

Variabel – variabel dan efeknya dalam kalkulasi tingkat keausan ban yang didasarkan atas model matematis

Eduardo Wangsa Saputra¹, Henky Suskito Nugroho¹

¹ Fakultas Teknik Mesin, Universitas Indonesia
Pondok Cina, Beji, Depok, Jawa Barat 16424
Email korespondensi: eduardowangsa10@gmail.com

Abstrak

Ban merupakan satu-satunya bagian dari sebuah kendaraan yang melakukan kontak langsung dengan jalanan yang ada di bawahnya, namun kurang mendapatkan perhatian dalam kemajuan teknologi monitoring kendaraan yang ada. Meskipun menentukan tingkat tekanan angin dalam ban penting, 67% pengemudi tidak mengetahui kondisi dari kembang ban dan kapan harus menggantinya. Kendaraan dengan ban yang sudah aus menjadi berbahaya karena probabilitas hydroplaning menjadi lebih tinggi. Studi ini bertujuan untuk memberikan pandangan baru terhadap efek dari perilaku berkendara yang dapat menyebabkan keausan ban. Untuk menemukan variabel apa yang memberikan efek tertinggi dalam tingkat keausan ban, maka perlu dilakukan simulasi untuk merepresentasikan perbedaan dalam mengemudi. Simulasi dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang didasarkan pada Brush Model dan Savkoor Model. Persamaan perpindahan beban juga diimplementasikan untuk mendapatkan hasil yang lebih realistis. Tiap-tiap kondisi kendaraan diisolasi untuk mendapatkan perbandingan yang lebih terlihat. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, ditemukan bahwa semakin besar sudut belok dari kendaraan maka semakin besar tingkat keausan yang terjadi pada kendaraan. Percepatan juga mengakibatkan perubahan tingkat keausan karena memberikan ban pada posisi tertentu beban yang lebih dan pada posisi lainnya beban yang lebih sedikit. Ban yang mendapatkan beban lebih banyak mendapatkan tingkat keausan yang lebih tinggi. Sementara itu, tekanan angin tidak memberikan banyak perubahan dibandingkan dengan dua variabel lainnya.

Kata kunci: Ban mobil, Model matematis, Simulasi, Variabel ban, Tingkat keausan ban.

Abstract

Even though tires are the only contact points of a vehicle with the road below, the tires received less attention in the development of vehicle monitoring technology. Determining the pressure of the tires is important, but about 67% of drivers cannot determine their tires conditions and do not know when to replace their worn-out tires. The tire wear is important as it increases the probability of hydroplaning. This study is created in order to provide a new insight of the effect of different driving behaviours to the wear of the tire. In order to know what variables causes greater wear to a tire, a simulation that represents the real-life conditions are required. The simulations will be made by using formulas based on Brush model and Savkoor model. Weight shift model is also implemented in order to obtain a more realistic number. Each condition is isolated with others to gain a clearer difference between conditions. From the simulations one, it is found that the greater the driving angle, the greater the tire wear. The greater the acceleration also provide a difference in the tire wear due to the weight of one side of a vehicle is heavier while the other is lighter. The greater the load or weight the tire sustain, the greater that tire's wear. On the other hand, tire pressure pose little difference compared to the other variables.

Keywords: Car tire; Mathematical modelling; Simulation; Tire parameters; Tire wear rate.

1. Pendahuluan

Meskipun kendaraan berkembang setiap berjalannya tahun, ada satu hal yang tidak pernah berubah. Ban tetap menjadi satu-satunya titik yang bersentuhan langsung dengan permukaan tanah. Hal tersebut membuktikan bahwa ban adalah bagian yang paling krusial dalam kendaraan ditambah oleh peran-peran ban seperti: mengirim tenaga dari mesin ke permukaan jalan, menjaga traksi agar kendaraan bisa bergerak, hingga menahan dan meredam beban dari kendaraan itu sendiri [1,2].

Dikarenakan oleh kepentingan dari peran sebuah ban, sangatlah penting untuk mengetahui kapan ban harus diganti untuk mencegah terjadi kecelakaan, dimana salah satu yang paling umum adalah *hydroplaning*, kondisi dimana sebuah ban tidak bisa menjaga traksi terhadap permukaan jalan yang disebabkan adanya interupsi dari permukaan air yang terlalu tinggi.

Banyak dari perkembangan yang dilakukan oleh pabrikan kendaraan merupakan perkembangan dalam sistem keamanan pencegahan [3] hingga sistem pemantauan yang lain seperti sistem pemantauan tekanan angin ban [4] dan sistem pemantauan oli [5,

6]. Meski demikian, tidak banyak yang memantau kondisi ban, khususnya kedalaman kembang ban.

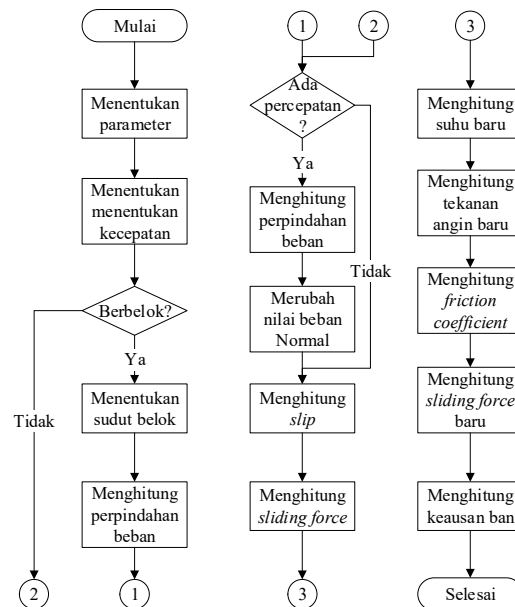
Tiap kembang ban memiliki sebuah *bridge* yang lebih tinggi dibandingkan dasar dari kembang ban. Bridge tersebut merupakan indikator yang menandakan bahwa tinggi itu merupakan batas maksimal sebuah ban boleh digunakan [1]. Permasalahan utama mengenai sisa umur ban adalah 1 dari 3 orang tidak tahu mengenai tingkat kedalaman minimal dari kembang ban menurut dari survey yang dilakukan di Jerman [1].

