuk mengurangi jumlah tekanan hidrolis pada sistem pengereman. Hal ini dapat dicapai dengan membuka katup untuk mengarahkan fluida hidrolis untuk dilepas dari sistem pengereman. Gambar dari katup ABS standar sistem pompa ditunjukkan pada gambar 2.19.

Masalah terbesar pada sistem katup terjadi ketika katup tertutup. Ketika katup tidak bisa terbuka, menutup atau merubah posisi. Katup yang tidak beroperasi akan mencegah sistem modulasi katup dan mengatur tekanan yang dialirkan ke rem.

3. Pompa

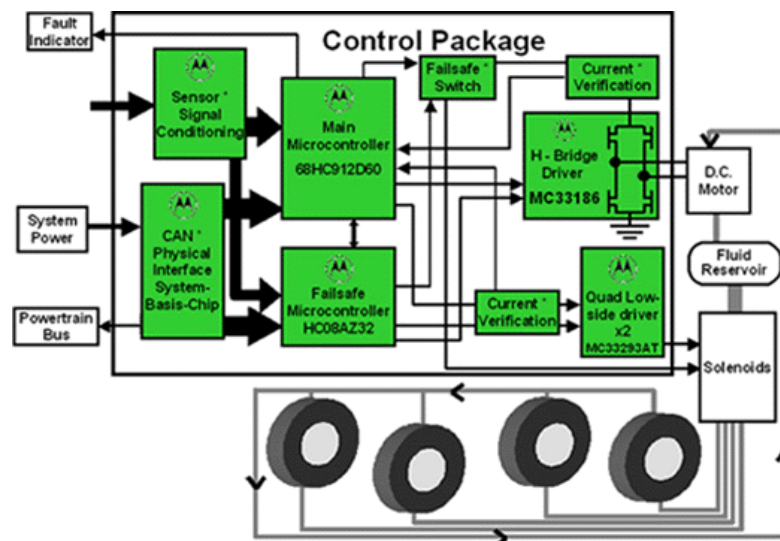
Pompa dalam ABS digunakan untuk menyimpan kembali tekanan rem hidrolis setelah katup dilepas. Sinyal dari *controller* akan melepas katup ketika mendeteksi slip pada roda. Setelah katup melepas tekanan dari pengguna, pompa digunakan untuk menyimpan kembali jumlah tekanan yang diinginkan terhadap sistem pengereman. *Controller* akan memodulasi keadaan pompa yang diperintah untuk memberikan jumlah tekanan yang diinginkan dan mengurangi slip. Gambar dari sistem pompa dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19. Katup-katup pada ABS dan Sistem Pompa [10]

4. Controller

Sistem seluruhnya diamati dan dimanipulasi oleh *controller* ABS. Sistem kontrol yang rinci digunakan dalam ABS dan ditunjukkan pada gambar 2.20.

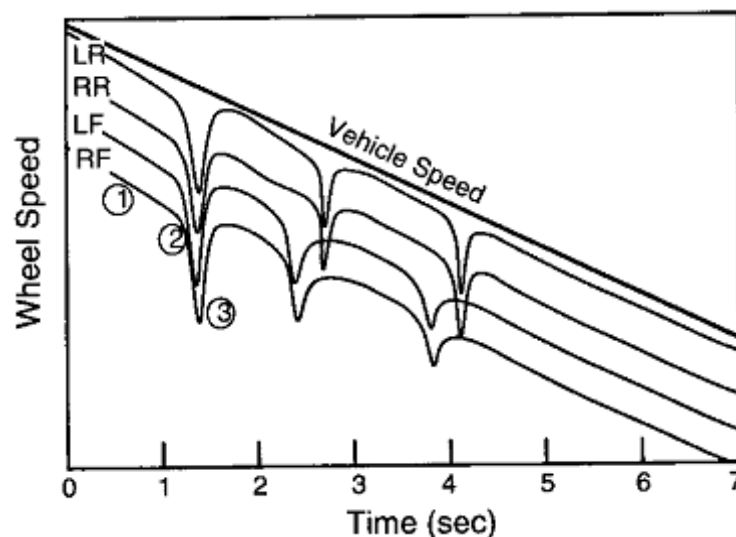


Gambar 2.20. Sistem Kontrol ABS [10].

