

BAB V

ANALISIS DAN PENGUJIAN

Pada bab ini menjelaskan analisis kestabilan berdasarkan perhitungan geometri, analisis kekuatan pada rangka, dan pengujian dilapangan. Proses analisis kestabilan menggunakan pendekatan analisis dinamika pada kendaraan yang di implementasikan pada konstruksi sepeda roda tiga karena memiliki kesamaan dalam perhitungan geometri kestabilan pada kendaraan. Proses perhitungan geometri menggunakan *software Solidworks 2018* untuk mendapatkan posisi titik berat (*center of gravity*). Setelah itu dilakukan perhitungan dan analisis menggunakan metode kalkulasi quasi dinamik meliputi penentuan radius *ackerman*, sudut slip, kecepatan kritis, dan gaya-gaya yang terjadi pada konstruksi. Selanjutnya dilanjutkan pengolahan hasil perhitungan menggunakan *software PTC MathCAD 4.0* dan *Microsoft Excel*. Proses pengujian menggunakan media sepeda roda tiga yang digunakan untuk praktikum kinematika. Pengujian menghasilkan kondisi kendaraan pada saat dibelokan. Setelah itu dilakukan analisis dari data yang dihasilkan berdasarkan perhitungan kestabilan dan pengujian.

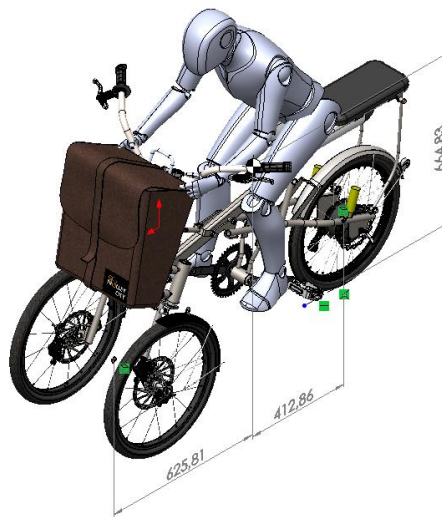
5.1. Analisis Kestabilan Kendaraan

Analisis kestabilan pada kendaraan merupakan proses analisis untuk mengetahui performa dari sebuah kendaraan. Analisis kestabilan ini menggunakan metode kalkulasi quasi dinamik yang memungkinkan untuk mengkalkulasi gerakan dinamis kendaraan yang seolah-olah dianalisa sebagian pada kondisi statis. Tahapan dalam proses kalkulasi quasi dinamis telah dibahas sebelumnya pada landasan teori.

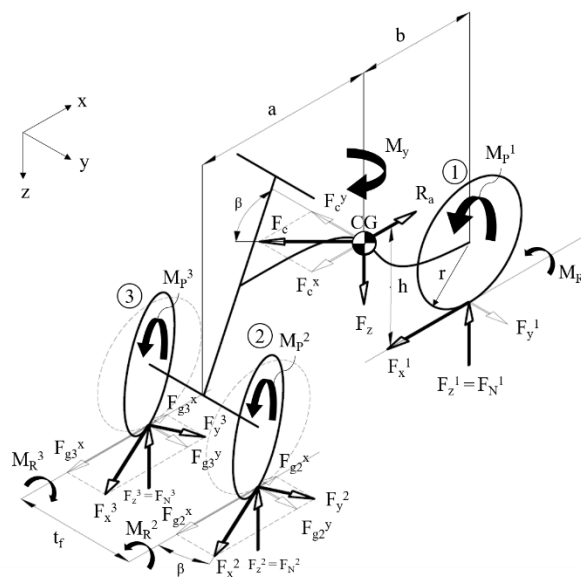
Tahapan pertama dalam proses kalkulasi adalah menentukan membuat model fisik dan model matematis dari kendaraan yang akan dianalisis. Model fisik kendaraan pada penelitian ini menggunakan pendekatan 3D CAD *modeling* dari rancangan yang telah diselesaikan pada bab sebelumnya. 3D CAD ini mempermudah untuk menentukan posisi titik berat pada kendaraan seperti yang

dapat dilihat pada gambar 5.1. Sedangkan model matematis dibuat berdasarkan dimensi pada 3D CAD seperti pada gambar 5.2.

Tahapan kedua dilanjutkan dengan perhitungan gaya pada kendaraan dan gaya yang terjadi pada ban dengan variasi sudut belok dari 10° , 15° , 20° , dan 25° dan variasi kecepatan dari 5 km/jam, 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Dan tahapan ketiga yaitu melakukan analisis untuk mengetahui kondisi kendaraan berdasarkan nilai indeks understeer.



Gambar 5.1 Model fisik kendaraan roda tiga



Gambar 5.2 Model matematis kendaraan roda tiga

Analisis indeks understeer dilakukan untuk mengetahui kondisi kendaraan pada saat berbelok. Nilai indeks understeer (K_{us}) positif menggambarkan kendaraan mengalami *understeer*, nilai indeks understeer (K_{us}) nol menggambarkan kendaraan pada kondisi netral, dan nilai indeks understeer (K_{us}) negatif menggambarkan kendaraan mengalami *oversteer*.

Berikut rumus-rumus yang digunakan dalam analisis indeks understeer:

Tabel 5.1 Tabel Rumus Analisis Kestabilan

No.	Parameter		Notasi	Rumus
1.	Radius Ackerman		R_{ack}	$R_{ack} = \frac{a+b}{\delta_f} \cdot 57,29$
2.	Sudut Side Slip		β	$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{b}{R_{ack}} \right)$
3.	Gaya Sentrifugal		F_c	$F_c = \frac{W}{g} \cdot \frac{V^2}{R_{ack}}$
4.	Gaya Sentrifugal	Sumbu X	F_c^X	$F_{c^x} = F_c \cdot \sin \beta$
		Sumbu Y	F_c^Y	$F_{c^y} = F_c \cdot \cos \beta$
5.	Gaya Hambat Aerodinamik		R_a	$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_a^2$
6.	Gaya Hambat Rolling		R_r	$R_r = fr \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta$
7.	Gaya Hambat Tanjakan		R_g	$R_g = m \cdot g \cdot \cos \theta$
8.	Gaya Berat Kendaraan	Depan	W_f	$W_f = \frac{b}{a+b} \cdot W$
		Belakang	W_r	$W_r = \frac{a}{a+b} \cdot W$
9.	Gaya Gesek	Depan	F_{gf}	$F_{gf} = \frac{fr}{a+b} \cdot (b \cdot W + F_c \sin \beta \cdot h - R_a \cdot h)$
		Belakang	F_{gr}	$F_{gr} = \frac{fr}{a+b} \cdot (b \cdot W - F_c \sin \beta \cdot h + R_a \cdot h)$
10.	Gaya Dorong (Traksi)	Belakang	F_{t1}	$F_{t1} = \frac{\tau_1}{r}$
		Depan	F_{t2-3}	$F_{t2.3} = \frac{\tau_2}{r}$
11.	Gaya Normal	Roda 1	F_{z1}	$F_{z1} = W_f$
		Roda 2	F_{z2}	$F_{z2} = \frac{1}{2} \cdot W_r$
		Roda 3	F_{z3}	$F_{z3} = \frac{1}{2} \cdot W_r$
12.		Roda 1	F_{y1}	$F_{y1} = \frac{a}{2 \cdot (a+b)} \cdot F_{c^y}$

