

Analisis Performa Rem Kendaraan Penumpang Berukuran Sedang (*Midsize Passenger's Car "2500 mm <L<2800 mm"*) Menggunakan Model Temperatur Pengereman

Rolan Siregar^{1*}, Mohammad Adhitya², Danardono A. Sumarsono³

¹Universitas Indonesia, Departemen Teknik Mesin, Kampus Depok-16424, Indonesia

²Universitas Indonesia, Departemen Teknik Mesin, Kampus Depok-16424, Indonesia

³Universitas Indonesia, Departemen Teknik Mesin, Kampus Depok-16424, Indonesia

*email : rolanregar@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan pengkajian terhadap kinerja sistem rem berdasarkan temperatur pengereman pada *rotor disc* yang ada pada tiap roda, sehingga dapat dilihat fungsi rem apakah berkerja dengan baik atau tidak. Di mana sistem pengereman yang tidak berfungsi dengan baik seperti kaliper kurang mencekam akan terlihat dari panas *rotor disc* yang terjadi. Jika satu unit rem tidak berfungsi maka beban pengereman unit lainnya akan bertambah dan dapat menimbulkan panas yang berlebih. Panas berlebih dapat menyebabkan kinerja rem tidak berfungsi dengan optimal karena kegagalan material untuk menahan panas tersebut.

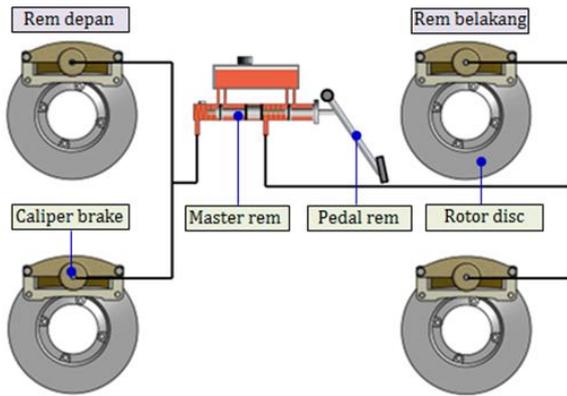
Berat muatan kendaraan adalah divariasikan dan pengereman dilakukan di jalan lurus dan berbelok dengan asumsi permukaan jalan datar, hal ini dilakukan untuk mengetahui kapan temperatur maksimum terjadi di tiap rem. Berdasarkan hasil penelusuran bahwa besar temperatur maksimum rem di roda depan (salah satu) adalah 222 °C, rem belakang 239 °C, selisih maksimum temperatur antar rem belakang dengan depan (R4-R2) adalah 92 °C, antara rem depan kiri dengan depan kanan adalah 71 °C, dan antar rem belakang kanan dengan kiri adalah 77 °C. Hasil penelusuran temperatur maksimum dan selisih temperatur antar rem tersebut adalah sebagai acuan kinerja rem apakah masih berfungsi dengan normal atau tidak pada spesifikasi kendaraan tersebut, di mana alat deteksi temperatur akan dikembangkan sebagai *alert* tambahan kondisi rem yang pada akhirnya untuk mengurangi resiko kecelakaan kendaraan.

Kata kunci : Performa rem; *midsize passengers car*; temperatur pengereman

1. Pendahuluan

Sistem pengereman pada kendaraan merupakan salah satu hal yang terpenting agar pengemudi dan penumpang dapat berkendara secara aman. Secara umum sistem pengereman akan bekerja semakin berat pada kondisi kecepatan dan beban kendaraan yang bertambah. Selanjutnya, distribusi beban pengereman pada tiap roda kendaraan dapat berubah-ubah tergantung pada manuver yang sedang terjadi seperti saat berada di jalan menanjak, menurun, ataupun berbelok. Dengan mengetahui beban yang dialami rem dari berbagai kondisi maka akan dapat dilakukan pengkajian terhadap kinerja rem untuk mencegah terjadinya kecelakaan akibat kegagalan sistem pengereman.

