LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA ENERGI PENGEREMAN BUS TRANSJAKARTA DENGAN SISTEM FLYWHEEL REGENERATIVE BRAKING UNTUK MENENTUKAN KAPASITAS DAYA TAMPUNG ENERGI FLYWHEEL

TUGAS AKHIR

DiajukanUntukMemenuhi Salah SatuSyarat MemperolehGelarSarjanaTeknik Pada BidangStudiDesain JurusanTeknikMesin FakultasTeknologiIndustri InstitutTeknologiSepuluh Nopember

> Oleh : Oktanto Darma Saputra NRP. 2111 106001

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- 1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEAKAN NIP. 1965081019910210010-061 SEADA
- 2. Prof.Ir.I Nyoman Sutantra M.Sc., PhD. 5 (Penguji I) NIP. 195106051978033002
- 4. Dr.Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc. (Penguji III) NIP. 197805102001121001

SURABAYA Nopember, 2014

ANALISA ENERGI PENGEREMAN BUS TRANSJAKARTA DENGAN SISTEM FLYWHEEL REGENERATIVE BRAKING UNTUK MENENTUKAN KAPASITAS DAYA TAMPUNG ENERGI FLYWHEEL

Nama Mahasiswa	: Oktanto Darma Saputra
NRP	: 2111 106 001
Jurusan	: Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing	: Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Abstrak

Bus Transjakarata merupakan angkutan massal yang beroperasi pada sistem transportasi *Bus Rapid Transit (BRT)* di Kota Jakarta, yang beroperasi pada rute dengan halte yang disediakan. Banyaknya halte mengakibatkan bus sering melakukan pengereman. Dengan seringnya bus melakukan pengereman dan didukung dengan massa bus yang besar, maka ada potensi energi akibat perlambatan yang bisa disimpan (*regenerative*) untuk digunakan lagi saat akselerasi. Jika hanya mengandalkan tenaga dari engine untuk akselerasi, maka engine akan bekerja dengan beban yang tinggi. Untuk mengurangi beban kerja engine saat akselerasi, dapat dibantu menggunakan *regenerative braking* melalui putaran *flywheel*.

Untuk dapat menganalisa *regenerative braking* pada Bus Transjakarta maka digunakan beberapa parameter seperti data teknis spesifikasi kendaraan, *driving cycle*, regulasi pe-ngereman ECE (*Economic Commission for Europe*), gaya hambat kendaraan dan FBD pengereman kendaraan. Parameter ini digunakan untuk mengetahui peta distribusi pengereman kendaraan Bus Transjakarta, porsi pengereman baik untuk *regenerative braking* maupun *mechanical braking* serta mengetahui sebaran energi pengereman pada *driving cycle* terhadap peta distribusi pengereman kendaraan tersebut.

Dari hasil analisa energi pengereman Bus Transjakarta, didapatkan porsi *regenerative braking* roda depan sebesar 0.05g, roda belakang sebesar 0.065g dan *mechanical braking* sebesar 0,04387g. Energi maksimum yang dihasilkan oleh *regenerative braking* depan sebesar 963623J dan *regenerative braking* roda belakang sebesar 1252710,5J. Dengan pertimbangan ketersediaan ruang pada *chasis* Bus, maka *flywheel* yang digunakan memiliki spesifikasi diroda depan : Do_{fw}=0.4m, h_{fw}=0,072m, m_{fw}=68,58kg, dengan putaran maksimum 11105,39rpm. Sedangkan spesifikasi diroda belakang : Do_{fw}=0.34m, h_{fw}=0,131m, m_{fw}=87,85kg, dengan putaran maksimum 13065,165rpm. Untuk energi yang dapat dipenuhi oleh *regenerative braking* sebesar 41,37% dari kebutuhan energi total saat akselerasi.

Kata kunci : Regenerative braking, Flywheel, Driving cycle, Pemodelan.

ANALYSIS BRAKING ENERGY OF BUS TRANSJAKARTA USING FLYWHEEL REGENERATIVE BRAKING TO DETERMINE THE CAPACITY OF FLYWHEEL ENERGY

Nama Mahasiswa	: Oktanto Darma Saputra
NRP	: 2111 106 001
Department	: Mechanical Enginering FTI - ITS
Supervisor	: Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Abstract

Transjakarta a mass transit system that operates at the transport Bus Rapid Transit (BRT) in Jakarta, which operate on routes with stops provided. The number of bus stops resulting in frequent braking. With frequent bus braking and supported by a large mass of the bus, then there is the potential energy that can be saved as a result of deceleration (regenerative) to be used again during acceleration. If only rely on power from the engine to the acceleration, the engine will work with high load. To reduce the workload of the engine during acceleration, can be assisted through the use of regenerative braking flywheel rotation.