	Gaya Lateral	Roda 2-3	F_{y2-3}	$F_{y2.3} = \frac{b}{2 \cdot (a + b)} \cdot F_{c^y} \cos \delta_f + \frac{b}{2 \cdot (a + b)} \cdot (F_{c^x} - R_a) \cdot \sin \delta_f$
13.	Gaya Longitudinal	Roda 1	F_{x1}	$F_{x1} = \frac{a}{2 \cdot (a + b)} \cdot (F_{c^x} - R_r)$
		Roda 2-3	F_{x2-3}	$F_{x2.3} = \frac{b}{2 \cdot (a + b)} \cdot (F_{c^y} - R_a) \cos \delta_f - \frac{b}{2 \cdot (a + b)} F_{c^y} \sin \delta_f - R_r$
14.	Momen Angguk (Pitching)	Roda 1	M_{p1}	$M_{p1} = (F_{c^x} - R_a) \cdot h + F_z \cdot b$
		Roda 2-3	M_{p2-3}	$M_{p2.3} = (F_{c^x} - R_a) \cdot h - F_z \cdot b$
15.	Momen Guling (Rolling)	Roda 2	M_{R2}	$M_{R2} = -F_{c^y} \cdot h + F_z \cdot \frac{t_f}{2}$
		Roda 3	M_{R3}	$M_{R3} = F_{c^y} \cdot h + F_z \cdot \frac{t_f}{2}$
16.	Momen Putar (Yawing)	Roda 2	M_{y2}	$M_{y2} = F_{c^y} \cdot a - F_z \cdot \frac{t_f}{2} + R_a \cdot \frac{t_f}{2}$
		Roda 3	M_{y3}	$M_{y3} = -F_{c^y} \cdot a - F_z \cdot \frac{t_f}{2} + R_a \cdot \frac{t_f}{2}$
17.	Sudut Slip	Depan	α_f	$\alpha_{bb.f} = \frac{C_{bp}}{C_{bs}} \cdot \frac{C_{bx}}{C_{bo}} [0,052817(F_y \alpha)^{0,90635} - 0,004633(F_z)]$
		Belakang	α_r	$\alpha_{bb.r} = \frac{C_{bp}}{C_{bs}} \cdot \frac{C_{bx}}{C_{bo}} [0,052817(F_y \alpha)^{0,90635} - 0,004633(F_z)]$
18.	Koefisien tekanan ban yang terjadi		C_{bp}	$C_{bp} = 26,4 + 4,32(P) - 0,0674(P)^2$
19.	Koefisien tekanan ban standar		C_{bs}	$C_{bs} = 26,4 + 4,32(P_s) - 0,0674(P_s)^2$
20.	Koefisien gaya traksi dan pengereman		C_{bx}	$C_{bx} = \left[\frac{F_y \alpha + 0,125403 \cdot (F_x)}{109,556} \right]^{\frac{1}{0,58677}}$
			C_{bo}	$C_{bo} = \left[\frac{F_y \alpha}{109,556} \right]^{\frac{1}{0,58677}}$
21.	Radius nyata		R_n	$R_n = \frac{a + b}{\delta_f + \alpha_r - \alpha_f} \cdot 57,29$
22.	Indeks understeer		K_{us}	$K_{us} = \frac{g \cdot R_n}{V^2} (\alpha_f - \alpha_r)$

5.1.1. Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kendaraan

Dengan menggunakan rumus-rumus pada tabel 5.1 dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai indeks understeer (K_{us}) pada setiap sudut belok (δ_f) dan kecepatan. Hasil perhitungan disajikan dalam tabel dibawah dan proses perhitungan kestabilan kendaraan dapat dilihat pada lampiran 7.

a. Pada kecepatan 5 km/jam

Tabel 5.2 Tabel Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kecepatan 5 km/jam

No.	Parameter	Posisi	Notasi	Satuan	Harga			
1	Sudut Belok	-	δ_f	deg	10	15	20	25
2	Sudut Belok Roda Kanan	-	δ_{fR}	deg	9,66	14,25	18,71	23,06
3	Sudut Belok Roda Kiri	-	δ_{fL}	deg	10,37	15,83	21,47	27,27
4	Sudut Side Slip	-	β	deg	3,98	5,97	7,98	10
5	Radius Ackerman	-	R_{ack}	m	5,95	3,97	2,98	2,38
6	Gaya Sentrifugal	-	F_c	N	33,86	50,79	67,72	84,66
7	Resultan Gaya Sentrifugal	Sumbu X	F_c^X	N	2,35	5,29	9,40	14,68
8		Sumbu Y	F_c^Y	N	33,78	50,52	67,07	83,37
9	Gaya Berat Kendaraan	Depan	W_f	N	407,35			
		Belakang	W_r	N	617,44			
10	Gaya Gesek	Depan	F_{gf}	N	1,63	1,64	1,65	1,66
		Belakang	F_{gr}	N	1,63	1,62	1,61	1,60
11	Gaya Dorong (Traksi)	Belakang	F_{t1}	N	187,19			
		Depan	$F_{t2,3}$	N	112,32			
12	Gaya Hambat Aerodinamik	-	R_a	N	2,61			
13	Gaya Hambat Rolling	-	R_r	N	4,1			
14	Gaya Hambat Tanjakan	-	R_g	N	30,65			
15	Gaya Longitudinal	Roda 1	F_{x1}	N	-4,17	-3,29	-2,05	-0,46
		Roda 2-3	$F_{x2,3}$	N	0,84	2,50	3,38	3,45
16	Gaya Lateral	Roda 1	F_{y1}	N	10,18	15,22	20,20	25,12
		Roda 2-3	$F_{y2,3}$	N	6,60	9,84	12,99	16,03
17	Gaya Normal	Roda 1	F_{z1}	N	617,44			
		Roda 2	F_{z2}	N	203,68			

		Roda 3	F_{z3}	N	203,68			
18	Momen Angguk (Pitching)	Roda 1	M_{p1}	Nm	-0,17	1,78	4,52	8,03
		Roda 2-3	$M_{p2,3}$	Nm	-0,17	1,78	4,52	8,03
19	Momen Guling (Rolling)	Roda 2	M_{R2}	Nm	153,67	97,61	86,61	75,76
		Roda 3	M_{R3}	Nm	108,74	164,8	175,81	186,65
20	Momen Putar (Yawing)	Roda 2	M_{y2}	Nm	21,20	32,19	-40,54	-49,62
		Roda 3	M_{y3}	Nm	-21,09	-31,05	43,43	54,76
21	Sudut Slip	Depan	α_f	deg	-1,04	-0,96	-0,88	-0,80
		Belakang	α_r	deg	-1,58	-1,46	-1,34	-1,22
22	Radius Nyata	-	R_n	m	6,29	4,11	3,05	2,42
23	Indeks Understeer	-	K_{us}	-	17,24	10,43	7,12	5,16

b. Pada kecepatan 10 km/jam

Tabel 5.3 Tabel Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kecepatan 10 km/jam

No.	Parameter	Posisi	Notasi	Satuan	Harga			
1	Sudut Belok	-	δ_f	deg	10	15	20	25
2	Sudut Belok Roda Kanan	-	δ_{fR}	deg	9,66	14,25	18,71	23,06
3	Sudut Belok Roda Kiri	-	δ_{fL}	deg	10,37	15,83	21,47	27,27
4	Sudut Side Slip	-	β	deg	3,98	5,97	7,98	10
5	Radius Ackerman	-	R_{ack}	m	5,95	3,97	2,98	2,38
6	Gaya Sentrifugal	-	F_c	N	135,45	203,17	270,90	338,62
7	Resultan Gaya Sentrifugal	Sumbu X	F_c^X	N	9,4	21,14	37,59	58,73
8		Sumbu Y	F_c^Y	N	135,12	202,07	268,28	333,49
9	Gaya Berat Kendaraan	Depan	W_f	N	407,35			
		Belakang	W_r	N	617,44			
10	Gaya Gesek	Depan	F_{gf}	N	1,65	1,68	1,72	1,77
		Belakang	F_{gr}	N	1,61	1,58	1,54	1,49
11	Gaya Dorong (Traksi)	Belakang	F_{t1}	N	187,19			
		Depan	$F_{t2,3}$	N	112,32			
12	Gaya Hambat Aerodinamik	-	R_a	N	2,61			
13	Gaya Hambat Rolling	-	R_r	N	4,1			