Tujuan utama penelitian ini adalah menghitung besar temperatur *rotor disc brake* yang ada pada tiap roda (Gambar 1) dengan memvariasikan jumlah muatan kendaraan, kecepatan, radius belok, untuk melihat temperatur maksimum yang terjadi. Selanjutnya berdasarkan hasil perhitungan temperatur tersebut maka dapat ditentukan batas aman (kondisi *warning*) temperatur pengereman.



Gambar 1. Skematik brake

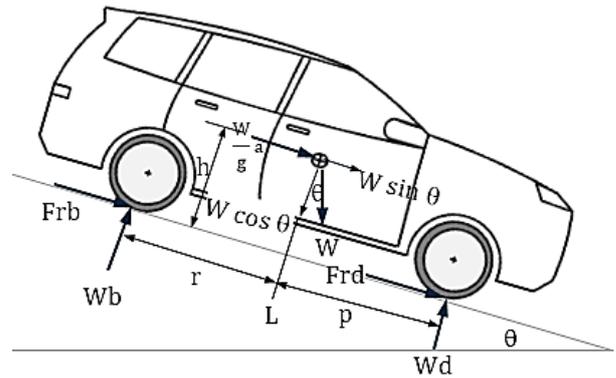
Perhitungan temperatur dapat dilakukan dengan simulasi berbasis metode elemen hingga.

2. Metodologi

Gaya normal pada setiap roda akan berbeda ketika kendaraan sedang direm, hal ini dipengaruhi oleh timbulnya momen gaya pada pusat massa kendaraan. Selain itu besar gaya normal di setiap roda akan berbeda ketika kendaraan bergerak di jalan belok hal ini disebabkan oleh momen rolling, di mana beban pada roda *outside* akan jauh lebih besar dari pada beban pada roda *inside*. Gaya normal pada roda tersebut merupakan presentasi besar beban rem. Dalam beberapa kondisi gerak kendaraan dilakukan pendekatan perhitungan temperatur pada masing-masing rem yang ada di tiap roda.

2.1. Pengereman di jalan lurus

Pada Gambar 2 ditampilkan gaya –gaya luar yang bekerja pada kendaraan ketika sedang pengereman di jalan lurus. Persentasi kemiringan jalan dibuat dalam bentuk sudut θ . Batasan penelitian yang dilakukan adalah dengan asumsi kelandaian jalan sama dengan nol.



Gambar 2. Gaya pada kendaraan saat pengereman jalan lurus

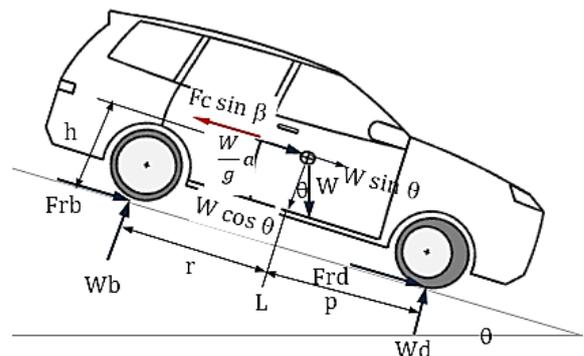
Ketika pengereman terjadi maka akan timbul gaya momen pada titik pusat massa kendaraan sehingga beban di sumbu roda depan akan bertambah. Formula beban pada roda depan dan belakang dapat ditampilkan pada Pers. 1 dan 2 [1].

$$W_d = \frac{1}{L} \left\{ W \cos \theta \cdot r + h \cdot \frac{W}{g} \cdot a \pm W \sin \theta \cdot h \right\} \quad (1)$$

$$W_b = \frac{1}{L} \left\{ W \cos \theta \cdot p - h \cdot \frac{W}{g} \cdot a \pm W \sin \theta \cdot h \right\} \quad (2)$$

2.2. Pengereman di jalan belok

Gaya yang bekerja pada kendaraan ketika sedang pengereman di jalan belok dapat ditampilkan pada Gambar 3.