To analyze regenerative braking on TransJakarta bus then used several parameters such as technical data specification vehicles, driving cycle, braking regulation ECE (Economic Commission for Europe), drag the vehicle and the vehicle braking FBD. This parameter is used to determine a map of the distribution of the vehicle's braking Bus Busway, good braking portion for regenerative braking and mechanical braking and know the distribution of braking energy in the driving cycle to braking region of vehicle.

From the analysis of TransJakarta bus braking energy, obtained regenerative braking portion of 0.05g front wheel, rear wheel of 0.065g and mechanical braking of 0,04387g. Maximum energy generated by front regenerative braking are 963623J and rear regenerative braking are 1252710,5J. In consideration of the availability of space on bus chassis, the flywheel is used has a front wheel specifications:Do_{fw}=0.4m,H_{fw}=0,072m, M_{fw}=68,58kg, with maximum rotation 11105,39rpm. While the rear wheel specifications : Do_{fw}=0.34m, H_{fw}=0,131m, M_{fw}=87,85kg, with maximum rotation 13065,165rpm. For energy can be met by regenerative braking for 41.37% of the total energy during acceleration.

Key words : Regenerative braking, Flywheel, Driving cycle, Modeling.

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Arti	Satuan
F_D	Gaya Hambat Aerodinamik	Ν
$ ho_u$	Massa Jenis Udara	kg/m ³
C _D	Koefisien Drag	-
А	Luasan Frontal Kendaraan	m^2
V	Kecepatan Kendaraan	m/s
F _r	Gaya Hambat Rolling	Ν
Cr	Koefisien Rolling	-
m	Massa Kendaraan	Kg
θ	Sudut Tanjakan Jalan Terhadap Bidang Datar	٥
F_{g}	Gaya Hambat Gradien	Ν
g	Percepatan Gravitasi	m/s ²
Fa	Gaya Hambat Inersia	Ν
a	Perlambatan Kendaraan	m/s ²
F _t	Gaya Traksi Kendaraan	Ν
Pt	Daya Traksi Kendaraan	W
$E_{fw\text{-}f}$	Energi Flywheel Depan	Joule
E_{fw-r}	Energi Flywheel Belakang	Joule
I _m	Inersia Massa	Kg.m ²
ω	Kecepatan Sudut	rad/s
d	Diameter Flywheel atau Silinder	m
l	Ketebalan Flywheel atau Silinder	m

$ ho_{\mathit{fw}}$	Massa Jenis Material Flywheel	kg/m ³
d_o	Diameter Luar dari Silinder Berlubang	m
d_i	Diameter Dalam dari Silinder Berlubang	m
σ_r	Tegangan Radial	N/m ²
σ_t	Tegangan Tangensial	N/m ²
\mathbf{W}_{f}	Gaya Berat Kendaraan Terhadap Roda Depan	Ν
W _r	Gaya Berat Kendaraan Terhadap Roda	N
	Belakang	IN
W	Berat Total Kendaraan	Ν
La	Jarak Sumbu Roda Depan Terhadap Pusat	
	Berat Kendaraan	111
Lb	Jarak Sumbu Roda Belakang Terhadap Pusat	m
	Berat Kendaraan	111
h_G	Jarak pusat Berat Terhadap Permukaan Jalan	m
L	Jarak Antara Sumbu Roda Depan dan	m
	Belakang	111
F_{bf}	Gaya Pengereman Roda Depan	Ν
F_{br}	Gaya Pengereman Roda Belakang	Ν

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Regenerative Braking

Regenerative braking merupakan suatu sistem pengereman pada kendaraan dimana energi pengereman pada roda sebagian atau seluruhnya ditangkap untuk disimpan pada suatu perangkat *energy storage system* dengan maksud digunakan kembali untuk keperluan lain. Sistem *regenerative braking* yang umum digunakan adalah secara *electrical* atau *mechanical*. Besarnya energi *regenerative braking* yang dihasilkan tersebut tergantung pada seberapa besar perlambatan kendaraan yang terjadi saat melewati *driving cycle* tertentu. Pada *driving cycle* perkotaan, kendaraan melakukan perlambatan dengan cukup sering dalam waktu yang cukup singkat. Waktu yang singkat ini sangat cocok untuk *energy storage system* yang memerlukan *charging* cepat^[1].