Kurangnya pengetahuan mengenai variabel apa yang menyebabkan keausan menjadi lebih cepat merupakan salah satu faktor sistem monitor keausan ban belum ditemukan. Parameter dan variabel yang dimaksud mencakup kondisi lingkungan, sifat ban, dan juga sifat dari pengendara itu sendiri. Parameter dan variabel akan digunakan untuk mengkalkulasi hasil perhitungan yang akurat sesuai dengan keadaan dunia nyata. Perbedaan dari tiap-tiap variabel yang dibandingkan dengan perhitungan tanpa perubahan nilai variabel akan digunakan untuk menentukan tingkat kepentingan variabel dalam perhitungan sisa umur ban.

Tujuan utama dari studi adalah untuk menemukan tingkat kepentingan variabel dalam tingkat keausan ban.

2. Metode

Untuk menemukan variable apa yang memberikan efek terbesar dalam keausan ban, maka perlu dilakukan sebuah simulasi. Simulasi tersebut merepresentasikan kondisi-kondisi terisolasi untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas. Kondisi terisolasi tersebut memiliki perbedaan di kecepatan, percepatan, arah laju kendaraan, dan juga tekanan angin ban itu sendiri. Pada Gambar 1, dapat dilihat tahapan dalam menentukan persamaan yang akan digunakan untuk mendapatkan hasil akhir.



Gambar 1. Tahapan penghitungan sisa umur ban.

Gambar 1 juga menjelaskan mengenai apa yang perlu didapatkan terlebih dahulu untuk menyelesaikan keseluruhan simulasi. Yang pertama adalah menentukan parameter. Parameter yang dimaksud merupakan data-data dari kendaraan yang meliputi dimensi, berat, dan juga ukuran dari ban itu sendiri, dapat dilihat di Tabel 1, dimana kendaraan yang dijadikan referensi adalah Toyota Fortuner TRD tahun 2012.

Tabel 1. Spesifikasi Kendaraan.

Symbol	Keterangan	Nilai
l	Panjang (mm)	4.705
w	Lebar (mm)	1.840
h	Tinggi (mm)	1.850
b	Wheelbase (mm)	2.750
m	Massa (kg)	1.885
	Ukuran Ban	265/65 R17
S_{rubber}	Specific Heat of Rubber (J/kgK)	2.005
m_{rubber}	Massa Ban (kg)	10

Setelah itu, tahap berikutnya adalah untuk menentukan derajat arah belok dari kendaraan bila memang melakukan perubahan arah laju. Dalam melakukan perubahan laju, perlu ada penyesuaian persamaan karena bila kendaraan berbelok, ada gaya baru yang diimplementasikan, dimana akan berbeda dibandingkan dengan bila kendaraan melaju lurus.

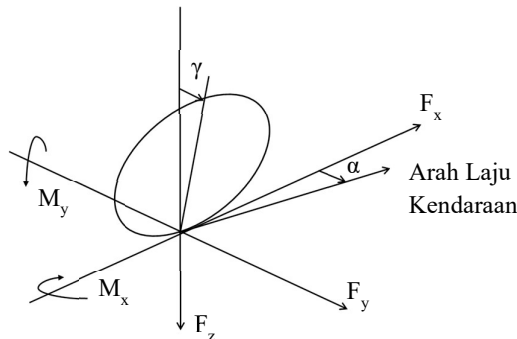
Setelah menentukan sudut belok, hal berikutnya adalah menentukan apakah kendaraan mengalami percepatan. Percepatan yang dimaksud dapat berupa longitudinal dan juga lateral, lateral bila kendaraan berbelok. Percepatan tersebut akan dikonversi

menjadi perpindahan beban dan dapat digunakan untuk merubah nilai beban normal yang tiap ban alami. Perpindahan beban, sesuai namanya, memindahkan beban yang tadinya dibagi seimbang ke 4 ban menjadi tidak seimbang dan ada ban yang menerima beban lebih banyak sedangkan ban lain mendapatkan beban lebih sedikit.

Setelah mendapatkan data-data tersebut, hal selanjutnya adalah untuk menghitung slip dan menghitung sliding force. Satu persamaan lain yang merupakan variabel adalah tekanan angin ban. Tekanan angin ban dapat dihitung dengan menggunakan temperatur. Pada umumnya, nilai dari tekanan merupakan nilai konstanta yang merupakan nilai asumsi, namun untuk menentukan tingkat kepentingan dari variabel ini, maka perlu dilakukan kalkulasi. Perhitungan berikutnya adalah menghitung friction coefficient, sliding force yang baru, dan baru dapat menghitung tingkat keausan dari ban. Untuk dapat menyelesaikan keseluruhan perhitungan, maka perlu mempelajari keseluruhan konsep dibaliknya.