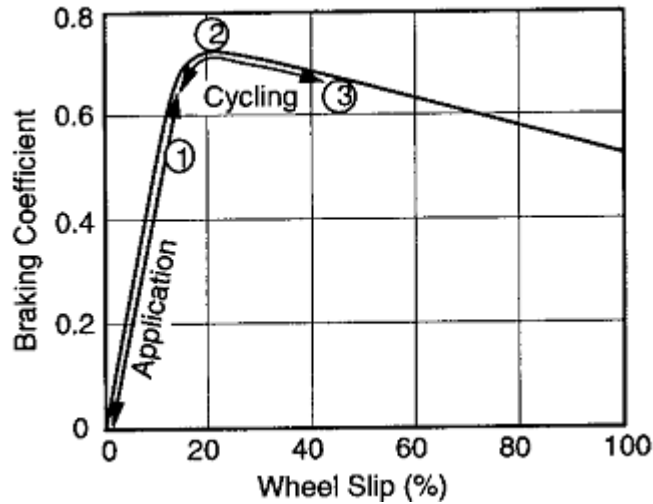
Fungsi utama dari *Antilock Brake System* (ABS) adalah untuk mencegah ban pada kondisi terkunci, dan idealnya untuk menjaga slip dari ban dalam jarak yang

diinginkan. Hal ini akan memastikan bahwa ban akan menghasilkan gaya pengereman tinggi yang secukupnya agar kendaraan berhenti, dan pada waktu yang sama mampu menahan gaya menyudut untuk mengatur arah dan stabilitas.

Kecepatan roda aktual dapat dibandingkan dengan *computed speed* untuk menentukan dimana roda mengalami slip secara berlebihan, atau laju perlambatan dari roda dapat dilihat untuk menentukan ketika roda mengunci. Gambar 2.21 menunjukkan plot *typical* dari siklus kecepatan roda selama berhenti pada kendaraan yang menggunakan ABS. Ketika rem hal pertama yang diaplikasikan, kecepatan roda mengurangi lebih atau sedikit sesuai dengan kecepatan roda pada daerah 1 dalam grafik. Jika rem diaplikasikan ke tingkatan tertinggi, atau jalan yang licin, kecepatan salah satu roda atau banyak roda menurun secara cepat (titik 2), mengindikasikan ban telah melewati puncak dari kurva μ -slip dan terkunci. Pada titik ini ABS menghalangi dan melepas rem pada roda sebelum penguncian terjadi (titik 3). Ketika kecepatan roda mengakselerasi kembali rem merupakan sistem yang diaplikasikan kembali. Tujuan dari ABS adalah untuk menjaga setiap roda pada kendaraan yang beroperasi mendekati puncak kurva μ -slip untuk ban tersebut. Hal ini diilustrasikan pada gambar



Gambar 2.21 Siklus *wheel speed* selama sistem ABS beroperasi [3].



Gambar 2.22 Pengoperasian ABS untuk menjaga puncak koefisien pengereman [3].

Untuk menilai keefektifan pengoperasian dari *ABS*, hal ini akan berguna jika ada peninjauan secara singkat dari dinamika ban selama pengereman. Ketika torsi rem T_b diaplikasikan pada ban, gaya pengereman yang sesuai F_b dikembangkan pada kontak antara ban dan jalan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.22. Gaya pengereman F_b mempunyai momen T_t pada titik pusat ban, dimana ban bergerak pada arah sebaliknya yang diaplikasikan sebagai torsi rem T_b . Perbedaan antara T_b dan T_t menyebabkan percepatan angular

$$\dot{\omega} = (T_t - T_b) / I_w = (F_b r - T_b) / I_w \quad (2.9)$$

Dimana I_w adalah momen inersia massa dari ban pada titik pusat dan r adalah radius dari ban. Ketika perbedaan antara F_b dan T_b bernilai positif, ban akan mengalami percepatan dan ketika bernilai negatif maka ban akan mengalami perlambatan.

Gaya pengereman F_b juga menyebabkan percepatan linier a_c pada titik pusat ban.