Energi *regenerative braking* yang disimpan, dapat digunakan kembali sebagai tambahan daya dorong kendaraan saat melakukan akselerasi dan juga mampu menurunkan konsumsi bahan bakar kendaraan tersebut^[2]. Energi *regenerative braking* yang digunakan untuk membantu akselerasi kendaraan dapat diperoleh dari hasil konversi energi listrik melalui putaran motor *(electrical)* ataupun melalui konversi putaran mekanis *(mechanical)*.

6

2.2 Dinamika Kendaraan

2.2.1 Gaya Hambat Kendaraan

Sebuah kendaraan yang melaju ataupun melambat akan mengalami gaya-gaya luar yang menghambat gerak kendaraan tersebut. Pada gambar 2.1 memperlihatkan gaya hambat yang bekerja terhadap kendaraan yang sedang melaju. Saat berjalan, kendaraan akan mengalami gaya hambat yang meliputi gaya hambat *rolling* (F_r); gaya hambat *drag* (F_D); Gaya hambat inersia (F_a) dan Gaya hambat *gradien* (F_g).



Gambar 2.1 Gaya-gaya Hambat Kendaraan

2.2.1.1 Gaya hambat drag (F_D)

Besarnya gaya hambat drag dipengaruhi oleh kecepatan relatif angin terha-dap kendaraan (V_u); massa jenis udara (ρ_u); luas frontal kendaraan (A) dan koefisien *drag* (C_D) yang dituliskan pada persamaan 2.1^[3]:

2.2.1.2 Gaya Hambat Rolling (Fr)

Gaya hambat roling terjadi akibat gesekan antara roda terhadap jalan yang besarnya dipengaruhi oleh *rolling coeficient* (C_r); berat kendaraan (W) dan sudut tanjakan pada jalan (θ). Gaya hambat rolling ditulis dalam persamaan 2.2^[3]:

 $F_r = C_r.m.g.cos(\theta)...(2.2)$

2.2.1.3 Gaya Hambat Gradien (Fg)

Gaya hambat *gradien* terjadi saat kendaraan menanjak yang besarnya dipengaruhi oleh berat kendaraan dan sudut tanjakan. Gaya hambat gradien ditulis dalam persamaan $2.3^{[3]}$:

 $F_{g} = m.g.sin(\theta)...(2.3)$

2.2.1.4 Gaya Hambat Inersia Kendaraan (Fa)

Gaya hambat inersia merupakan gaya hambat yang terjadi saat kendaraan diakselerasikan dari kecepatan rendah hingga tinggi atau sebaliknya dan arahnya berlawanan dengan arah gerak kendaraan. Gaya hambat inersia ditulis dalam persamaan 2.4^[3].

 $F_a = m.a.....(2.4)$ Saat percepatan, traksi yang harus dicapai oleh engine dapat dijabarkan sebagai penjumlahan gaya-gaya hambat saat kendaraan melaju. Sementara itu, daya traksi merupakan perkalian antara gaya traksi dengan kecepatan kendaraan. Gaya traksi dapat ditulis pada persamaa 2.5^[3] sedangkan daya traksi pada persamaan 2.6.

$F_t = F_D + F_r + F_g + F_a.$	(2.5)
$\mathbf{P}_t = \mathbf{F}_t.\mathbf{V}$	(2.6)

2.3 Kendaraan Hybrid

Kendaraan *hybrid* adalah kendaraan dengan 2 atau lebih sumber tenaga sebagai penggerak kendaraan. Sebuah kendaraan *hybrid* memiliki 2 sistem utama yaitu *energy storage* (*electrical* atau *mechanical*) dan *energy transmission* (motor listrik atau CVT). Motor listrik dapat juga berfungsi sebagai generator pengubah enegri kinetis menjadi energi listrik yang selanjutnya disimpan oleh baterai sebagai energi kimia.

Sebagai pengganti baterai, dapat digunakan *flywheel* untuk menyimpan energi sesaat sebelum digunakan untuk akselerasi. Agar *flywheel* dapat melakukan transfer energi menjadi gaya dorong pada roda kendaraan maka diperlukan sebuah *system* CVT. Penyimpanan dan pelepasan energi pada *flywheel* ini dapat dilakukan melalui pengaturan *timing* pengisian (*charging*), pelepasan (*discharging*) maupun *engine mode*.