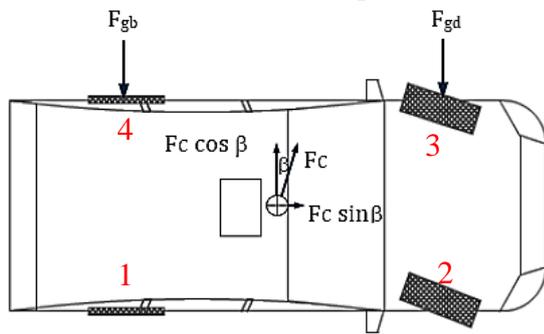
Gambar 3. Gaya pada kendaraan saat pengereman jalan belok

Gaya normal roda depan (W_d) dan gaya normal roda belakang (W_b) ketika pengereman di jalan belok tersebut dapat dilihat pada Pers. 3, dan 4 [1].

$$W_d = \frac{1}{L} \left[W \cos \theta \cdot r + h \left\{ \frac{W}{g} \cdot a \pm W \sin \theta - F_c \cdot \sin \beta \right\} \right] \quad (3)$$

$$W_b = \frac{1}{L} \left[W \cos \theta \cdot p - h \left\{ \frac{W}{g} \cdot a \pm W \sin \theta - F_c \cdot \sin \beta \right\} \right] \quad (4)$$

Gaya sentrifugal akan terjadi apabila ada benda yang bergerak melingkar, hal ini dapat dilihat pada kendaraan berbelok dalam kondisi ideal (kondisi ackerman) [2] pada Gambar 4.



Gambar 4. Gaya yang bekerja pada kendaraan berbelok dengan kondisi ideal

2.3 Perhitungan kecepatan maksimum pengaruh rolling

Kecepatan maksimum kendaraan di jalan belok berbeda dengan jalan lurus. Pada jalan lurus kecepatan maksimum kendaraan adalah berdasarkan torsi dan daya mesin, sedangkan pada jalan belok sudah dipengaruhi oleh momen rolling ke arah out side belok kendaraan.

Analisa guling/rolling dilakukan untuk memperoleh gaya normal pada masing-masing roda. Roda akan terangkat apabila gaya normal pada salah satu roda *inside* sama dengan nol [1]. Adapun gaya yang mempengaruhi *rolling* adalah berat kendaraan, momen guling, dan momen *pitching* seperti pada Pers. 5 [1].

$$F_{zi} = W_i \pm F_{mgi} \pm F_{mpi} \quad (5)$$

di mana :

F_{zi} adalah gaya normal pada masing-masing roda ($i = 1, 2, 3, 4$)

W_i adalah gaya berat pada masing-masing roda

F_{mgi} adalah gaya normal pada masing-masing roda akibat momen guling

F_{mpi} adalah gaya normal pada masing-masing roda akibat momen *pitching*

Persamaan gaya normal pada masing-masing roda dapat ditampilkan pada Pers. 6, 7, 8, dan 9 dengan asumsi pengaruh akibat angin sangat kecil sehingga tidak diperhitungkan begitu juga dengan pengaruh suspensi.

$$F_{Z1} = \frac{W \cdot p}{2(p+r)} - \frac{\left(\frac{p}{p+r}\right) \cdot F_c \cos \beta \cdot h}{tr} - \frac{F_c \sin \beta \cdot h}{2(p+r)} \quad (6)$$

$$F_{Z2} = \frac{W \cdot r}{2(p+r)} - \frac{\left(\frac{r}{p+r}\right) \cdot F_c \cos \beta \cdot h}{t_f} + \frac{F_c \sin \beta \cdot h}{2(p+r)} \quad (7)$$

$$F_{Z3} = \frac{W \cdot r}{2(p+r)} + \frac{\left(\frac{r}{p+r}\right) \cdot F_c \cos \beta \cdot h}{t_f} + \frac{F_c \sin \beta \cdot h}{2(p+r)} \quad (8)$$

$$F_{Z4} = \frac{W \cdot p}{2(p+r)} + \frac{\left(\frac{p}{p+r}\right) \cdot F_c \cos \beta \cdot h}{tr} - \frac{F_c \sin \beta \cdot h}{2(p+r)} \quad (9)$$

Keadaan kritis kendaraan akan terguling adalah ketika salah satu gaya pada roda *inside* sama dengan nol. Untuk memperoleh nilai gaya sentrifugal dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan Pers. 10.