Sebuah ban terdiri dari bead di bagian paling dalam, dilapisi oleh *bead chafers*. Di atasnya dilapisi lagi dengan *steel belts* dan *cap plies*, baru dilapisi dengan karet nya itu sendiri. Karet nya sendiri terbuat dari beberapa komponen: kembang ban atau *tread*, *jointless cap plies*, *steel-cord belt*, *textile cord ply*, *inner liner*, dinding ban, *bead reinforcement*, *bead apex*, dan *bead core* [1].

Ban memiliki 3 jenis gaya yang berlaku kepada ban; gaya longitudinal (F_x), gaya lateral (F_y), dan gaya normal (F_z), dinamakan berdasarkan Sistem Koordinat SAE [7]. Fungsi utama dari gaya longitudinal dan lateral adalah untuk memberikan arah laju pada kendaraan sementara fungsi dari gaya normal adalah untuk mengatur momentum overturning (M_x) dan menahan momentum guling (M_y). Orientasi dari tiap-tiap gaya bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem Koordinat SAE

Gaya longitudinal terbentuk dari gaya gesek antara karet (ban) dengan jalanan saat ban diberikan tenaga diberikan kepada ban dan gaya lateral terbentuk disaat ban melakukan perubahan arah dari lurus menjadi berbelok. Terlepas dari peran ban yang bertanggung

jawab untuk memberikan traksi ke jalanan, ban bisa mengalami yang dinamakan slip, keadaan dimana ban berputar lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan kendaraan. Pada Persamaan (1) terdapat persamaan untuk menghitung longitudinal slip (σ_x) dimana perhitungan menggunakan kecepatan longitudinal (v_x) dan kecepatan keliling ban (v_c). Pada Persamaan (2) ditampilkan persamaan dalam perhitungan lateral slip (σ_y) menggunakan kecepatan lateral (v_y) dan kecepatan keliling ban.

$$\sigma_x = \frac{v_x - v_c}{v_c} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{v_y}{v_c} \quad (2)$$

Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa keausan ban merupakan salah satu cara untuk menentukan kondisi dari sebuah ban, dimana ban yang sudah aus menunjukkan permukaan yang lebih halus dengan kembang ban yang sudah lebih rendah dibandingkan ban yang masih bagus. Ada faktor internal dan eksternal yang dapat menyebabkan ban menjadi aus. Faktor internal meliputi tekanan angin dalam ban, material dari ban, hingga suhu dan faktor eksternal meliputi kondisi dan spesifikasi kendaraan serta kondisi lingkungan dan pengemudi [8].

Secara umum, ada 3 jenis keausan ban: *adhesive*, terjadi karena kontak antara ban dan jalanan dalam suhu yang tinggi dan menyebabkan residu dari ban menempel ke jalanan [9], *abrasive*, keausan terjadi karena perbedaan kekerasan dari kedua material [10], dan *fatigue*, keseluruhan ban mengalami efek dari keausan tersebut, bukan hanya pada permukaan ban.

Model keausan yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan (3), dimana W merepresentasikan Work atau usaha, K merupakan konstanta dari Archard, dan H merupakan kekerasan dari ban. Persamaan (4) menampilkan bentuk kompleks dari Persamaan (3) yang hanya memberikan persamaan yang sederhana. Model Brush digunakan untuk merepresentasikan model ban dan Savkoor digunakan untuk merepresentasikan model gesekan karena dianggap paling flexibel dan mudah dimengerti [11].

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (3)$$

$$Q_l = \frac{2Ka\sigma_x v_x}{\omega H} \int_0^{l_f} (F_{sx} + F_{sy}) dl \quad (4)$$

Dalam Persamaan (4), ada beberapa variable yang didapatkan dari persamaan-persamaan lainnya. Dapat dilihat pada Persamaan (5-8). Persamaan (5) dan Persamaan (6) menampilkan persamaan untuk gaya sliding longitudinal (F_{sx}) dan gaya lateral (F_{sy}) secara berurutan. Gaya sliding longitudinal dan lateral dapat didapatkan dengan menggunakan gaya gesek normal (F_{sz}) dari Persamaan (7), normalized slip (ψ) dari Persamaan (8), dan koefisien gesek sliding (μ_k) dari Persamaan (9). Beban normal pada Persamaan (7) direpresentasikan sebagai F_z .

$$F_{sx} = -\cos(\beta) \mu_k F_{sz} \quad (5)$$

$$F_{sy} = -\sin(\beta) \mu_k F_{sz} \quad (6)$$

$$F_{sz} = F_z \psi^2 (3 - 2\psi) \quad (7)$$

$$\psi(\sigma_x, \sigma_y) \triangleq \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad (8)$$

$$\mu_k' = \left(\frac{P'}{P_0}\right)^{-k} \cdot \frac{\mu_0}{1 + a_{\mu} |v|} \quad (9)$$

Perhitungan penting lainnya dalam kalkulasi keausan ban adalah sudut setir, terutama untuk ban depan. Sudut setir tersebut dilambangkan dengan alpha (α) sesuai dengan Gambar 2. Sudut setir dapat memberikan efek keausan yang berbeda karena perbedaan dalam kecepatan sudut (β), digunakan dalam Persamaan (5) dan (6). Persamaan (10) menunjukkan kecepatan sudut.

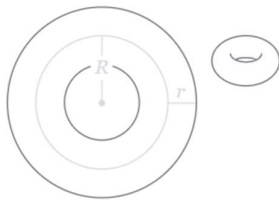
$$\beta = \arctan\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \quad (10)$$

Sebagaimana digunakan dalam Persamaan (9), tekanan angin dilambangkan sebagai P'. Tetapi, untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, maka perlu mendapatkan nilai realistis untuk tekanan angin maksimum dibandingkan menggunakan asumsi. Nilai tersebut dapat didapatkan dengan mengkalkulasi suhu dari ban.