14	Gaya Hambat Tanjakan	-	R_g	N	30,65			
15	Gaya Longitudinal	Roda 1	F_{x1}	N	-2,05	1,49	6,44	12,81
		Roda 2-3	$F_{x2,3}$	N	17,18	23,80	27,28	27,49
16	Gaya Lateral	Roda 1	F_{y1}	N	40,71	60,87	80,82	100,46
		Roda 2-3	$F_{y2,3}$	N	26,68	39,75	52,48	64,78
17	Gaya Normal	Roda 1	F_{z1}	N	617,44			
		Roda 2	F_{z2}	N	203,68			
		Roda 3	F_{z3}	N	203,68			
18	Momen Angguk (Pitching)	Roda 1	M_{p1}	Nm	4,52	12,33	23,26	37,32
		Roda 2-3	$M_{p2,3}$	Nm	4,52	12,33	23,26	37,32
19	Momen Guling (Rolling)	Roda 2	M_{R2}	Nm	221,06	265,58	309,61	352,98
		Roda 3	M_{R3}	Nm	41,35	-3,17	-47,20	-90,56
20	Momen Putar (Yawing)	Roda 2	M_{y2}	Nm	86,03	130,43	175,37	220,69
		Roda 3	M_{y3}	Nm	-83,14	-122,56	-160,51	-196,84
21	Sudut Slip	Depan	α_f	deg	-0,62	-0,29	0,02	0,31
		Belakang	α_r	deg	-0,83	-0,44	-0,02	0,43
22	Radius Nyata	-	R_n	m	6,08	4,01	2,98	2,37
23	Indeks Understeer	-	K_{us}	-	1,623	0,765	0,152	-0,362

c. Pada kecepatan 15 km/jam

Tabel 5.4 Tabel Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kecepatan 15 km/jam

No.	Parameter	Posisi	Notasi	Satuan	Harga			
1	Sudut Belok	-	δ_f	deg	10	15	20	25
2	Sudut Belok Roda Kanan	-	δ_{fR}	deg	9,66	14,25	18,71	23,06
3	Sudut Belok Roda Kiri	-	δ_{fL}	deg	10,37	15,83	21,47	27,27
4	Sudut Side Slip	-	β	deg	3,98	5,97	7,98	10
5	Radius Ackerman	-	R_{ack}	m	5,95	3,97	2,98	2,38
6	Gaya Sentrifugal	-	F_c	N	304,76	457,14	609,52	761,90
7	Resultan Gaya Sentrifugal	Sumbu X	F_c^X	N	21,14	47,57	84,57	132,14
8		Sumbu Y	F_c^Y	N	304,02	454,66	603,62	750,35
9	Gaya Berat Kendaraan	Depan	W_f	N	407,35			
		Belakang	W_r	N	617,44			
10	Gaya Gesek	Depan	F_{gf}	N	1,68	1,74	1,84	1,96

		Belakang	F_{gr}	N	1,58	1,51	1,42	1,30
11	Gaya Dorong (Traksi)	Belakang	F_{t1}	N	187,19			
		Depan	$F_{t2,3}$	N	112,32			
12	Gaya Hambat Aerodinamik	-	R_a	N	2,61			
13	Gaya Hambat Rolling	-	R_r	N	4,1			
14	Gaya Hambat Tanjakan	-	R_g	N	30,65			
15	Gaya Longitudinal	Roda 1	F_{x1}	N	1,49	9,45	20,59	34,93
		Roda 2-3	$F_{x2,3}$	N	44,41	59,30	67,12	67,57
16	Gaya Lateral	Roda 1	F_{y1}	N	91,59	136,97	181,84	226,04
		Roda 2-3	$F_{y2,3}$	N	60,15	89,60	118,31	146,04
17	Gaya Normal	Roda 1	F_{z1}	N	617,44			
		Roda 2	F_{z2}	N	203,68			
		Roda 3	F_{z3}	N	203,68			
18	Momen Angguk (Pitching)	Roda 1	M_{p1}	Nm	12,33	29,9	54,51	86,14
		Roda 2-3	$M_{p2,3}$	Nm	12,33	29,90	54,51	86,14
19	Momen Guling (Rolling)	Roda 2	M_{R2}	Nm	333,38	433,55	532,61	630,19
		Roda 3	M_{R3}	Nm	-70,97	-171,14	-270,20	-367,78
20	Momen Putar (Yawing)	Roda 2	M_{y2}	Nm	194,26	294,17	395,28	497,25
		Roda 3	M_{y3}	Nm	-186,38	-275,06	-360,45	-442,19
21	Sudut Slip	Depan	α_f	deg	0,21	0,91	1,54	2,12
		Belakang	α_r	deg	0,20	1,12	2,03	2,91
22	Radius Nyata	-	R_n	m	5,96	3,91	3,05	2,31
23	Indeks Understeer	-	K_{us}	-	0,034	-0,464	-0,844	-1,031

d. Pada kecepatan 20 km/jam

Tabel 5.5 Tabel Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kecepatan 20 km/jam

No.	Parameter	Posisi	Notasi	Satuan	Harga			
1	Sudut Belok	-	δ_f	deg	10	15	20	25
2	Sudut Belok Roda Kanan	-	δ_{fR}	deg	9,66	14,25	18,71	23,06
3	Sudut Belok Roda Kiri	-	δ_{fL}	deg	10,37	15,83	21,47	27,27
4	Sudut Side Slip	-	β	deg	3,98	5,97	7,98	10
5	Radius Ackerman	-	R_{ack}	m	5,95	3,97	2,98	2,38

6	Gaya Sentrifugal	-	F_c	N	541,79	812,69	1083,59	1354,48
7	Resultan Gaya Sentrifugal	Sumbu X	F_c^X	N	37,59	84,57	150,35	234,92
8		Sumbu Y	F_c^Y	N	540,49	808,28	1073,10	1333,95
9	Gaya Berat Kendaraan	Depan	W_f	N	407,35			
		Belakang	W_r	N	617,44			
10	Gaya Gesek	Depan	F_{gf}	N	1,72	1,84	2,01	2,22
		Belakang	F_{gr}	N	1,54	1,42	1,25	1,03
11	Gaya Dorong (Traksi)	Belakang	F_{t1}	N	187,19			
		Depan	$F_{t2,3}$	N	112,32			
12	Gaya Hambat Aerodinamik	-	R_a	N	2,61			
13	Gaya Hambat Rolling	-	R_r	N	4,1			
14	Gaya Hambat Tanjakan	-	R_g	N	30,65			
15	Gaya Longitudinal	Roda 1	F_{x1}	N	6,44	20,59	40,41	65,89
		Roda 2-3	$F_{x2,3}$	N	82,53	108,99	122,89	123,67
16	Gaya Lateral	Roda 1	F_{y1}	N	162,82	243,49	323,27	401,86
		Roda 2-3	$F_{y2,3}$	N	107	159,39	210,46	259,80
17	Gaya Normal	Roda 1	F_{z1}	N	617,44			
		Roda 2	F_{z2}	N	203,68			
		Roda 3	F_{z3}	N	203,68			
18	Momen Angguk (Pitching)	Roda 1	M_{p1}	Nm	23,26	54,51	98,25	154,49
		Roda 2-3	$M_{p2,3}$	Nm	23,26	54,51	98,25	154,49
19	Momen Guling (Rolling)	Roda 2	M_{R2}	Nm	490,63	668,71	844,82	1018,29
		Roda 3	M_{R3}	Nm	-228,22	-406,30	-582,4	-755,87
20	Momen Putar (Yawing)	Roda 2	M_{y2}	Nm	345,78	523,40	703,16	884,42
		Roda 3	M_{y3}	Nm	-330,91	-488,56	-640,37	-785,69
21	Sudut Slip	Depan	α_f	deg	1,34	2,52	3,56	4,50
		Belakang	α_r	deg	1,63	3,20	4,74	6,23
22	Radius Nyata	-	R_n	m	5,79	3,80	2,81	2,23
23	Indeks Understeer	-	K_{us}	-	-0,534	-0,821	-1,054	-1,226