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (10)$$

Dan nilai R adalah radius belok yang didekati dengan kondisi ideal seperti pada Pers. 11.

$$R = \frac{p+r}{\delta_f} \cdot 57,29 \quad (11)$$

2.4 Perhitungan kecepatan maksimum pengaruh skid

Skid akan terjadi apabila gaya kesamping seperti gaya sentrifugal dan tekanan angin lebih besar dari pada gaya lateral roda yang menahannya. Gaya sentrifugal roda depan dan belakang dapat ditampilkan pada Pers. 12, 13 [1].

$$F_{cd} = \frac{r}{p+r} (F_c \cdot \cos \beta) \quad (12)$$

$$F_{cb} = \frac{p}{p+r} (F_c \cdot \cos \beta) \quad (13)$$

Kondisi kritis di mana roda akan skid adalah ketika gaya F_{cd} atau F_{cb} sama dengan koefisien gesek jalan dikali dengan gaya normal roda, seperti pada Pers. 14, 15.

$$F_{cd} = \mu \cdot Wd \quad (14)$$

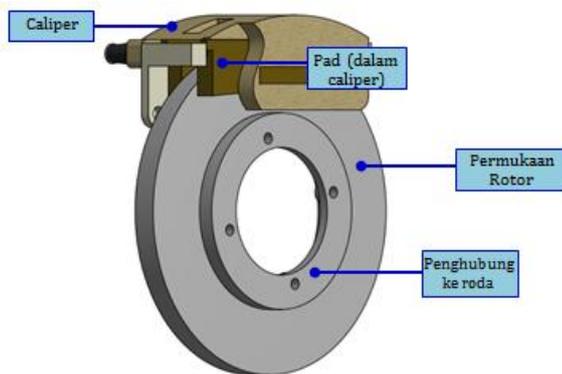
$$F_{cb} = \mu \cdot Wb \quad (15)$$

Dengan mengasumsikan sudut side wall $\beta = 0$, gaya dan momen angin diabaikan, maka kecepatan maksimum kendaraan belok agar roda depan dan belakang tidak skid dapat dirumuskan pada Pers. 16.

$$V = \sqrt{\mu \cdot R \cdot g} \quad (16)$$

2.5 Konversi energi kendaraan

Ditinjau dari segi energi bahwa pengereman adalah mengubah energi mekanik dari kendaraan bergerak ke dalam beberapa bentuk lain, yang menghasilkan penurunan kecepatan kendaraan. Artinya energi kinetik diubah menjadi energi panas akibat efek gesekan antara pad dan rotor, kemudian panas tersebut akan terlepas ke lingkungan [3]. Untuk lebih jelasnya komponen rem tipe disk brake dapat diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Elemen rem tipe disk brake

Tulisan ini akan menyajikan simulasi temperature pada rotor disk solid. Simulasi temperature dapat dilakukan dengan mencari *heat flux* terlebih dahulu. Yang dimaksud dengan *heat flux* adalah laju aliran panas pada permukaan *rotor disk* sebagai fungsi waktu. Kendaraan yang memiliki massa dan bergerak dengan kecepatan tertentu maka dapat dikonversikan sebagai energi kinetik. Penambahan penumpang diurutkan dari urutan tempat duduk dari depan sampai dengan belakang seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Urutan penambahan beban

Data kendaraan yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Data parameter kendaraan