Sebelum melakukan kalkulasi, maka perlu menemukan parameter-parameter yang dibutuhkan. Karena dua parameter yang ingin dicari korelasinya, maka parameter volume harus diasumsikan dan dijadikan sebuah nilai tetap. Dengan menggunakan formula gas ideal [12] dalam Persamaan (11), volume (V) dan jumlah zat (n) dapat dihitung sedangkan konstanta gas ideal (R) sudah diketahui.

$$PV = nRT \quad (11)$$

Volume dari ban dapat dihitung dengan menggunakan persamaan volume dari bentuk torus [13], terlihat pada Gambar 3. Menghitung volume ban membutuhkan informasi dari ban seperti radius mayor (R) dan radius minor (r) seperti terlihat pada Persamaan (12). Tekanan angin juga diperlukan untuk menjadi pengali volume ban. Dengan demikian, volume ban dengan menggunakan Persamaan (12) dapat digunakan untuk menghitung tekanan angin maksimal pada Persamaan (11).



Gambar 3. Bentuk torus.

$$V = 2\pi^2 r R P \quad (12)$$

Dalam penghitungan perubahan suhu ban, ada beberapa faktor yang menyebabkan perubahan suhu tersebut: efek histeresis, usaha gesekan sliding, dan disipasi panas. Efek histeresis (Q_H) adalah bentuk kehilangan energi yang disebabkan oleh siklus

deformasi dan pemulihan yang terus berulang dari sebuah ban, dan energi tersebut berubah menjadi panas. Efek tersebut berkaitan erat dengan resistansi rolling (μ_r) dari sebuah kendaraan, seperti dilihat di Persamaan (13) [14].

$$Q_H = \mu_r F_N l \quad (13)$$

Panas dari usaha gesekan sliding (Q_s) datang dari konversi energi kinetik menjadi energi termal. Seperti persamaan usaha pada umumnya, usaha gesekan sliding membutuhkan gaya gesekan sliding (f) dan juga jarak tempuh dari sliding (s) itu sendiri seperti direpresentasikan pada Persamaan (14) [15].

$$Q_s = f s \quad (14)$$

Meskipun usaha gesekan sliding dapat diselesaikan dengan mudah menggunakan Persamaan (14), menentukan kapan ban mengalami sliding untuk menentukan jarak tempuh tidaklah mudah karena ban terus bergulir. Oleh sebab itu maka untuk menentukan usaha gesekan sliding dilakukan dengan menggunakan persamaan lain, yaitu dengan menggunakan usaha gesekan sliding longitudinal dan lateral digabungkan dengan separuh dari Panjang titik kontak roda dengan jalanan (a), slip longitudinal, gaya sliding, kecepatan longitudinal, dan kecepatan sudut ban (ω), seperti dilihat pada Persamaan (15) dan Persamaan (16).

$$w_x = \frac{2a\sigma_x v_x F_{sx}}{\omega} \quad (15)$$

$$w_y = \frac{2a\sigma_x v_x F_{sy}}{\omega} \quad (16)$$

Ada juga panas yang disebabkan oleh perpindahan panas secara konvektif dan konduktif [16]. Dalam kasus ini, disipasi panas dari perpindahan panas secara konvektif (Q_{conv}) digunakan sedangkan perpindahan panas secara konduktif (Q_{cond}) tidak digunakan karena kecilnya nilai perpindahan panas secara konduktif. Perpindahan panas secara konvektif dapat dihitung dengan menggunakan koefisien perpindahan panas konvektif (h), luas kontak panas (A), dan suhu dari udara (T_b) dan ban (T_a) seperti terlihat pada Persamaan (17)[17].

$$Q_{conv} = h A \frac{(T_a - T_b)}{v_c} \quad (17)$$

Total dari penambahan panas dapat dihitung dengan Persamaan (18), dimana *specific heat* dari karet (s_{rubber}) dan massa dari karet (m_{rubber}) dibutuhkan[18].

$$\Delta T = \frac{Q_H + Q_s - Q_{conv}}{s_{rubber} \times m_{rubber}} \quad (18)$$

Dengan menggunakan panas tambahan dari Persamaan (18) ke suhu awal, dimana suhu tersebut adalah suhu udara, tekanan angin yang baru dapat ditemukan dan digunakan untuk Persamaan (11) dan ditambahkan dengan parameter-parameter sebelumnya. Tekanan angin yang baru dapat digunakan untuk Persamaan (9), dan hasil dari Persamaan (9) dapat merubah nilai keausan yang baru.

Selain suhu dan tekanan, akselerasi juga dapat membuat perbedaan. Disaat melakukan percepatan atau perlambatan, beban dari sebuah kendaraan dapat berpindah berlawanan dengan arahnya, meskipun beban dari kendaraan itu sendiri tetap sama. Proporsi beban dapat berubah antara depan, belakang, kanan, dan kiri (Pacejka & Besselink, 2012; "Weight transfers," 2018) [17, 18]. Di saat kendaraan bergerak ke depan dengan nilai percepatan tertentu, beban akan terasa berpindah kearah belakang dan membuat bagian belakang mobil menjadi lebih berat dibandingkan dengan bagian depan. Dalam Persamaan (19), dapat dilihat bahwa persamaan perpindahan beban longitudinal membutuhkan percepatan (a), tinggi dari center of mass (h), wheelbase (b), dan juga massa dari kendaraan (m) [19]

$$\Delta Weight = a \frac{h}{b} m \tag{19}$$

Ada juga perpindahan beban yang terjadi secara lateral. Perpindahan beban secara lateral terjadi saat sebuah kendaraan melaju dengan percepatan lateral, beban kendaraan dapat terasa lebih berat di bagian luar kendaraan saat melakukan belokan. Perpindahan beban tersebut dapat dihitung dengan Persamaan (20), mirip dengan Persamaan (19), namun dengan menggunakan lebar jejak (t) dibandingkan dengan wheelbase [20].

$$\Delta Weight = a \frac{h}{t} m \tag{20}$$

Hasil dari perpindahan beban dapat dimasukkan dalam Persamaan (7) untuk memberikan masukan pada beban normal.