5.1.2. Analisis Hasil Perhitungan Kestabilan pada Kendaraan

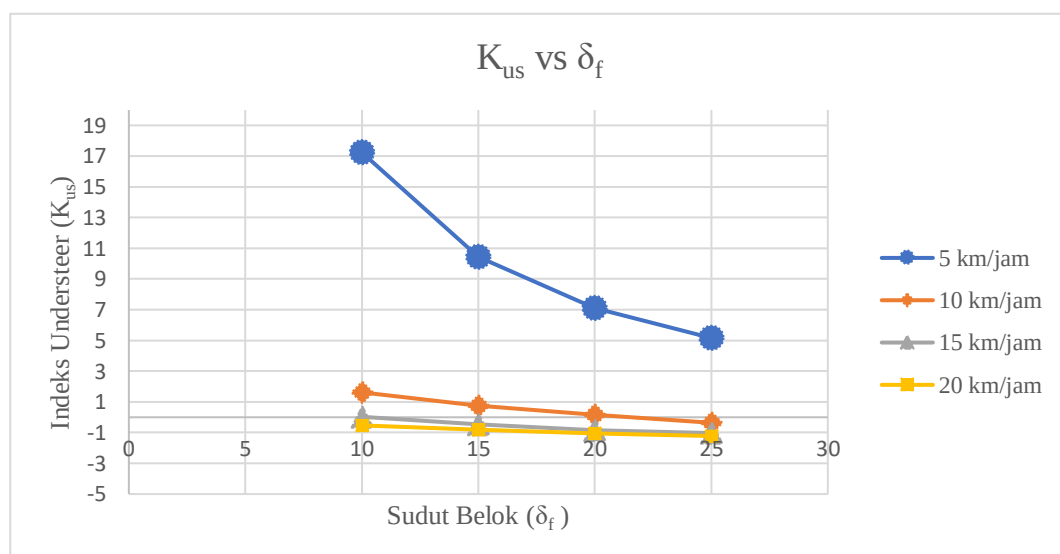
Proses perhitungan analitis menghasilkan nilai indeks understeer dengan empat variasi kecepatan dan sudut belok kendaraan.

Berikut tabel data hasil perhitungan:

Tabel 5.6 Tabel Hasil Perhitungan Nilai Indeks Understeer

No.	Kecapatan (V)	Sudut Belok (δ_f)	Indeks Understeer (K_{us})
1	5 km/jam	10°	17,24
		15°	10,43
		20°	7,12
		25°	5,16
2	10 km/jam	10°	1,62
		15°	0,76
		20°	0,15
		25°	-0,36
3	15 km/jam	10°	0,03
		15°	-0,46
		20°	-0,84
		25°	-1,03
4	20 km/jam	10°	-0,53
		15°	-0,82
		20°	-1,05
		25	-1,22

Kemudian untuk memudahkan pembacaan dan proses analisis data hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 5.3.



Gambar 5.3 Grafik hasil perhitungan indeks understeer terhadap sudut belok

Pada grafik diatas menunjukan hubungan antara nilai indeks understeer dengan sudut belok pada kendaraan. Secara umum grafik kecepatan menunjukan penurunan nilai indeks understeer seiring dengan bertambahnya nilai sudut belok. Penurunan nilai indeks understeer tersebut menggambarkan bahwa kestabilan kendaraan menurun atau berkurang karena dipengaruhi oleh sudut slip pada roda depan dan belakang.

Pada kecepatan 5 km/jam dengan sudut belok 10° , 15° , 20° , dan 25° memiliki nilai indeks understeer positif dengan nilai yang cukup besar yaitu 17,24; 10,43; 7,12; dan 5,16. Dengan nilai indeks understeer positif membuat kendaraan dalam keadaan understeer. Kondisi understeer disebabkan oleh besar sudut slip roda depan (α_f) lebih besar dibandingkan besar sudut slip roda belakang (α_r) sehingga mengakibatkan kendaraan *understeer*. Akibat kondisi *understeer* tersebut radius belok nyata (R_n) kendaraan menjadi lebih besar dibandingkan dengan radius ideal (*ackerman*). Kondisi *understeer* kendaraan masih dapat dikendalikan oleh pengemudi dengan memberikan sudut belok yang lebih besar.

Pada kecepatan 10 km/jam dengan sudut belok 15° dan 20° dan kecepatan 15 km/jam dengan sudut belok 10° memiliki nilai indeks understeer positif yaitu 0,76; 0,15; dan 0,03. Nilai tersebut mendekati nilai nol artinya besar sudut slip roda depan (α_f) dan belakang (α_r) hampir memiliki nilai yang sama sehingga dapat saling menghilangkan. Kondisi tersebut menyebabkan kendaraan memiliki kondisi cenderung netral. Selain itu terdapat pergeseran posisi titik pusat belok kendaraan, sehingga titik pusat belok netral berbeda dengan titik pusat belok ackerman.

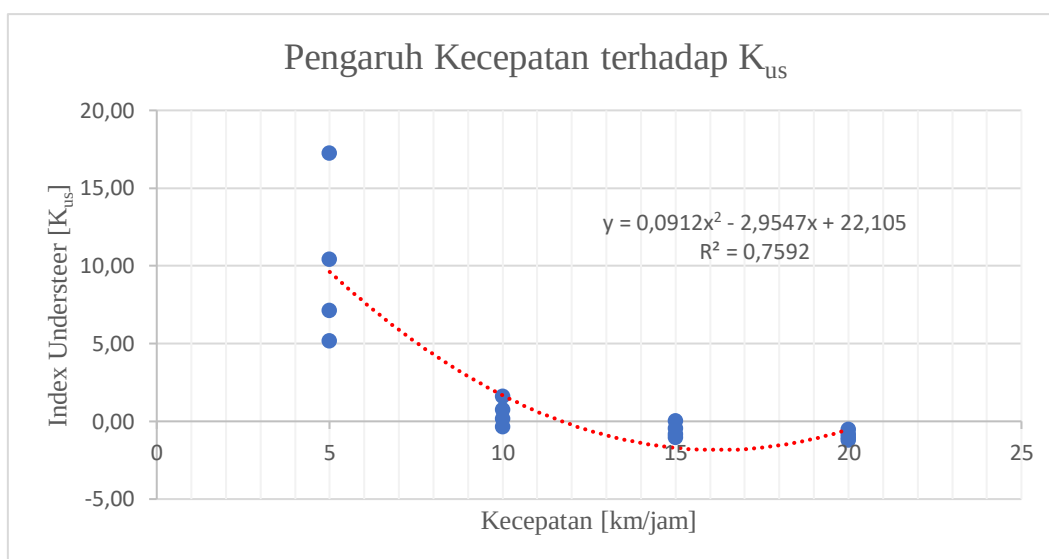
Pada kecepatan 15 km/jam dengan sudut belok 15° , 20° , 25° dan kecepatan 20 km/jam dengan sudut belok 10° , 15° , 20° , dan 25° memiliki nilai indeks understeer negatif yaitu -0,46; -0,84; -1,03; -0,53; -0,82; -1,05; dan -1,22. Nilai negatif tersebut disebabkan oleh besar sudut slip roda belakang (α_r) lebih besar dibandingkan besar sudut slip roda depan (α_f) sehingga mengakibatkan kendaraan *oversteer*. Kemudian nilai negatif pada grafik semakin besar seiring bertambahnya sudut belok. Artinya semakin besar sudut belok pada kecepatan 15 km/jam dan 20 km/jam, kendaraan akan semakin *oversteer*. Selain dari sudut slip pada roda, kondisi *oversteer* juga diakibatkan oleh gaya sentrifugal (F_c) pada roda lebih besar

dibandingkan gaya gesek roda (F_g) dengan permukaan jalan. Karena gaya sentrifugal (F_c) yang besar, mengakibatkan gaya lateral (F_y) pada roda semakin besar sehingga sudut slip pada roda menjadi besar dan menyebabkan *oversteer*. Kondisi *oversteer* tersebut membuat radius belok nyata (R_n) kendaraan menjadi lebih kecil dibandingkan radius ideal (*ackerman*). Kemudian kondisi *oversteer* ini membuat kendaraan sulit dikendalikan oleh pengemudi dan kondisi kendaraan yang terlampaui *oversteer* akan mengakibatkan “*lost of control*” dimana pengemudi sudah tidak mampu mengendalikan kendaraan dan menyebabkan kecelakaan.