Sebelumnya kendaraan *hybrid* masih menggunakan baterai *Nickel Metal Hydride* (NiMH) sebagai penyimpan energi, namun sekarang penggunaan baterai jenis ini mulai digantikan oleh jenis *Lithium Ion (Li-Ion)*. Meskipun begitu, penggunaan baterai kimia masih memiliki keterbatasan dalam hal melepas maupun menyimpan energi jika dibandingkan terhadap berat baterai itu sendiri (*power density*-nya rendah). Sebaliknya, kapasitas baterai dalam menyimpan energi per berat baterai cukup besar (energi *density*- nya tinggi). Secara lebih jelas *power density* dan *energy density* berbagai jenis material dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik Power Density dan Energy Density Berbagai Jenis Material^[4]

Kendaraan pribadi umumnya berukuran kecil sehingga sistim baterai dapat diterapkan karena kebutuhan daya yang tidak terlalu besar. Jika sistem baterai diaplikasikan pada Bus Transjakarta, maka baterai memerlukan dimensi dan berat baterai yang cukup besar. Sistem yang cocok untuk kendaraan Bus Transjakarta sebagai pengganti baterai berdasarkan gambar 2.2 adalah menggunakan *advance composite flywheel*. Pada tugas akhir ini, dipilih metal *flywheel* dengan pertimbangan *power density* masih cukup besar, biaya produksinya lebih murah daripada baterai kimia dan mudah dalam segi pembuatan. Kendaraan Bus dengan *hybrid flywheel* sebenarnya bukan hal baru. Pada tahun 1950-an di Swiss, sebuah transportasi massal menggunakan *flywheel* sebagai penyimpanan energi, dikenal dengan nama *Gyrobus*. *Gyrobus* merupakan bus bertenaga listrik dengan motor penggerak dan generator untuk menyimpan energi pada *flywheel*. Gambar 2.3 menunjukkan *Gyrobus yang* sedang beroperasi di Swiss.



Gambar 2.3 Gyrobus Saat Beroperasi di Swiss^[5]

2.3.1 Sistem Regenerative Braking Dengan Flywheel

Sistim *regenerative braking flywheel* merupakan sistem *regenerative braking* secara mekanis dimana energi yang diserap selanjutnya disimpan dalam bentuk putaran oleh *flywheel* mengikuti perlambatan kendaraan saat itu. Besarnya energi yang mampu disimpan *flywheel* ini dipengaruhi oleh kecepatan sudut dan massa dari *flywheel* yang digunakan. Pada Bus Transjakarta, diaplikasikan *regenerative braking flywheel* pada roda depan dan belakang dengan maksud mendapatkan energi sebanyak-banyaknya dari sistem pengereman kendaraan tersebut.

2.3.1.1 Mode Charging dan Mechanical Braking

Saat pedal rem ditekan, maka CVT Clutch enggaged. Energi pengereman dari roda dipindahkan ke flywheel melalui unit CVT dan gear box. Apabila energi pengereman yang dibutuhkan lebih kecil dari nilai maksimum *regenerative braking* roda depan, maka cukup regenerative braking roda depan saja yang aktif seperti pada gambar 2.4. Apabila energi pengereman yang dibutuhkan lebih besar dari nilai maksimum regenerative braking pada roda namun masih belum melampaui nilai maksimum depan regenerative braking roda belakang maka regenerative braking roda belakang juga aktif untuk membantu memenuhi kebutuhan energi pengereman tersebut seperti pada gambar 2.5. Apabila energi pengereman yang dibutuhkan melebihi jumlah energi regenerative braking pada roda depan dan belakang, maka mechanical braking aktif untuk memenuhi kebutuhan energi pengereman tersebut seperti pada gambar 2.6. Mode charging terjadi saat energi pengereman dari roda diteruskan ke CVT dan gear box melalui clutch untuk digunakan memutarkan flywheel hingga putaran flywheel mencapai maksimum mengikuti perlambatan saat itu.



Gambar 2.4 Aliran Energi Pada Saat Mode Charging Ketika

Regenerative Braking Depan Aktif



Gambar 2.5 Aliran Energi Pada Saat Mode *Charging* Ketika Regenerative Braking Depan dan Belakang Aktif



Gambar 2.6 Aliran Energi Pada Saat Mode *Charging* Ketika Regenerative Braking Depan, Belakang dan Mechanical Aktif

2.3.1.2 Mode Discharging

Mode *discharging* terjadi saat *flywheel* mencapai putaran maksimum dan sesaat kemudian kendaraan diakselerasikan. Putaran maksimum *flywheel* ini selanjutnya diteruskan ke *gear box* lalu ke CVT untuk kemudian digunakan memutarkan roda kendaraan mengikuti gerakkan pedal gas. Aliran energi saat mode discharging ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Aliran Energi Pada Mode Discharging

2.3.1.3 Mode Engine

Mode *engine* terjadi saat kebutuhan energi untuk akselerasi tidak mampu dipenuhi oleh *flywheel* akibat *regenerative braking*. Aliran energi untuk mode *engine* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Aliran Energi Pada Mode Engine