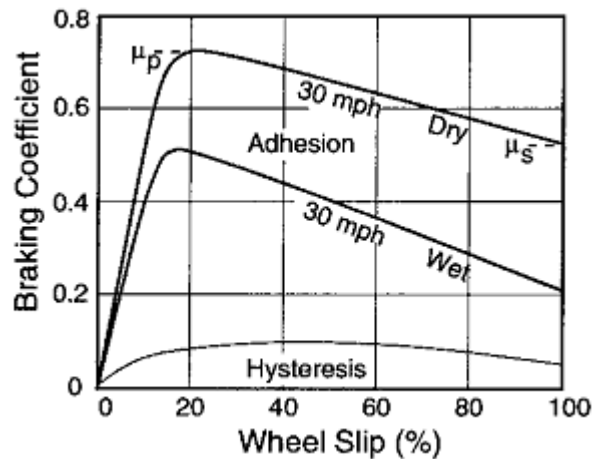
$$a_c = F_b / (W/g) \quad (2.10)$$

Dimana W adalah beban yang dibawa oleh ban dan g adalah percepatan gravitasi. Hal ini harus dicatat bahwa dapat menyebabkan slip pada ban selama pengereman, percepatan linear pada titik pusat ban a_c tidak sama dengan $r \dot{\omega}$. Slip dari ban i_s didefinisikan pada persamaan berikut :

$$i_s = \left(1 - \frac{r\omega}{V} \right) \times 100 \% \quad (2.11)$$

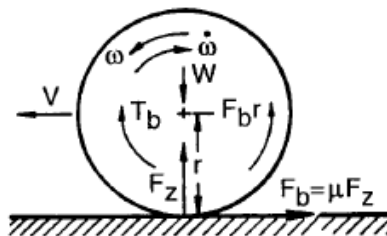
Dimana ω dan V adalah kecepatan angular dan kecepatan linear dari pusat ban.

Gambar 2.23 adalah grafik antara koefisien pengereman dan *wheel slip*



Gambar 2.23 Koefisien pengereman dengan *wheel slip* [3].

Jika diaplikasi pada torsi rem T_b bernilai besar dan percepatan angular $\dot{\omega}$ bernilai besar, maka ban akan terkunci (i.e., jika kecepatan angular ω bernilai nol sedangkan kecepatan linier dari pusat ban V tidak bernilai nol) pada periode waktu yang singkat. Fungsi dasar dari peralatan ABS adalah untuk memantau kondisi pengoperasian pada ban dan mengatur torsi rem yang diaplikasikan dengan memodulasi tekanan rem sebagai pencegahan ban agar tidak terkunci dan idealnya untuk menjaga hal tersebut beroperasi dalam jarak slip yang diinginkan.



Gambar 2.24. Gaya dan momen yang beraksi pada ban selama pengereman [12].

2.5.4. Penyebab Kegagalan Pengereman

Banyaknya kendaraan yang mengalami kecelakaan saat ini adalah kendaraan besar, sistem pengereman mereka sangat berbeda dengan mobil kecil. Mereka memiliki tangki udara untuk sistem pengereman. Kendaraan kecil terlalu sulit untuk mengerem kecuali pada saat mesin sedang berjalan. Tapi, mereka tidak membutuhkan banyak udara. Jadi pada saat mesin dinyalakan, udara yang cukup tersedia untuk sistem rem.

Rem parkir (atau rem darurat sistem kontrol rem belakang) melalui serangkaian kabel baja yang berhubungan dengan tuas tangan atau kaki pedal. Ide tersebut bahwa sistem mekanis sepenuhnya dan benar-benar melalui sistem hidrolik sehingga kendaraan dapat dihentikan bahkan jika ada kegagalan total pengereman.

Pada drum rem, kabel menarik tuas yang dipasang di rem belakang dan langsung dihubungkan ke sepatu rem. Hal ini memiliki efek untuk melewati silinder roda dan mengendalikan rem secara langsung.

Untuk kendaraan besar seperti truk, bus dan trailer, jumlah udara yang dibutuhkan sangat besar. Itulah sebabnya setelah menghidupkan mesin sebuah kendaraan besar, mesin dibiarkan untuk menjalankan atau menghangatkan rangka agar cukup dalam memompa udara ke dalam tangki. Sistem ini disebut sistem rem udara dengan menggunakan udara sebagai distribusi tekanan dari kontrol pengemudi ke rem.

Kecelakaan truk sering disebabkan oleh kegagalan mekanis. Dua penyebab terbesar adalah kegagalan rem dan ban rusak. Bahkan, sebuah studi baru-baru ini disponsori oleh Departemen Perhubungan (DOT) menemukan bahwa 29,4 % dari seluruh truk besar mengalami kecelakaan akibat kegagalan rem, rem keluar penyesuaian, atau masalah rem terkait lainnya.

Ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan kegagalan pengereman :

1. Sopir.
2. Perusahaan Truk.
3. Produsen rem.
4. Lamanya pemakaian rem.

2.5.5. Karakteristik pengereman pada kendaraan dengan dua gandar

Unjuk kerja pengereman dari kendaraan jalan raya tidak diragukan lagi merupakan salah satu hal penting yang dapat mempengaruhi keselamatan dalam berkendara. Dengan meningkatnya perhatian lebih tentang keselamatan berkendara pada tahun-tahun belakangan ini, upaya yang intensif telah diarahkan terhadap unjuk kerja pengereman yang telah disempurnakan. Standar keselamatan membutuhkan beberapa tipe spesifik dari sistem pengereman yang telah diperkenalkan di banyak negara.

Dalam bagian ini, metode pendekatan untuk menganalisa unjuk kerja dari pengereman telah ditunjukkan. Kriteria untuk mengevaluasi kemampuan pengereman dan pendekatan dalam menyempurnakan unjuk kerja pengereman akan dibahas disini

Persamaan umum untuk unjuk kerja pengereman dapat dihasilkan dari hukum Newton kedua untuk arah x.

$$M \cdot a_x = -\frac{W}{g} D_x = -F_{xf} - F_{xr} - D_A - W \sin \theta \quad (2.12)$$

Dimana :

W = Berat kendaraan

g = Percepatan Gravitasi

$D_x = -a_x$ = Perlambatan linear

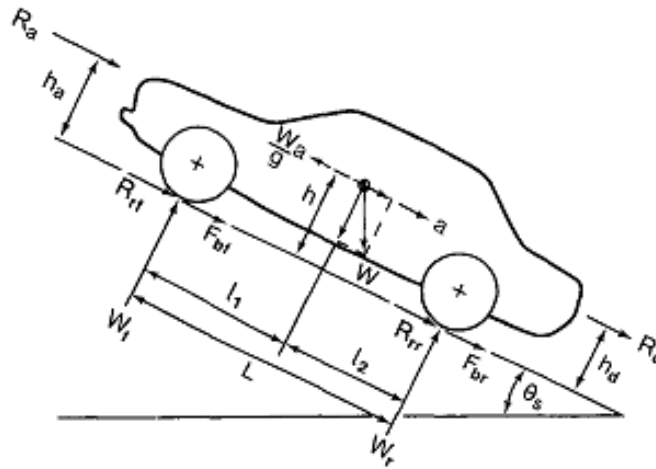
F_{xf} = Gaya pengereman pada poros depan

F_{xr} = Gaya pengereman pada poros belakang

D_A = Hambatan aerodinamika

θ = nilai pada saat jalan menanjak

Gaya eksternal utama yang bekerja pada perlambatan kendaraan dua gandar ditunjukkan dalam Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Gaya-gaya yang beraksi pada kendaraan dua gandar selama pengereman [12].

Gaya pengereman F_b mula-mula dari sistem rem kemudian dikembangkan pada kontak antara ban dan jalan merupakan gaya perlambatan yang utama. Ketika gaya pengereman dibawah dari batas nilai melekatnya jalan dengan ban, rumus F_b yang diberikan ialah :

$$F_b = \frac{T_b - \sum I \alpha_{an}}{r} \quad (2.13)$$

Dimana T_b diaplikasikan sebagai torsi rem, I adalah inersia berputar yang dihubungkan dengan roda yang mengakibatkan perlambatan, α_{an} adalah perlambatan angular yang sesuai, dan r adalah radius putar dari ban. Dalam penambahannya terhadap gaya pengereman, hambatan gelinding, hambatan aerodinamika, hambatan transmisi, dan hambatan pada tanjakan (ketika berkendara pada kemiringan) juga mempengaruhi pergerakan kendaraan selama pengereman.

Jadi, resultan gaya perlambatan F_{res} dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_{res} = F_b + f_r W \cos \theta_s + R_a \pm W \sin \theta_s + R_t \quad (2.14)$$

Dimana f_r adalah koefisien hambatan gelinding, W adalah berat kendaraan, θ_s sudut dari kemiringan horizontal, R_a hambatan aerodinamika, dan R_t adalah hambatan

transmisi. Ketika kendaraan bergerak pada jalan yang menanjak, tanda positif untuk $W \sin \theta_s$ seharusnya digunakan. Sedangkan pada jalan yang menurun, tanda negatif sebaiknya digunakan. Normalnya, besarnya nilai hambatan transmisi biasanya kecil dan dapat diabaikan dalam perhitungan unjuk kerja pengereman.