Berdasarkan grafik dan hasil analisis diatas dapat disimpulkan bahwa kecepatan yang paling aman pada saat berbelok untuk kendaraan ini adalah 5 km/jam dan 10 km/jam dengan sudut belok maksimal 25° dan 15 km/jam dengan sudut belok maksimal 15° . Jika kecepatan lebih dari 10 km/jam, maka kendaraan akan sulit dikendalikan dan dapat menyebabkan kecelakaan.

5.1.3. Analisis Kecenderungan Data Hasil Perhitungan

Analisis kecenderungan data (*trendline*) ini dilakukan dengan tujuan untuk memprediksi atau menguji pengaruh kecepatan terhadap nilai indeks understeer dan pengaruh sudut belok terhadap nilai indeks understeer dari keseluruhan data yang dilakukan sebelumnya pada tabel 5.6.



Gambar 5.4 Grafik pengaruh kecepatan terhadap nilai indeks understeer

Berdasarkan gambar 5.4 diatas didapatkan *trendline* polynomial. *Trendline* polynomial ini digunakan berdasarkan rumus indeks understeer pada persamaan 2.52 yang merupakan persamaan kuadrat. Adapun variabel bebas (x) adalah kecepatan dan variabel terikat (y) adalah nilai indeks understeer.

Pada grafik tersebut *trendline* nilai indeks understeer menurun bersamaan dengan bertambahnya nilai kecepatan kemudian kembali naik setelah 20 km/jam. Dari garis *trendline* tersebut didapatkan persamaan $y = 0,0912x^2 - 2,9547x + 22,105$. Kemudian dari persamaan tersebut dapat memprediksi besar kecepatan agar kendaraan dalam keadaan stabil (keadaan netral). Untuk mendapatkan besar kecepatan dapat diselesaikan dengan menggunakan rumus persamaan kuadrat berikut:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Dengan menggunakan rumus diatas maka didapatkan nilai x_1 dan x_2 dimana $a = 0,0912$; $b = -2,9547$ dan $c = 22,105$. Nilai x_1 dan x_2 ini merepresentasikan besar kecepatan yang diperbolehkan agar kendaraan dalam keadaan netral.

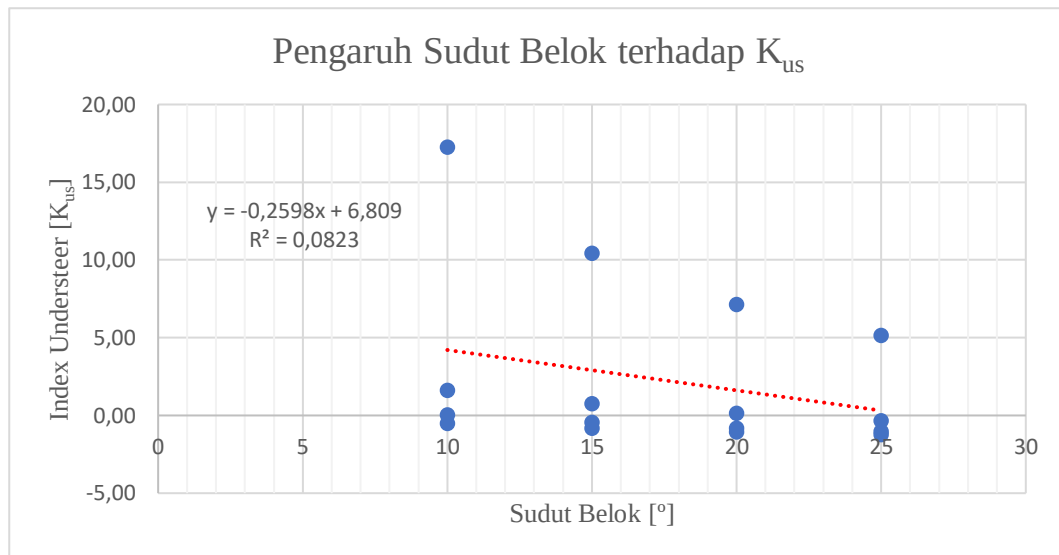
Setelah itu dilakukan proses perhitungan dibawah ini:

$$x_{1,2} = \frac{-(-2,9547) \pm \sqrt{(-2,9547)^2 - 4 \cdot (0,0912) \cdot (22,105)}}{2 \cdot (0,0912)}$$

$$x_1 = 20,67 \quad x_2 = 11,72$$

Dari proses perhitungan didapatkan hasil $x_1 = 20,67$ dan $x_2 = 11,72$. Sehingga didapatkan bahwa kecepatan maksimum agar kendaraan dalam keadaan netral adalah 11 sampai 20 km/jam. Selain itu juga diperoleh nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0,7592 yang mengandung arti bahwa pengaruh kecepatan terhadap nilai indeks understeer sebesar 75,9% dan sisanya 24,1% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti.

Selain menganalisis pengaruh kecepatan terhadap nilai indeks understeer juga dilakukan analisis data pengaruh sudut belok terhadap nilai indeks understeer yang dapat dilihat pada gambar 5.5.



Gambar 5.5 Grafik pengaruh sudut belok terhadap nilai *indeks understeer*

Berdasarkan gambar 5.5 didapatkan *trendline* linier. *Trendline* linier digunakan berdasarkan rumus indeks understeer pada persamaan 2.52 yang merupakan persamaan garis. Variabel bebas (x) dari grafik tersebut adalah sudut belok dan variabel terikatnya (y) adalah nilai indeks understeer.

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* nilai indeks understeer semakin menurun bersamaan dengan bertambahnya sudut belok. Dari *trendline* tersebut didapatkan persamaan $y = -0,2598x + 6,809$. Persamaan tersebut dapat memprediksi besar sudut belok agar kendaraan dalam keadaan netral yaitu dengan mengeluarkan nilai x. Untuk mendapatkan nilai x dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$x = \frac{y - 6,809}{-0,2598} = \frac{0 - 6,809}{-0,2598} = 26,20$$

Berdasarkan proses perhitungan didapatkan nilai $x = 26,20$. Sehingga dapat diprediksi agar kendaraan dalam keadaan netral maka sudut belok maksimal yang diperbolehkan adalah 26° . Selanjutnya dengan memasukan nilai sudut belok 26° dan jarak titik berat pada rumus radius *ackerman*, maka besar radius *ackerman* (R_{ack}) yang dihasilkan adalah 2,29 meter.

Selain itu pada gambar 5.5 diperoleh nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0,082 yang mengandung arti bahwa pengaruh sudut belok terhadap nilai indeks understeer sebesar 8,2%. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh kecepatan terhadap nilai indeks understeer.

5.2. Analisis Statis Rangka

Analisis statis (*static analysis*) dilakukan untuk mengetahui kekuatan dan keamanan dari sebuah produk dengan pendekatan statis dan memberikan informasi bagian-bagian yang kritis sebelum diproduksi. Analisis statis menggunakan *software Solidworks 2018 Simulation* dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA).

Rangka merupakan komponen yang menopang seluruh bagian pada kendaraan. Sehingga konstruksi rangka harus dapat dipastikan kuat dan aman digunakan. Untuk menganalisis rangka, sebelumnya harus mendefinisikan material yang digunakan, beban-beban yang terjadi pada rangka dan letak tumpuan. Dalam kasus ini kondisi dan kualitas pengelasan (sambungan) dianggap rigid dan baik.

Pembebanan pada sepeda umumnya terjadi pada tiga bagian, yaitu *saddle*, *handlebar*, dan pedal (Sunardi, 2017). Penentuan besar gaya pada masing-masing bagian ini menggunakan pendekatan berat pengendara secara umum, baik pengendara pria maupun wanita.

Menurut Berlianto dan Daryanto (2012), jika berat pengendara 65 kilogram, maka beban yang diterima pada masing-masing bagian adalah sebagai berikut:

Tabel 5.7 Besar Pembebanan pada Rangka

No.	Letak Pembebanan	Besar Pembebanan [N]	
1.	Tangan	F_1^x	25,006
		F_1^y	72,162
2.	Badan	F_2^x	26,359
		F_2^y	346,779
3.	Kaki	F_3^x	11,446
		F_3^y	72,162

Material yang digunakan pada rangka ini adalah 1.0037 (S235JR). Material 1.0037 merupakan salah satu jenis baja struktural yang memiliki kekuatan tarik 370 N/mm².