No	Item	Nilai	Sat
A Geometri kendaraan			
1	<i>Curb weight</i> kendaraan	1.130	kg
2	<i>Wheel base</i> (p+r)	2.655	m
3	<i>Wheel track front</i> t_f	1.425	m
4	<i>Wheel track rear</i> t_r	1.435	m
5	Diameter rotor	0,62	m
6	Persentasi EK yang diabsorpsi brake	80%	-
7	Koefisien gesek kontak kering jalan dengan roda μ	0,7	-
B Berat kendaraan			
1	Penambahan beban pertama (+84 kg) 19%	1218	kg
2	Penambahan beban kedua (+ 83 kg) 38%	1301	kg
3	Penambahan beban ketiga (+ 82 kg) 56%	1383	kg
4	Penambahan beban keempat (+74 kg) 73%	1457	kg
5	Penambahan beban kelima (+56 kg) 86%	1513	kg
6	Penambahan beban keenam (+64 kg) 100%	1577	kg

Daya pengereman dapat dihitung dengan menggunakan Pers. 17 [4].

$$P_b = \frac{EK}{t} \quad (17)$$

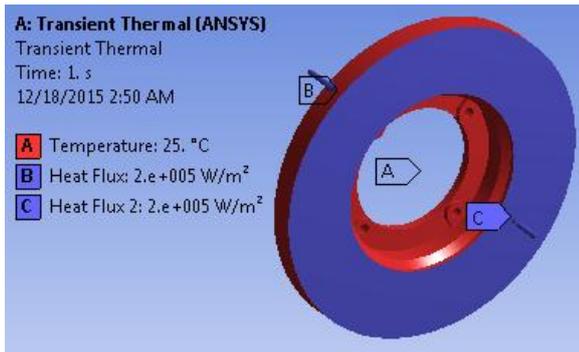
Di mana t adalah lama pengereman. Dan untuk menghitung *heat flux* dapat digunakan Pers. 18 [4].

$$Q = \frac{P_b}{A} \quad (18)$$

di mana A adalah luas permukaan sentuh *pad* dengan permukaan rotor.

2.6 Transient termal pada rotor disk brake

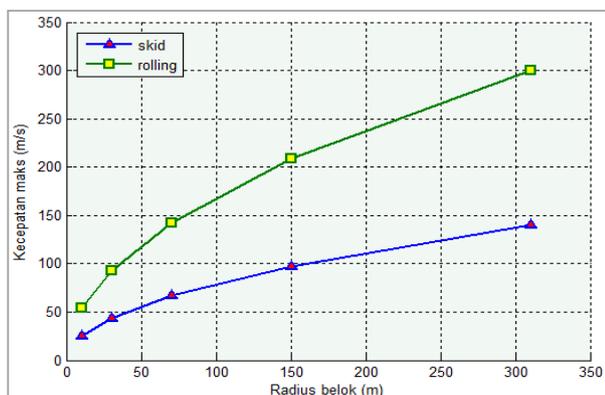
Transient termal pada umumnya dilakukan untuk mengetahui besar temperatur sesuai dengan perubahan waktu. Parameter yang dimasukkan ke dalam transient termal adalah besar *heat flux* yang dapat dihitung dengan menggunakan Pers. 18. Berikut tampilan pemodelan pembebanan transient termal pada salah satu rotor disk brake (Gambar 7).



Gambar 7. Pemodelan pembebanan pada permukaan rotor disk

3. Hasil Dan Pembahasan

Variasi berat kendaraan adalah dengan adanya penambahan penumpang sampai dengan enam orang. Penambahan beban diurutkan dari tempat duduk paling depan sampai belakang. Kecepatan maksimum kendaraan yang diizinkan terlebih dahulu dihitung dengan memperhatikan pengaruh *rolling* dan *skid*. Pada Gambar 8 ditampilkan grafik kecepatan maksimum yang diizinkan supaya tidak terjadi guling atau skid sesuai dengan radius belok tersebut.