Kebanyakan dari parameter dalam semua persamaan merupakan konstanta yang sudah diuji untuk menyelesaikan persamaan, sebagaimana diperlihatkan di Tabel 2.

Seperti yang dijelaskan pada Gambar 1, variabel-variabel yang diperhatikan adalah kecepatan berkendara (lurus dan berbelok), sudut setir, dan juga akselerasi (lurus dan berbelok). Parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk mendapatkan kecepatan lurus dan berbelok (longitudinal dan lateral), persamaan trigonometri digunakan dengan mendasarkan pada kecepatan kendaraan dan sudut setir. Ada beberapa kondisi dimana kombinasi nilai tiga variabel digunakan.

Secara keseluruhan, ada 18 kondisi dimana perhitungan dilakukan untuk melakukan perbandingan. Enam kondisi dihitung saat kendaraan bergerak lurus dan 12 saat kendaraan berbelok. Pada Tabel 4 terlihat seluruh kombinasi dari semua kondisi yang ada.

Selain adanya kombinasi-kombinasi seperti pada Tabel 4, untuk kondisi berbelok dan mengalami percepatan seperti pada kondisi nomor 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, dan 18, akan dihitung perbedaan dari masing-masing ban karena perpindahan beban yang dialami

tiap ban berbeda. Dengan demikian, untuk kondisi berbelok itu sendiri, ada 32 kondisi

Table 2. Konstanta Lainnya.

Simbol	Keterangan	Nilai
c_{px}	Longitudinal Bristle Stiffness	50.000.000
c_{py}	Lateral Bristle Stiffness	50.000.000
μ_{sx}	Longitudinal Static Friction Coefficient	0,8
μ_{sy}	Lateral Static Friction Coefficient	0,8
μ_0	Konstanta Model	1,2
k	Konstanta Model	0,08
a_{μ}	Konstanta Model	0,04
P	Tekanan Angin Ban Awal	2,2
T	Suhu Udara (K)	298
R	Konstanta Gas Ideal	0,0000831
n	Jumlah Zat (mol)	865.000
μ_r	Coefficient Rolling Resistance	0,015
h	Heat Transfer Coefficient of Air (W/m ² K)	15
K	Konstanta Archard	0,000000015
H	Kekerasan Ban (N/m ²)	100

Table 3. Variabel Berkendara.

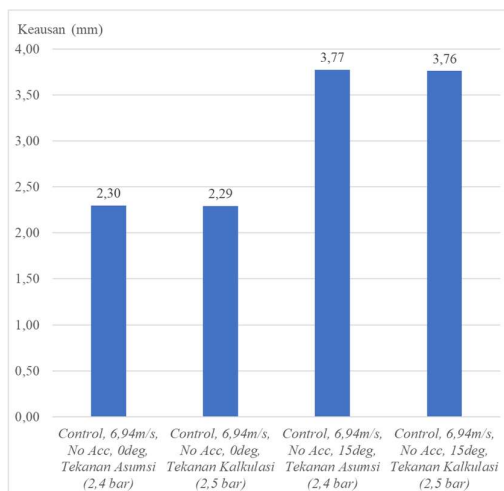
Simbol	Keterangan	Kondisi 1	Kondisi 2
l	Jarak Tempuh (km)	60.000	60.000
α	Sudut Setir (degree) (saat berbelok)	15	20
v	Kecepatan (m/s)	6,94	11,11
a	Percepatan (m/s ²)	1,39	1,85

Table 4. Kombinasi seluruh variabel.

Kondisi	Sudut Setir (degree)	Kecepatan (m/s)	Percepatan (m/s ²)
1	0	6.94	0
2	0	6.94	1.39
3	0	6.94	1.85
4	0	11.11	0
5	0	11.11	1.39
6	0	11.11	1.85
7	15	6.94	0
8	15	6.94	1.39
9	15	6.94	1.85
10	15	11.11	0
11	15	11.11	1.39
12	15	11.11	1.85
13	20	6.94	0
14	20	6.94	1.39
15	20	6.94	1.85
16	20	11.11	0
17	20	11.11	1.39
18	20	11.11	1.85