2.3.2 Operasional Pengereman Dengan CVT

2.3.2.1 Regenerative Braking

Saat pedal rem ditekan maka CVT-*clutch* terhubung sehingga putaran dari roda diteruskan ke *flywheel* melalui CVT. Setelah putaran dari roda terhubung dan putaran menjadi semakin rendah, maka rasio putaran CVT berubah secara otomatis dari rasio putaran tinggi putaran rendah seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Operasi CVT^[6]

Dari gambar 2.9 *drive pulley* dihubungkan ke roda, sedangkan *driven pulley* dihubungkan ke *flywheel* melalui *gear box*. Saat awal pengereman, *drive pulley* berputar bersama roda dan memutar *driven pulley* secara lambat, dengan torsi yang besar. Saat putaran roda semakin rendah maka rasio CVT berubah dimana *drive pulley* menggerakkan *driven pulley* secara cepat dengan torsi yang kecil. Diwaktu yang sama, *driven pulley* juga turut memutar *gear box* guna menaikkan putaran *flywheel* menjadi lebih tinggi lagi. Saat putaran roda berhenti, maka disaat itulah putaran *flywheel* menjadi maksimum.

2.3.2.2 Acceleration Boost

Pada saat putaran *flywheel* mencapai maksimum, maka energi yang tersimpan di *flywheel* dapat digunakan untuk membantu akselerasi melalui CVT. Kebalikan dari mode *regenerative braking*, putaran *flywheel* diteruskan oleh *gear box* menuju CVT dimana *driven pulley* akan menggerakkan *drive pulley* secara lambat namun dengan torsi yang besar. Saat putaran *flywheel* semakin berkurang, maka rasio CVT berubah dimana *driven pulley* menggerakkan *drive pulley* secara cepat dengan torsi rendah.

2.3.2.3 Netral

Saat putaran *flywheel* telah maksimum namun kendaraan masih melakukan perlambatan, maka CVT-clutch *disengaged* sehingga putaran roda tidak diteruskan ke CVT. Pada kondisi ini

tidak ada tambahan putaran akibat gaya pengereman roda. Gaya pengereman tambahan yang dibutuhkan oleh kendaraan untuk berhenti ditanggung sepenuhnya oleh *mechanical braking*.

2.4 Flywheel

Pada *flywheel*, energi yang disimpan adalah energi kinetik yang besarnya dapat ditulis pada persamaan $2.8^{[7]}$:

 $E_{fw} = \frac{1}{2} I_m \cdot [(\omega_2)^2 - (\omega_1)^2]....(2.8)$ Dimana :

E	= energi kinetik <i>flywheel</i>	[Nm atau Joule]
Im	= inersia mass <i>flywheel</i>	$[kg.m^2]$
ω^2	= kecepatan sudut <i>flywheel</i>	[rad/s]

Flywheel yang digunakan berupa silinder berlubang, maka nilai I_m pada silinder berlubang tersebut seperti pada persamaan 2.11^[7].

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot d^4 \cdot l \right) \cdot \left(\omega_2^2 - \omega_1^2 \right)$$
(2.12)
atau
$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi l \cdot \rho \cdot (d_0^2 - d_i^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} \right) \left(\omega_2^2 - \omega_2^2 \right)$$
(2.12)

Dari persamaan 2.13, besar energi yang disimpan dan dilepas oleh *flywheel* dipengaruhi oleh kecepatan sudut *flywheel* saat *flywheel* berputar dari ω_1 ke ω_2 . Putaran maksimm flywheel

dibatasi oleh kekuatan dari material yang dipilih dimana material tersebut akan mengalami tegangan tangensial maupun tegangan radial pada saat ia diputar. Dengan asumsi bahwa *flywheel* memiliki tebal yang sama, maka nilai gaya sentrifugal dFc dapat dituliskan pada persamaan 2.15^[8]:

 $dFc = dm r \omega^2 = \rho h d\varphi dr \omega^2$(2.15) Dimana *dm* adalah elemen kecil yang diberi gaya sentrifugal dan h adalah tebal *flywheel*. Ilustrasi gaya yang bekerja pada silinder yang berputar ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Ilustrasi Gaya yang Bekerja Pada Silinder yang Berputar^[9]

Pada gambar 2.10 terdapat elemen kecil yang bekerja pada silinder saat berputar. Hal ini dijabarkan pada persamaan 2.16^[8].