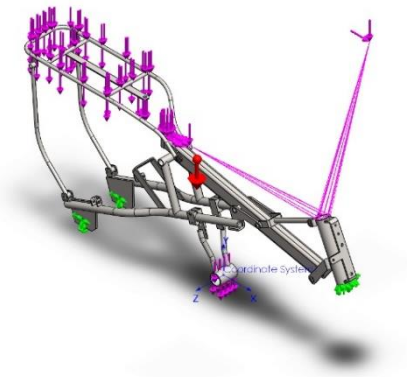
Tabel 5.8 Sifat Material 1.0037 (S235JR)

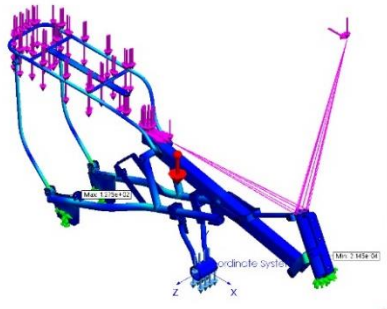
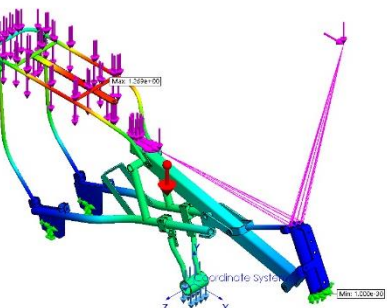
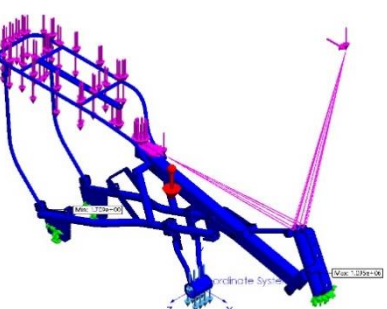
Sifat Fisik	<i>Density</i>	7850 kg/m ³
Sifat Mekanik	<i>Ultimate Strength (Rm)</i>	340-470 MPa
	<i>Yield Strength (Re)</i>	235 MPa
	<i>Modulus of Elasticity</i>	200 GPa
	<i>Shear Modulus</i>	80 GPa
Sifat Elektrik	<i>Electrical Resistivity</i>	0,0000170 ohm-cm
Sifat Termal	<i>Specific Heat Capacity</i>	0.470 j/g-°C
	<i>Thermal Conductivity</i>	52 W/m-K
Komponen Penyusun	<i>Carbon</i>	≤0,20 %

Sumber: <http://www.matweb.com/>

Berikut hasil simulasi tegangan *von mises*, defleksi, dan *safety factor* pada rangka dengan menggunakan *software Solidworks 2018*:

Tabel 5.9 Tabel Tampilan Hasil Simulasi Rangka

Parameter	Hasil Simulasi	
Gaya-gaya yang terjadi		<u>Gaya pada tangan:</u> • F_1^x: 25 N • F_1^y: 72 N <u>Gaya pada badan:</u> • F_2^x: 26,3 N • F_2^y: 346,7 N <u>Gaya pada kaki:</u> • F_3: 73 N <u>Gaya-gaya tambahan:</u> • F_{baterai}: 35 N • $F_{\text{penumpang}}$: 250 N Catatan: Gaya pada <i>handlebar</i> dibagi menjadi dua (kanan dan kiri)

Tegangan <i>Von mises</i>		• Tegangan Maksimum: $137.5 \frac{N}{mm^2}$ (Node 343109) • Tegangan Minimum: $0.0002 \frac{N}{mm^2}$ (Node 71091)
Defleksi		• Defleksi Maksimum: 1.269 mm (Node 340811) • Defleksi Minimum: 0 mm (Node 4815)
Faktor Keamanan		• SF Maksimum: 1.095×10^6 (Node 71091) • SF Minimum: 1.709 (Node 343109)

Berdasarkan hasil simulasi tegangan *von mises*, tegangan maksimum yang terjadi pada rangka adalah $137,5 \text{ N/m}^2$ dan tegangan minimum yang terjadi pada rangka adalah $0,0002 \text{ N/m}^2$. Nilai tegangan maksimum yang terjadi berada dibawah kekuatan luluh (*yield strength*) dari material S235JR yaitu 235 N/m^2 . Data hasil simulasi rangka selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 8.

Menurut teori energi distorsi maksimum (*von mises*), kegagalan pada komponen akan terjadi ketika nilai tegangan *von mises* maksimum lebih besar dibandingkan kekuatan luluh dari material. Jika ditinjau dari teori energi distorsi maksimum maka tidak akan terjadi kegagalan pada rangka.

Letak tegangan *von mises* yang terjadi pada rangka berada pada alur dudukan pelat roda, sehingga resiko yang mungkin terjadi jika terus menerima beban adalah keausan pada komponen.

Nilai faktor keamanan minimum yang terjadi pada rangka adalah 1,709 yang terletak pada alur dudukan pelat roda. Nilai faktor keamanan minimum yang terjadi pada rangka lebih kecil dari minimum beban dinamis yaitu 2,0. Sehingga nilai faktor keamanan konstruksi rangka dalam keadaan kritis. Alternatif solusi yang dapat dilakukan untuk memastikan konstruksi rangka aman digunakan dengan menambah ketebalan pada dudukan pelat roda yang sebelumnya 5 mm menjadi lebih dari 5 mm atau mengganti material komponen dengan grade yang lebih tinggi seperti S275JR atau E295.

5.3. Pengujian

Pengujian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perilaku dan kondisi kendaraan pada saat belok serta parameter pengoperasian sepeda. Metode pengujian ini menggunakan metode uji jalan dengan radius belok tetap. Media yang digunakan dalam pengujian ini adalah dua jenis sepeda roda tiga yang digunakan untuk praktikum mata kuliah kinematika dan mekanisme. Dua jenis sepeda ini terdapat perbedaan konfigurasi yaitu pada lebar roda depan, ukuran roda depan, dan berat bagian depan. Sehingga purwarupa untuk pengujian dengan purwarupa akhir rancang bangun merupakan dua hal yang berbeda.