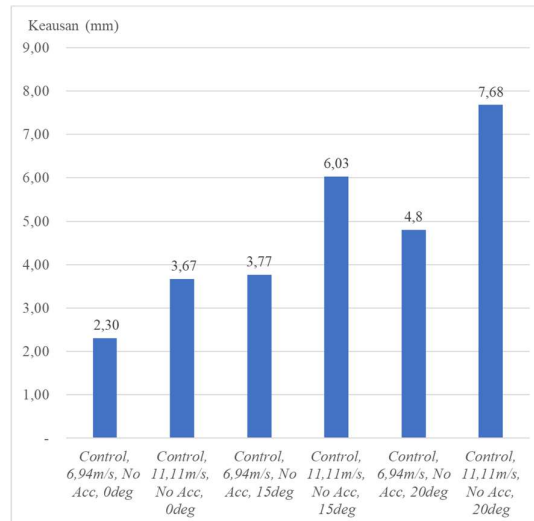
3. Hasil dan Pembahasan

Perbandingan akan dimulai dengan membandingkan juga perbedaan antara menggunakan tekanan angin dengan asumsi dan dengan perhitungan perubahan suhu. Meskipun ditemukan adanya perbedaan, seperti terlihat pada Gambar 4, perbedaan yang ada cukup minimal, dengan perbedaan yang hanya sebesar 0,01 mm setelah berjalan 60.000 km dengan kecepatan 6,94 m/s tanpa percepatan. Hasil tersebut membuktikan bahwa perubahan tekanan angin yang disebabkan oleh kenaikan suhu ban saat berjalan tidak banyak memberikan hasil. Meskipun demikian, hal tersebut membuktikan bahwa kenaikan tekanan angin memberikan hasil keausan ban yang lebih sedikit [20].



Gambar 4. Perbedaan hasil karena tekanan angin.

Karena kecilnya perbedaan seperti terlihat pada Gambar 4, maka perbandingan antara tekanan angin asumsi dengan tekanan angin kalkulasi tidak dilanjutkan. Namun dapat terlihat dalam Gambar 4 bagaimana kondisi berbelok memberikan tingkat keausan yang lebih tinggi, 3,77 mm dibandingkan dengan 2,30 mm. Perbedaan dari masing-masing kondisi lainnya dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.



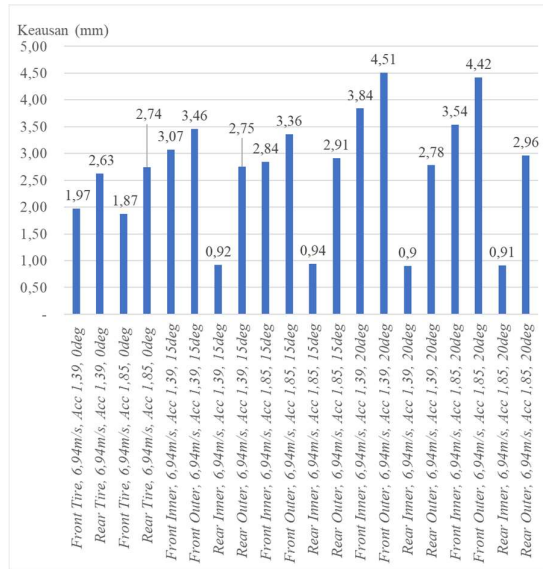
Gambar 5. Perbedaan keausan ban saat kendaraan bergerak lurus.

Pada Gambar 5, terlihat bagaimana efek dari kecepatan dan sudut setir kepada ban saat kendaraan tidak mengalami percepatan. Kenaikan 60% dalam kecepatan dari 6,94 m/s menjadi 11,22 m/s menghasilkan keausan ban yang juga 60% lebih tinggi. Hal tersebut sesuai dengan Persamaan (4) yang menggunakan variabel σ_x yang menggunakan nilai kecepatan laju. Hal tersebut juga konsisten dengan bila kendaraan berbelok. Kenaikan kecepatan menghasilkan kenaikan tingkat keausan yang berbanding lurus.

Sudut setir juga memberikan peningkatan dari tingkat keausan karena adanya variabel F_{sy} yang tidak digunakan bila kendaraan bergerak lurus, dapat terlihat bagaimana sudut setir 15° pada Gambar 5 (Control, 6,94m/s, No Acc, 15deg) dapat meningkatkan keausan sebesar 63% dibandingkan dengan kendaraan yang bergerak lurus (Control, 6,94m/s, No Acc, 0deg). Tambahan dari variabel tersebut juga mengakibatkan kenaikan pada tingkat keausan. Semakin tinggi sudut setir juga meningkatkan keausan seperti yang terlihat bagaimana sudut setir 20° (Control, 6,94m/s, No Acc, 20deg) mengalami keausan yang lebih tinggi, sekitar 27%.

Berdasarkan Gambar 5, dapat dilihat bahwa kecepatan dan sudut setir berbanding lurus dengan tingkat keausan ban, hanya memiliki perbedaan dalam

sebesar apa tingkat keausan tersebut. Gambar 6 menunjukkan bagaimana kedua variabel tersebut memberikan efek apabila diberikan percepatan.



Gambar 6. Perbedaan keausan ban saat kendaraan berjalan 6,94 m/s.

Pada Gambar 6, kendaraan melaju dengan kecepatan rata-rata 6,94 m/s atau 25 km/h. Pada empat kondisi pertama, kendaraan melaju tanpa adanya belokan, maka hanya menghitung perbedaan dari ban depan dan ban belakang saja, sedangkan sisanya merupakan perhitungan detail yang membandingkan setiap ban.

Bila dibandingkan dengan Gambar 5, dapat terlihat bahwa ban belakang (*Rear Tire, 6,94m/s, 1,39m/s², 0deg*) mengalami keausan yang lebih dibandingkan dengan tanpa adanya percepatan (*Control, 6,94m/s, 1,39m/s², 0deg*), dan ban depan mengalami keausan yang lebih ringan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan adanya perpindahan beban pada kendaraan. Saat kendaraan mengalami percepatan ke depan, maka beban dari kendaraan akan berpindah dari yang tadinya seimbang antara keempat ban menjadi lebih berat di bagian belakang kendaraan.