Selama pengereman, terdapat perpindahan beban dari gandar belakang ke gandar depan. Dengan menganggap kesetimbangan pada momen di bagian depan dan belakang antara kontak jalan dan ban, beban normal pada gandar depan dan belakang, W_f dan W_r dapat ditunjukkan dengan rumus

$$W_f = \frac{1}{L} [W_{L2} + h (\frac{W}{G} a - R_a \pm W \sin \theta_s)] \quad (2.15)$$

Dan

$$W_r = \frac{1}{L} [W_{L1} - h (\frac{W}{G} a - R_a \pm W \sin \theta_s)] \quad (2.16)$$

Dimana a adalah perlambatan. Ketika kendaraan bergerak pada jalan yang menanjak, tanda negatif untuk $W \sin \theta_s$ seharusnya digunakan. Dalam persamaan diatas, dapat diasumsikan bahwa hambatan aerodinamika diaplikasikan pada titik pusat kendaraan, dan juga disana tidak terdapat beban.

Dengan menganggap gaya kesetimbangan pada arah horizontal, hubungan yang berkaitan dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$F_b + f_r W = F_{bf} + F_{br} + f_r W = \frac{W}{g} a - R_a \pm W \sin \theta_s + R_s \quad (2.17)$$

Dimana F_{bf} dan F_{br} adalah gaya pengereman dari gandar depan dan belakang.

2.5.6. Efisiensi pengereman dan jarak berhenti

Untuk mengkarakterisasikan unjuk kerja pengereman dari kendaraan jalan raya, maka rumus efisiensi pengereman dapat digunakan. Efisiensi pengereman yang dinotasikan dengan η_b didefinisikan sebagai rasio dari laju perlambatan maksimum dalam unit g (a/g) yang didapatkan sebelum ban terkunci terhadap koefisien adhesi dari jalan μ , oleh karena itu diberikan persamaan :

$$\eta_b = \frac{a/g}{\mu} \quad (2.18)$$

2.5.7 Faktor Pengereman

Faktor rem adalah keuntungan mekanik yang dapat dimanfaatkan dalam drum rem untuk meminimalkan upaya yang diperlukan aktuasi. Mekanisme rem drum yang umum dalam bentuk yang disederhanakan pada Gambar 2.26. Rem terdiri dari dua sepatu berputar di bagian bawah. Penerapan gaya aktuasi, P_a , mendorong lapisan terhadap drum yang menyebabkan gaya gesek dimana *magnitude* adalah beban normal dikali koefisien gesekan dari bahan lapisan terhadap drum. Dengan mengambil momen terhadap titik pivot untuk sepatu A :

$$\Sigma M_p = e P_a + n \mu N_A - m N_A = 0 \quad (2.19)$$

Dimana :

e = Jarak tegak lurus dari gaya aktuasi terhadap pivot (mm)

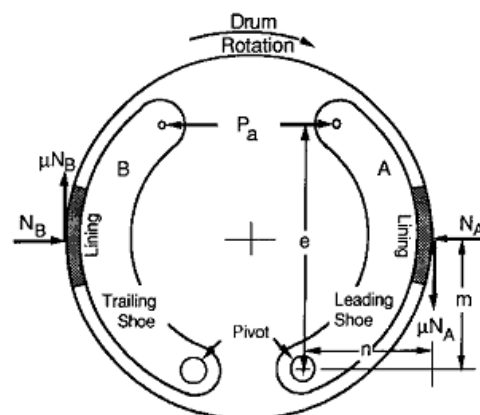
N_A = Gaya normal antara lapisan A dan drum (N-m)

n = Jarak Tegak lurus dari gaya gesek lapisan terhadap pivot (mm)

m = Jarak Tegak lurus dari gaya normal terhadap pivot (mm)

Gaya gesekan yang dihasilkan oleh setiap rem sepatu adalah :

$$F_A = \mu N_A \text{ dan } F_B = \mu N_B \quad (2.20)$$



Gambar 2.26 Gaya-gaya yang bekerja pada sepatu dari rem drum sederhana [3].