 $(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi - \sigma_r r \, d\varphi - 2 \, \sigma_t \, dr \sin\frac{d\varphi}{2} + \rho \, h \, r^2 \, d\varphi \, \omega^2 = 0 \dots (2.16)$

Persamaan 2.16 dibagi dengan r dr d ϕ dan eliminasi diffrensial orde tinggi didapat persamaan 2.17^[7].

$$-\frac{\sigma_t - \sigma_r}{r} + \frac{d\sigma_r}{dr} + \rho h r \omega^2 = 0....(2.17)$$

Dimana hubungan tegangan dan regangan dua dimensi seperti persamaan 2.18 dan 2.19.

$$\sigma_t = \frac{E}{1-v^2} (\varepsilon_t + v\varepsilon_r) \ dan \ \sigma_r = \frac{E}{1-v^2} (\varepsilon_r + v\varepsilon_t)....(2.18)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \, dan \, \varepsilon_t = \frac{u}{r}....(2.19)$$

Subtitusi persamaan 2.18 kepersamaan 2.19, lalu disubtitusikan kepersamaan 2.17 diperoleh :

$$-\frac{E}{1-v^2}\left(\frac{u}{r^2} + \frac{v\,du}{r\,dr} - \frac{1}{r}\frac{du}{dr} - \frac{vu}{r^2}\right) + \frac{E}{1-v^2}\left(\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{v\,du}{r\,dr} - \frac{vu}{r^2}\right) - \rho\,h\,r\,\omega^2 = 0...(2.21)$$

Persamaan 2.21 di integralkan satu kali diperoleh :

$$\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} = \frac{1 - v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^2}{2} + c1....(2.22)$$

Dikalikan dengan dengan r diperoleh :

$$r\frac{du}{dr} - u = \frac{1 - v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^3}{2} + c1 r....(2.23)$$

Persamaan 2.23 di integralkan pertama diperoleh :

$$u = \frac{1 - v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^3}{2} - \frac{c_1 r}{2} - \frac{c_2}{r}....(2.24)$$

Persamaan 2.24 merupakan persamaan perpindahan radial elemenelemen dinding silinder fungsi posisi elemen tersebut. Subtitusi persamaan 2.24 ke persamaan 2.18 untuk menghasilkan tegangan tangensial dan tegangan radial pada persamaan 2.25 dan 2.26.

$$\sigma_t = \frac{Ec1}{2(1-\nu)} + \frac{Ec2}{1+\nu} \frac{1}{r^2} - \frac{(1+3\nu)\rho\omega^2}{8} r^2 \dots (2.25)$$

$$\sigma_r = \frac{E c1}{2(1-v)} - \frac{E c2}{1+v} \frac{1}{r^2} - \frac{(3+v)\rho\omega^2}{8} r^2.$$
(2.26)

Dengan *boundary condition* tidak ada tekanan dari dalam dan luar silender. Maka σ_r (r=r_i)=0 dan σ_r (r=r_o)=0. Nilai tegangan tangensial dan tegangan radial pada saat silinder berputar untuk silinder berlubang dapat dicari menggunakan persamaa 2.27 dan 2.28^[8].

Tegangan tangensial

Tegangan radial

$$\sigma_r = \frac{(3+\nu)\,\rho\omega^2}{8} \Big[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - r^2 \Big]....(2.28)$$

2.5 Distribusi Gaya-gaya Pengereman Kendaraan

Fungsi suatu sistem rem kendaraan adalah dapat dengan cepat mengurangi laju kendaraan disepanjang jalan (tempat kendaraan tersebut bergerak) untuk tetap dalam keadaan stabil dan mudah dikendalikan pada berbagai kondisi jalan^[10].

2.5.1 Gaya Vertikal dan Letak Pusat Berat Kendaraan

Gaya vertikal dari roda kendaraan biasa disebut dengan gaya normal yang arahnya berlawanan dengan arah gaya berat kendaraan. Arah gaya normal pada kendaraan Bus Transjakarta ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Gaya Normal pada Kendaraan

Pada saat pengereman, besarnya gaya vertikal roda depan (W_f) dan roda belakang (W_r) dapat dicari melalui FBD persamaan seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Gambar FBD gaya saat pengereman

Dengan menggunakan roda depan dan belakang sebagai tumpuan, maka gaya normal roda depan dan belakang dapat diperoleh melalui persamaan 2.32 dan 2.33. Roda Depan

$$\begin{split} (\Sigma MB)_{ext} &= (\Sigma MB)_{eff} \\ W_{f.}(L_a+L_b) - W.L_b &= (m.a).h_G \\ W_f &= (m.a.h_G + W.Lb)/(L_a+L_b) \\ &= \frac{W}{La+Lb} \left(Lb + h_G \frac{a}{g} \right) \\ &= \frac{W}{L} \left(Lb + h_G \frac{a}{g} \right).....(2.32) \end{split}$$