Saat membandingkan kondisi ban dengan kecepatan 6,94 m/s *graph* pada Gambar 5 dan 6, terlihat percepatan pada kendaraan yang bergerak lurus menyebabkan ban belakang (*Rear Tire, 6,94m/s, 1,39m/s², 0deg*) mengalami keausan yang 14% lebih tinggi saat melakukan percepatan sebesar 1,39 m/s² dibandingkan dengan tanpa percepatan. Bila diberlakukan peningkatan percepatan menjadi 1,85 m/s², (*Rear Tire, 6,94m/s, 1,85m/s², 0deg*) tingkat keausan ban hanya berkurang 5% dibandingkan dengan percepatan 1,39 m/s². Semakin tinggi percepatan, maka semakin tinggi juga beban yang berpindah dari satu sisi ke sisi yang lainnya, menyebabkan peningkatan pada keausan pada ban yang , namun tidak terlalu signifikan.

Di kondisi berbelok, maka ada perpindahan beban yang lateral, dimana beban berubah dari kanan ke kiri karena ada akselerasi lateral. Setiap ban mengalami perubahan beban dan saling terkait. Dalam kalkulasi, keempat ban dibagi menjadi ban depan bagian dalam (*front inner tire*), ban depan bagian luar (*front outer tire*), ban belakang bagian dalam (*rear inner tire*), dan ban belakang bagian luar (*rear outer tire*).

Di keadaan berbelok, ban depan bagian luar mendapatkan tingkat keausan paling tinggi dalam kondisi apapun, seperti terlihat pada Gambar 6. Hal tersebut dikarenakan saat kendaraan berbelok, beban paling berat berada pada ban bagian luar, meskipun kendaraan melakukan akselerasi. Berdasarkan Persamaan (19) dan (20), nilai perpindahan beban dipengaruhi oleh jarak antar ban, dimana pada Persamaan (19) merupakan *wheelbase* dan pada Persamaan (20) adalah jarak antara ban kanan dan kiri. Karena jarak antara ban kanan kiri lebih kecil dibandingkan dengan *wheelbase*, maka perpindahan beban lateral lebih besar.

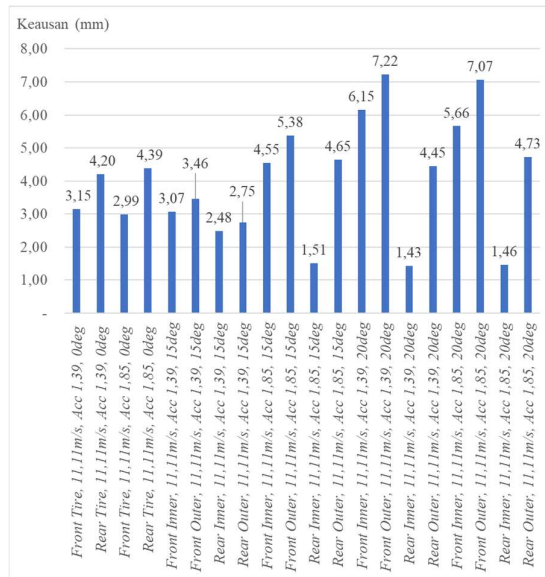
Dari hasil perhitungan dengan kondisi berbelok, ban depan bagian dalam memiliki tingkat keausan yang lebih rendah dibandingkan dengan ban depan bagian luar secara konsisten. Dengan kondisi berbelok sebesar 15 derajat di kecepatan 6,94 m/s dengan percepatan 1,39 m/s², ban depan (*Front Inner Tire, 6,94m/s, 1,39m/s², 15deg*) mendapatkan keausan yang lebih ringan sebesar 12% dibandingkan dengan ban depan bagian luar (*Front Outer Tire, 6,94m/s, 1,39m/s², 15deg*).

Ban depan bagian luar dengan tingkat keausan tertinggi merupakan ban dengan kondisi percepatan 1,39 m/s² dengan sudut setir 20° (*Front Outer Tire, 6,94m/s, 1,39m/s², 20deg*), namun percepatan yang makin tinggi mengakibatkan beban bagian depan semakin berkurang, menyebabkan nilai keausan yang lebih rendah (*Front Outer Tire, 6,94m/s, 1,85m/s², 20deg*).

Nilai-nilai dari keausan dapat berbeda jauh antar kondisi dikarenakan setiap kondisi mengalami perilaku yang konstan sepanjang 60.000 km. Hal tersebut menyebabkan perbedaan yang tidak signifikan menjadi signifikan seiring bertambahnya jarak dalam simulasi. Gambar 7 menampilkan pola yang serupa dengan Gambar 6, namun Gambar 7 menggunakan kecepatan 11,11 m/s untuk seluruh kondisi.

Gambar 7 mendapatkan hasil dengan pola yang sama seperti Gambar 6. Dari Gambar 6 dan 7, dapat ditemukan bahwa ban depan bagian luar secara konsisten mendapatkan tingkat keausan paling tinggi, sedangkan ban belakang bagian dalam mendapatkan hasil paling rendah. Kenaikan kecepatan sebesar 60% menjadi 11,11 m/s juga meningkatkan keausan dengan variabel lain yang sama menjadi 60% lebih banyak dibandingkan dengan kondisi dimana laju

kendaraan adalah 6,94 m/s, sebagaimana yang ditemukan pada Gambar 5.



Gambar 7. Perbedaan keausan ban saat kendaraan berjalan 11,11 m/s.