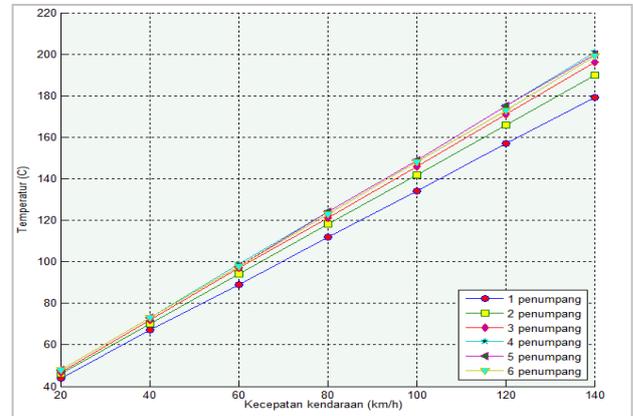
Gambar 8. Kecepatan izin pengaruh *skid* dan *rolling*

Jika dibandingkan dengan kecepatan izin akibat *rolling* pada jalan belok adalah lebih kecil, oleh karena itu kecepatan izin yang dipilih sebagai acuan input data adalah kecepatan izin maksimum paling kecil yaitu kecepatan izin pengaruh *skid*.

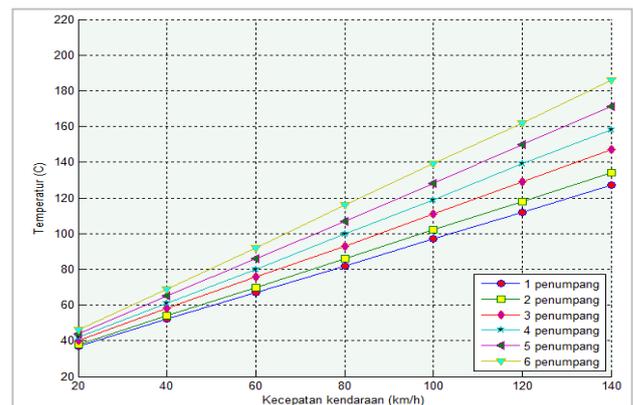
3.1 Temperatur tiap rem pada gerak lurus

Beban pengereman di rem depan dan belakang adalah berbeda di mana roda depan mengalami beban yang lebih besar dari pada

belakang. Temperature pada *disc brake* berbanding lurus dengan besar beban pengereman. Pada Gambar 9 ditampilkan distribusi temperature pada *disc brake* dengan variasi jumlah penumpang. Beban rem ke dua roda di sumbu depan (2,3) adalah sama, begitu juga ke dua roda belakang (1,4).



(a). Temperatur maks roda depan 199°C

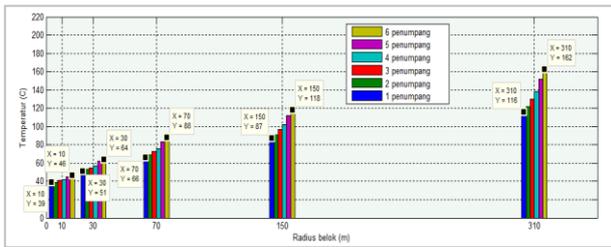


(b). Temperatur maks roda belakang 186 °C
Gambar 9 (a)(b). Temperatur rem pada gerak lurus

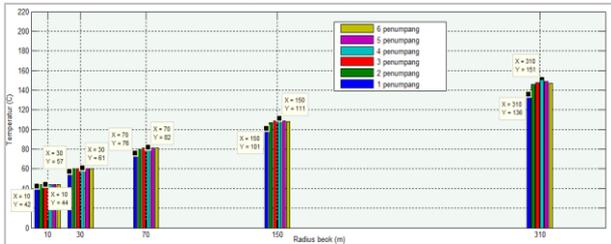
Dapat disimpulkan bahwa temperature akan meningkat seiring bertambahnya beban pada kendaraan. Adapun temperature tertinggi adalah 199 °C dialami oleh rem depan ketika jumlah penumpang enam orang. Sedangkan temperature tertinggi yang dialami oleh rem belakang adalah 186 °C.