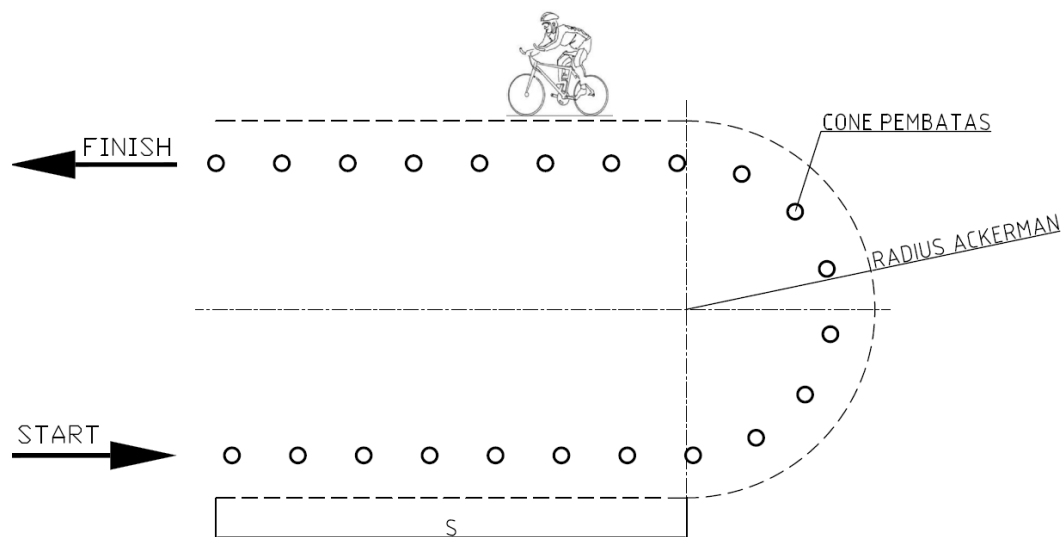


Gambar 5.6 Sepeda roda tiga konfigurasi 1



Gambar 5.7 Sepeda roda tiga konfigurasi 2

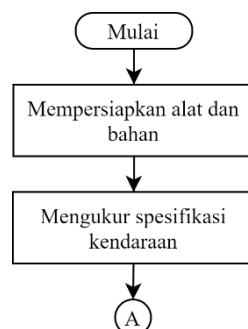
Lintasan pengujian yang dilakukan menggunakan Lintasan *U-Turn* seperti pada gambar 5.8. Lintasan ini memungkinkan untuk mengetahui kondisi kendaraan pada saat berbelok dan setelah berbelok apakah masih dalam keadaan stabil atau tidak stabil (slip, terguling, atau terjatuh). Dengan menggunakan lintasan ini pengendara mengayuh sepeda sepanjang jarak s dengan kecepatan yang telah ditentukan. Jarak s ditentukan untuk menyetabilkan kecepatan, kemudian sepeda berbelok sesuai radius *ackerman* lalu melanjutkan mengayuh hingga akhir lintasan. Pengujian dilakukan dilapangan terbuka dengan memperhitungkan panjang dan lebar lintasan uji.

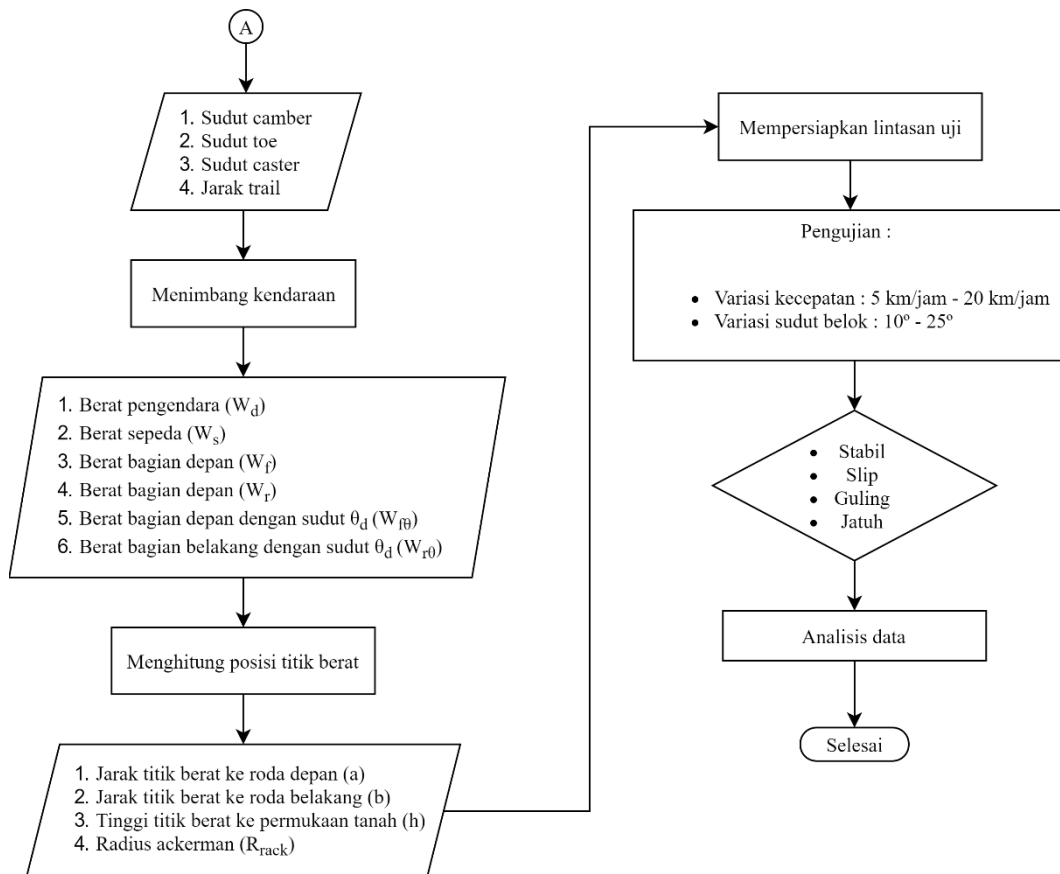


Gambar 5.8 Lintasan uji *U-Turn*

5.3.1. Skenario Pengujian

Skenario pengujian dibuat dengan tujuan untuk memandu jalannya pengujian agar dapat terarah dan mendapatkan hasil yang diharapkan. Skenario dan proses pengujian selengkapnya dapat dilihat pada gambar 5.9 dan lampiran 9.





Gambar 5.9 Diagram alir skenario pengujian

5.3.2. Hasil dan Analisis Pengujian

Mengacu pada skenario pengujian terdapat dua hasil, yaitu hasil pengukuran spesifikasi sepeda dan hasil pengujian yang disajikan dalam bentuk grafik dengan parameter sudut belok (δ_f) dan nilai kondisi dari 1 sampai dengan 4 pada masing-masing sepeda.

a. Hasil Pengukuran Sepeda

Proses pengukuran spesifikasi dilakukan secara manual menggunakan alat ukur yang telah disiapkan sebelumnya. Hasil pengukuran disajikan dalam tabel untuk melihat perbedaan spesifikasi dari dua jenis konfigurasi sepeda roda tiga dengan spesifikasi tertentu. Hasil pengukuran ini sangat berpengaruh terhadap hasil pengujian dilapangan.

Berikut tabel hasil pengukuran dua jenis konfigurasi sepeda roda tiga:

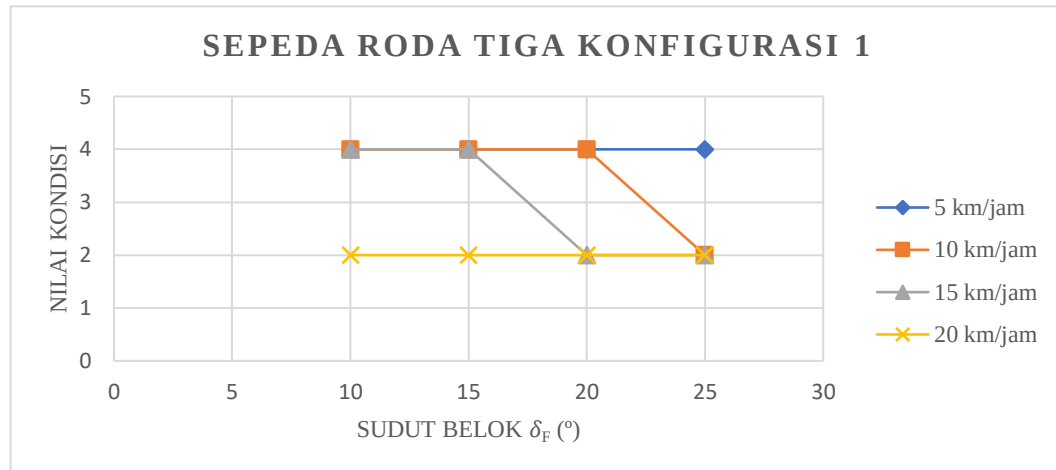
Tabel 5.10 Tabel Hasil Pengukuran Sepeda