Tingkat keausan terbesar yang didapatkan secara keseluruhan dari hasil perhitungan adalah pada ban depan bagian luar ketika ban berbelok sebanyak 20 derajat dengan kecepatan 11,11 m/s dan percepatan 1,39 m/s² (Front Outer Tire, 11,11m/s, 1,39m/s², 20deg), bukan 1,85 m/s² (Front Outer Tire, 11,11m/s, 1,85m/s², 20deg) yang merupakan nilai percepatan terbesar. Hal tersebut dapat terjadi karena nilai percepatan kedua menghasilkan perpindahan beban ke bagian belakang yang lebih besar dan menyebabkan ban depan bagian luar mendapatkan beban yang lebih ringan dibandingkan dengan percepatan 1,39 m/s². Seluruh perbandingan dapat dilihat pada Gambar 6 dan dibandingkan terhadap kontrol.

4. Kesimpulan

Dari hasil percobaan, dapat disimpulkan bahwa ketika kendaraan bergerak lurus, kendaraan memberikan tingkat keausan ban yang paling sedikit, sedangkan ban mengalami keausan yang paling besar saat kendaraan berbelok. Hal tersebut disebabkan bertambahnya nilai variabel F_{sy} yang meningkatkan nilai keausan, dimana pada kondisi kendaraan bergerak lurus, variabel tersebut bernilai 0.

Dari variabel-variabel yang disimulasikan juga dapat ditemukan bahwa kenaikan kecepatan berbanding lurus dengan kenaikan keausan, sesuai dengan persentase kenaikan percepatan. Percepatan juga memberikan kenaikan keausan pada ban belakang yang disebabkan oleh bertambahnya beban pada bagian belakang dan berkurangnya beban pada bagian depan, percepatan lateral juga membuat keausan ban sisi kanan atau kiri kendaraan semakin besar. Sudut

setir yang semakin besar juga memberikan keausan yang lebih tinggi pada ban depan.

Penggunaan parameter yang terisolasi memberikan perbedaan hasil yang cukup signifikan, karena jauhnya jarak yang memberikan simulasi waktu yang lebih banyak untuk mendapatkan data yang lebih banyak. Hasil yang didapatkan membuktikan bahwa variabel kecepatan, percepatan, dan sudut setir memiliki peran besar sedangkan tekanan angin ban tidak memberikan hasil yang signifikan dan tidak perlu menghitung suhu aktual untuk mendapatkan nilai tekanan angin yang sesuai dengan kondisi.

Daftar Pustaka

- [1] Continental. (2013). Tyre Basics - Passenger Car Tyres. <https://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/585558/d2e4d4663a7c79ca81011ab47715e911/download-tire-basics-data.pdf>
- [2] Oh, Y., & Lee, H. (2014). Characteristics of a tire friction and performances of a braking in a high speed driving. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 260428. <https://doi.org/10.1155/2014/260428>
- [3] Evgenikos, P., Yannis, G., Papantoniou, P., Kirk, A., Thomas, P., Atalar, D., Hermitte, T., & Van Elslande, P. (2012). Review of current in-vehicle safety systems and related data sources. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956234>
- [4] Caban, J., Drozdziel, P., Barta, D., & Liscak, S. (2014). Vehicle Tire Pressure Monitoring Systems. *Diagnostyka*, 15(3).
- [5] Jha, K. K., & Pabla, B. S. (2020). A real time engine oil monitoring sistem for diagnosis of lubricant using IoT network. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(8), 497-505. <https://doi.org/10.35940/ijitee.h6524.069820>
- [6] Zhu, J., He, D., & Bechhoefer, E. (2013). Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. *Journal of Chemical Science and Technology*, 2(3), 100-115.
- [7] SAE Internationals. (2008, January 1). *SAE J670 - Vehicle Dynamics Terminology*. GlobalSpec. <https://standards.globalspec.com/std/1081460/sae-j670>
- [8] Li, Y., Zuo, S., Lei, L., Yang, X., & Wu, X. (2011). Analysis of impact factors of tire wear. *Journal of Vibration and Control*, 18(6), 833-840. <https://doi.org/10.1177/1077546311411756>
- [9] Stachowiak, G. (2006). *Wear- Materials, Mechanism and Practice*. John Wiley & Sons.
- [10] Rabinowicz, E. (1995). *Friction and Wear of Materials*. John Wiley & Sons.
- [11] Wang, T. (2017). Analysis on Tyre Wear.
- [12] NASA. (2014). *Equation of state*. Wayback Machine. <https://web.archive.org/web/20140823003747/>

- www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/eqstat.html
- [13] *Torus*. (2017). Math is Fun. <https://www.mathsisfun.com/geometry/torus.html>
- [14] Ma, S., Huang, G., Obaia, K., Moon, S. W., & Liu, W. V. (2021). Hysteresis loss of ultra-large off-the-road tire rubber compounds based on operating conditions at mine sites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 236(2-3), 439-450. <https://doi.org/10.1177/09544070211015525>
- [15] Sherwood, B. A., & Bernard, W. H. (1984). Work and heat transfer in the presence of sliding friction. *American Journal of Physics*, 52(11), 1001-1007. <https://doi.org/10.1119/1.13775>
- [16] Harding, K. (2018). Heat Transfer - Introduction.
- [17] Pacejka, H., & Besselink, I. (2012). *Tire and vehicle dynamics*. Butterworth-Heinemann.
- [18] *Weight transfers*. (2018, July 13). Drivingfast.net. <https://drivingfast.net/weight-transfers/>
- [19] *Toyota Fortuner 2012*. (n.d.). car.info. <https://www.car.info/en-se/toyota/fortuner/fortuner-2012-11265450/specs>
- [20] Papaioannou, G., Jerrelind, J., & Drugge, L. (2021). Optimising tyre wear and exploring its conflict with comfort.