3.2 Beban rem pada gerak belok

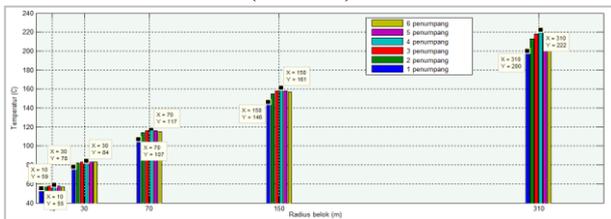
Temperatur rem pada pengereman ketika di jalan belok dapat ditampilkan pada Gambar 10.



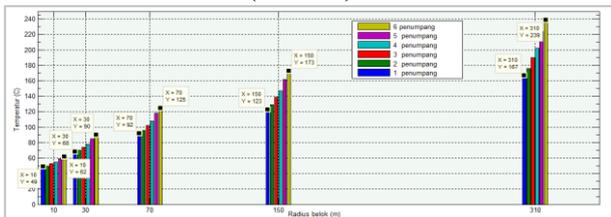
(a). Temperatur roda 1 (inside belakang) maks (162 °C)



(b). Temperatur roda 2 (inside depan) maks (151 °C)



(c). Temperatur roda 3 (outside depan) maks (222 °C)



(d). Temperatur roda (outside belakang) maks (239 °C)

Gambar 10 (a,b,c,d). Temperatur disc brake pengereman di jalan belok

Berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat bahwa temperature maksimum pada roda 1 (inside belakang) adalah 162 °C, roda 2 (inside depan) 151 °C, roda 3 (outside depan) 222 °C, dan roda 4 (outside belakang) 239 °C.

3.3. Selisih temperatur pada tiap roda

Selisih temperatur pada tiap roda dimanfaatkan sebagai acuan keseimbangan kinerja rem. Selisih temperatur tersebut akan berada dibawah atau sama dengan selisih temperatur berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan pada spesifikasi kendaraan tersebut apabila rem bekerja dengan normal. Pada

pengereman di jalan lurus maka selisih temperature antara salah satu rem diroda belakang dengan salah satu rem di roda depan dapat ditampilkan pada Tabel 2 dengan variasi jumlah penumpang dan kecepatan kendaraan. Sedangkan selisih temperatur antar roda depan adalah nol, dan selisih temperatur antar roda belakang juga nol.

Tabel 2. Selisih temperatur rem pada roda belakang dengan roda depan saat pengereman lurus

V (km/h)	Temperatur (°C)					
	1P	2P	3P	4P	5P	6P
20	7	8	7	6	4	2
40	15	16	14	12	8	4
60	22	24	22	19	12	6
80	30	32	28	24	17	8
100	37	40	35	30	21	9
120	45	48	42	37	26	11
140	52	56	50	43	29	14

Selisih temperatur maksimum yang terjadi adalah 56 °C yaitu ketika jumlah penumpang dua orang yang berada pada posisi depan (driver dan samping driver).

Selanjutnya jika ditinjau besar selisih temperatur pada masing-masing rem ketika pengereman dijalan belok dapat ditampilkan pada tabel-tabel berikut. Selisih temperatur roda belakang outside dengan roda depan inside dapat ditampilkan pada Tabel 3 dimana selisih maksimum adalah 92 °C.

Tabel 3. Selisih temperatur rem pada roda belakang outside dengan depan inside (R4-R2)

V (km/h)	R (m)	Temperature (°C)					
		1P	2P	3P	4P	5P	6P
25	10	7	7	9	11	15	18
44	30	11	10	14	17	25	30
67	70	16	15	21	26	37	44
100	150	22	22	30	36	53	65
140	310	31	30	42	51	75	92

Kemudian selisih temperatur roda belakang inside dengan roda depan outside dapat ditampilkan pada Tabel 4 dengan selisih maksimum adalah 91 °C ketika jumlah penumpang adalah dua orang yang berada pada jok depan.