Roda Belakang

$$(\Sigma MA_{ext}) = (\Sigma MA_{eff})$$

$$-W_{r.}(L_{a}+L_{b}) + W.L_{a} = (m.a).h_{G}$$

$$W_{r} = (m.-a.h_{G} + W.L_{a})/(L_{a}+L_{b})$$

$$= \frac{W}{La+Lb} \left(La - h_{G}\frac{a}{g}\right)$$

$$= \frac{W}{L} \left(La - h_{G}\frac{a}{g}\right).....(2.33)$$

Keterangan :

W	: Total beban normal kendaraan	[N]
La	: Jarak roda depan terhadap titik berat	[m]
Lb	: Jarak roda belakang terhadap titik bera	t[m]
L	: Jarak antara roda depan dan belakang	[m]
m	: Massa kendaraan	[kg]
a	: Perlambatan kendaraan	[m/s ²]
h_G	: Jarak titik berat terhadap jalan	[m]

Untuk jarak roda depan dan belakang terhadap pusat berat kendaraan dapat dicari dengan persamaan 2.34 dan 2.35.

Pusat roda depan sebagai momen (cw)

$$W_t.La = (La+Lb).Wr$$

$$La = (Lc.Wr)/W_t = (Lc.Wr)/(m.g)....(2.34)$$
Pusat roda belakang sebagai momen (ccw)
$$Wt.Lb = (La+Lb)*W_f$$

Lb =
$$(Lc*W_f)/W_t = (Lc.W_f)/(m.g)...(2.35)$$

2.5.2 Distribusi Gaya Pengereman Kendaraan

Untuk mendapatkan distribusi pengereman mekanik, maka harus mengetahui besar gaya pengereman pada masing-masing roda berdasarkan beban normal pada roda kendaraan tersebut, sehingga kita bisa mendapatkan rasio gaya pengereman pada roda terhadap berat kendaraan tersebut sesuai persamaan 2.34 dan 2.35^[10].

$$\frac{Fb_f}{Fb_r} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{W_/L(L_b + \frac{a}{g}.h_G)}{W_/L(L_a - \frac{a}{g}.h_G)}....(2.34)$$

Dengan memberikan nilai [a/g=konstan], sedangkan [F_{bf} /W=0.1 sd 0.9], maka akan kita peroleh distribusi pengereman mekanik seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik Distribusi Mechanical Braking

Dengan memvariasikan nilai a/g dan F_{bf}/W dari 0.1 sd 0.9, maka akan kita peroleh kurva pengereman ideal seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Grafik Distribusi Ideal Braking

Untuk distribusi pengereman aktual, kita gunakan gaya pengereman ideal pada suatu kendaraan yang berada pada nilai koefisien gesek lintasan perancangan sebagai nilai maksimalnya dengan menggunakan persamaan 2.36^[10].

 $Fb_f = W_f \cdot \mu$(2.36) Dengan menggunakan nilai W_f dan koefisien gesek lintasan sebesar 0.9, maka kita dapatkan grafik pengereman aktual seperti pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Grafik Distribusi Actual Braking

2.5.3 Pertimbangan Faktor Kestabilan Kendaraan

Jika proses pengereman terjadi dimana distribusi *mechanical braking* berada dibawah kurva *ideal braking*, maka roda bagian depan terkunci terlebih dahulu, sedangkan jika pengereman yang terjadi dimana distribusi *mechanical braking* berada diatas kurva *ideal braking* maka roda bagian belakang akan terkunci terlebih dahulu. Saat roda bagian belakang terkunci terlebih dahulu, kendaraan tersebut akan kehilangan kestabilan karena kemampuan roda bagian belakang tersebut untuk melawan gaya dorong dari samping akan hilang seperti diilustrasi-kan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Kendaraan Kehilangan Kestabilan Akibat Terkuncinya Roda Belakang^[10]

Jika roda bagian depan terkunci terlebih dahulu, maka kendaraan akan kehilangan kendali dan pengemudinya juga tidak bisa mengendalikan kemudi, namun hal ini tidak akan menyebabkan kehilangan kestabilan pada kendaraan. Peristiwa ini terjadi karena jika terdapat gaya dorong kesamping pada roda bagian depan, maka posisi kendaraan akan distabilkan secara otomatis oleh gaya inersia yang akan membuat kendaraan tersebut kembali keposisi asalnya. Kehilangan kendali pada kemudi dapat dirasakan pengemudi dengan cepat, sehingga untuk menormal-kan kendali pada kendaraan, pengemudi tersebut dapat sesegera mungkin mengu-rangi gaya pengereman, namun berbeda dengan kehilangan kestabilan ketika roda bagian belakang terkunci, walaupun pengemudi melepaskan gaya pengereman, kendaraan tersebut tidak akan bisa kembali ke posisi normal, dengan kata lain roda bagian depan yang terkunci terlebih dahulu lebih aman dibandingkan roda bagian belakang yang terkunci terlebih dahulu. Akan dapat menjadi lebih berbahaya lagi jika peristiwa ini terjadi pada lintasan dengan koefisien gesek yang rendah^[10].