No.	Spesifikasi	Notasi	Hasil Pengukuran	
			Konfigurasi 1	Konfigurasi 2
1.	<i>Wheelbase</i>	L	1090 mm	1225 mm
2.	<i>Wheeltrack</i>	tf	425 mm	735 mm
3.	Ukuran Roda Belakang	D _r	26"	26"
4.	Ukuran Roda Depan	D _f	20"	16"
5.	Sudut <i>Chamber</i>	+/-	+1°	-4°
6.	Sudut <i>Toe</i>	In/out	In 1°	In 5°
7.	Sudut <i>Caster</i>	+/-	+25°	+22°
8.	Jarak <i>Trail</i>	-	85 mm	30 mm
9.	Berat Pengendara	W _d	60,5 kg	60,5 kg
10.	Berat Sepeda	W _s	22 kg	25 kg
11.	Berat Bagian Depan	W _f	28 kg	29 kg
12.	Berat Bagian Belakang	W _r	45 kg	50 kg
13.	Berat Bag. Depan pada Sudut θ	W _{fθ}	39 kg	39 kg
14.	Berat Bag. Belakang pada Sudut θ	W _{rθ}	50 kg	55 kg
15.	Jarak Roda Depan ke Titik Berat	a	672 mm	775 mm
16.	Jarak Roda Belakang ke Titik Berat	b	418 mm	450 mm
17.	Tinggi Tanah ke Titik Berat	h _f	440 mm	438 mm
18.	Sudut Jungkit	θ_d	27,6°	24,8°

b. Hasil Pengujian Sepeda

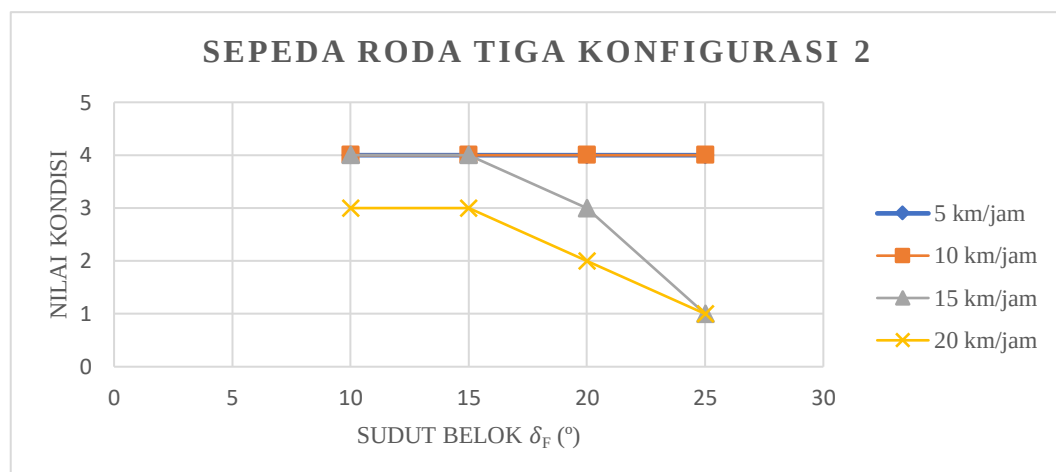
Hasil pengujian sepeda roda tiga dengan dua konfigurasi ini disajikan ke dalam bentuk grafik yang sebelumnya diolah menggunakan *software microsoft excel*. Pengolahan data yang dimaksud adalah mengubah data yang masih bersifat kualitatif menjadi data kuantitatif agar lebih mudah dibaca dan dipahami.

Berikut grafik hubungan antara sudut belok dengan nilai kondisi pada sepeda roda tiga konfigurasi 1 dan konfigurasi 2.



Keterangan: nilai kondisi 1=jatuh, 2=guling, 3=slip, 4=stabil

Gambar 5.10 Grafik hubungan sudut belok dengan nilai kondisi pada sepeda roda tiga konfigurasi 1



Keterangan: nilai kondisi 1=jatuh, 2=guling, 3=slip, 4=stabil

Gambar 5.11 Grafik hubungan sudut belok dengan nilai kondisi pada sepeda roda tiga konfigurasi 2

c. Analisis Pengukuran dan Pengujian Sepeda

Berdasarkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada tabel 5.10 menunjukkan posisi titik berat pada sepeda roda tiga baik konfigurasi 1 maupun konfigurasi 2 terletak lebih dekat ke bagian belakang yaitu 418 mm dan 450 mm.

Hal tersebut dipengaruhi oleh berat bagian depan yang lebih ringan dibandingkan berat bagian belakang dengan berat pengendara yang sama. Jika letak titik berat lebih dekat ke belakang maka kendaraan akan mengalami kondisi *oversteer* dan kendaraan akan sulit dikendalikan oleh pengendara normal. Kemudian dengan kondisi yang terlampaui *oversteer* sering mengakibatkan “*lost of control*” dan pengendara tidak mampu lagi mengendalikan kendaraan. Kondisi kendaraan seperti ini sering menyebabkan kecelakaan.

Berdasarkan gambar 5.10 grafik hubungan antara sudut belok dengan nilai kondisi pada sepeda roda tiga konfigurasi 1 menunjukkan bahwa pada kecepatan 5 km/jam dengan sudut belok 10°, 15°, 20°, dan 25° sepeda dapat berbelok dengan stabil tanpa mengalami slip, guling ataupun jatuh. Pada kecepatan 10 km/jam dengan sudut belok 10°, 15°, dan 20° sepeda masih dalam keadaan stabil kemudian pada sudut belok 25° sepeda mengalami guling. Pada kecepatan 15 km/jam dengan sudut belok 10° dan 15° sepeda masih dalam keadaan stabil kemudian pada sudut belok 20° dan 25° sepeda mengalami guling. Pada kecepatan 20 km/jam sepeda mengalami guling pada sudut belok 10°, 15°, 20°, dan 25° namun tidak sampai terjatuh. Kondisi guling ditandai dengan terangkatnya salah satu roda depan pada saat berbelok. Kondisi guling ini disebabkan karena jarak *wheeltrack* yang pendek. Sehingga mekanisme ayun (*tilting*) tidak berfungsi maksimal atau pergerakannya cenderung terbatas dan menyebabkan salah satu roda depan terangkat. Karena keterbatasan gerak tersebut maka sudut belok pun menjadi tidak maksimal.

Sedangkan pada gambar 5.11 yaitu grafik hubungan antara sudut belok dengan nilai kondisi pada sepeda roda tiga konfigurasi 2 menunjukkan bahwa pada kecepatan 5 km/jam dan 10 km/jam dengan sudut belok 10°, 15°, 20°, dan 25° sepeda dapat berbelok dengan stabil tanpa mengalami slip, guling, ataupun terjatuh. Pada kecepatan 15 km/jam dengan sudut belok 10° dan 15° sepeda dapat berbelok dengan stabil. Kemudian pada sudut belok 20° sepeda mengalami slip pada roda belakang namun tidak sampai terjatuh dan dapat dikendalikan dengan baik oleh pengendara. Sedangkan pada sudut belok 25° sepeda mengalami slip pada roda belakang dan terjatuh. Pada kecepatan 20 km/jam dengan sudut belok 10° dan 15° sepeda mengalami slip pada roda belakang namun tidak sampai terjatuh. Kemudian pada

sudut belok 20° sepeda mengalami guling dan pada sudut belok 25° sepeda mengalami slip pada roda belakang dan guling hingga terjatuh. Kondisi slip ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti posisi titik berat yang lebih dekat ke bagian belakang, faktor konstruksi ban sepeda dan permukaan lintasan pada saat pengujian. Konstruksi ban yang digunakan pada sepeda roda tiga dengan konfigurasi 2 ini adalah ban bias gundul dan permukaan lintasan pada lapangan futsal terlalu licin. Kedua hal tersebut menyebabkan koefisien gesek antara ban dengan permukaan lintasan menjadi kecil dan membuat sudut slip pada roda belakang menjadi lebih besar dibandingkan sudut slip roda depan. Kondisi sudut slip roda belakang lebih besar dibandingkan sudut slip roda depan disebut dengan kondisi *oversteer*. Kondisi *oversteer* ini menyebabkan sepeda menjadi sulit dikendalikan dan pada kondisi yang lebih ekstrim dapat menyebabkan kecelakaan.

Berdasarkan gambar 5.10 dan gambar 5.11 dapat disimpulkan bahwa semakin besar sudut belok (δ_f) yang diberikan pengendara, maka semakin besar sudut slip pada setiap roda. Semakin cepat laju kendaraan, maka semakin kecil sudut belok (δ_f) yang diberikan pengendara. Kemudian kecepatan jelajah paling aman pada sepeda roda tiga konfigurasi 1 dan konfigurasi 2 adalah 10 km/jam dengan sudut belok maksimal 25° dan atau 15 km/jam dengan sudut belok maksimal 15° .