Tabel 4. Selisih temperatur rem pada roda belakang inside dengan depan outside (R1-R3)

v km/h	Temperature (°C)						
	R (m)	1P	2P	3P	4P	5P	6P
25	10	16	18	17	17	13	11
44	30	27	29	28	27	21	19
67	70	41	45	43	41	33	27
100	150	59	64	61	59	46	39
140	310	84	91	88	84	67	55

Sedangkan besar selisih temperature maksimum antar roda depan (R2 dengan R3) adalah 71 °C seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Selisih temperatur antar rem depan

v km/h	Temperature (°C)						
	R (m)	1P	2P	3P	4P	5P	6P
25	10	13	14	14	15	14	13
44	30	21	22	23	23	23	23
67	70	31	33	35	35	35	34
100	150	45	48	49	50	49	49
140	310	63	67	70	71	70	70

Dan besar selisih temperature maksimum antar roda belakang (R1 dengan R4) adalah 77 °C seperti yang ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Selisih temperatur antar rem belakang

v km/h	Temperature (°C)						
	R (m)	1P	2P	3P	4P	5P	6P
25	10	10	11	12	13	14	16
44	30	17	18	19	21	23	26
67	70	25	27	29	32	35	37
100	150	36	38	42	45	50	55
140	310	52	54	60	64	72	77

4. Kesimpulan

Dari analisis temperatur yang telah dilakukan diperoleh perkiraan temperature yang terjadi pada rotor disc ketika kendaraan mengalami pengereman ketika di jalan lurus maupun berbelok. Berdasarkan hasil penelusuran bahwa besar temperatur maksimum rem di roda depan (salah satu) adalah 222 °C terjadi ketika pengereman di jalan belok dengan jumlah penumpang 4 orang, sedangkan rem belakang adalah 239 °C

dengan pengereman di jalan belok pada jumlah penumpang 6 orang, selisih maksimum temperatur antar rem belakang dengan depan (R4-R2) adalah 92 °C terjadi pada pengereman jalan belok, antara rem depan kiri dengan depan kanan adalah 71 °C, dan antar rem belakang kanan dengan kiri adalah 77 °C.

Maka nilai-nilai tersebut akan menjadi acuan batas normal kinerja fungsi rem pada spesifikasi kendaraan tersebut, atau apabila hasil deteksi sensor temperatur pengereman bisa melebihi nilai tersebut maka sistem pengereman bisa dikategorikan dalam kondisi *warning* atau perlu pengecekan kondisi sistem rem. Alat deteksi temperatur diharapkan dapat dikembangkan sebagai alert tambahan kinerja rem, yang bertujuan untuk mengurangi terjadinya kecelakaan akibat fungsi rem.

Referensi

- [1] I. N. Sutantra and B. Sampurno, Teknologi otomotif, Surabaya: Guna Widya, 2010.
- [2] R. N. Jazar, Vehicle dynamic theory and application, New York: Springer, 2008.
- [3] A. Belhocine and M. Boechetara, "Termomomechanical Analysis of Braking System," *U.P.B. Sci. Bull*, vol. 6, no. 1, 2014.
- [4] R. Limpert, Brake Design and Safety, Warrendale: SAE International, 2011.
- [5] A. Day, Braking of Road Vehicle, Waltham: Elseiver, 2014.
- [6] A. J. Rodriguez, "Experimental Analysis of Disc Thickness Variation Development in Motor Vehicle Brakes," RMIT University, Melbourne, 2006.
- [7] P. S. Gritt, "Brake system - Energy conversion Management," SAE.
- [8] B. Breuer and U. Dausend, Advance Brake Technology, Warendalle: SAE International, 2003.
- [9] Y. Pengfei, F. Rui and W. Chang, "Design of temperature monitoring system for drum brake Based on nRF2401," Chang'an University, Xi'an, 2010.