Pada suatu desain pengereman, roda bagian depan akan terkuci lebih dahulu dibandingkan roda bagian belakang jika distribusi gaya pengereman aktual berada dibawah distribusi gaya pengereman ideal, namun jika distribusi gaya pengereman aktual tersebut jauh berada dibawah distribusi gaya pengereman idealnya, maka hampir seluruh gaya pengereman kendaraan tersebut terjadi pada roda bagian depan dan hanya sebagian kecil gaya pengereman yang akan terjadi pada roda bagian belakang. Peristiwa ini akan menyebabkan roda bagian depan terkunci lebih cepat sedangkan roda bagian belakang tidak terkunci, maka gaya pengereman minimum pada roda bagian belakang tidak akan pernah tercapai. Untuk menghindari hal tersebut maka diterapkan regulasi ECE, yaitu suatu aturan yang bertujuan untuk menyeimbangkan distribusi pengereman pada suatu kendaraan, sehingga saat terjadi pengereman kendaraan tersebut tetap dalam kondisi yang stabil dan dapat menghasilkan gaya pengereman yang optimal dikedua rodanya^[10].

2.6 Regulasi Pengereman

2.6.1 Pembagian Kategori Kendaraan Menurut UNECE

Menurut UNECE, kendaraan dibagi menjadi beberapa kelas mulai dari kendaraan ringan hingga berat. Klasifikasi pembagian kelas kendaraan tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Pembagian Kategori Kendaraan Menurut UNECE^[11]



EC *Directive* 71/320/EEC dan regulasi UN/ECE 13 dan 13H merupakan regulasi pengereman dengan mengikuti kategori kendaraan diatas, dimana regulasi yang digunakan untuk kategori kendaraan M2, M3, N1, N2 dan N3 diperlihatkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Regulasi Pembagian Kategori Kendaraan M2, M3, N1, N2 dan N3^[12]

Vehicle Type (Mass in tonnes, GVW)		Requirements at Registration	Summary of Braking Requirements	
NI	Light vans and trucks (<3.5t)		Service , secondary and parking brake Anti-lock broking system not a Requirement	
MZ	Mid size passenger vehicle (>8 passenger seats, <5t)	certification to 71/320/EEC ³ , JJN/ECE Regulation 13 ³ or UN/ECE Regulation 13H ¹		
N2	Mid size vans and trucks (3.5t-12t)		Service, secondary and parking brake and Anti-lock braking system (Category 1)*	
мз	Large passenger vehicle (>8 passenger seats, >5t)			
N3	Heavy Vans and trucks (>12t)			

2.6.2 Regulasi UN/ECE

Jika distribusi gaya pengereman aktual berada dibawah kurva ideal maka roda depan akan mengunci terlebih dahulu daripada roda belakang. Saat roda depan mengunci, maka roda belakang menerima gaya pengereman minimum. Untuk alasan keamanan, maka regulasi pengereman terus dikembangkan. Dalam hal ini ECE mensyaratkan ketentuan seperti pada persamaan 2.37^[9].

 $\frac{F_{bf}}{W_f} \ge \frac{F_{br}}{W_r}.$ (2.37)

Dari persamaan 2.37 diatas, roda belakang tidak pernah mengunci sebelum roda depan. Dengan kata lain, pengereman selalu berada dibawah kurva Ideal seperti pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Grafik Distribusi Regulasi ECE

ECE menetapkan besar gaya pengereman minimum pada roda belakang dengan nilai antara 0,2 dan 0,7. Regulasi ECE yang digunakan untuk bus sesuai dengan persamaan 2.38^[13].

z > 0,1 + 0,7 (k-0,2)(2.38) Dimana :

= koefisien laju pengereman kendaraan (a/g) Z

k

= koefisien teoritis adhesi antara roda dan jalan Persamaan diatas mengartikan bahwa saat roda depan mengunci, maka pengereman roda belakang harus cukup kuat untuk membuat perlambatan kendaraan tidak lebih kecil dari 0,1+0,7(k-0,2). Strategi pengereman yang dirancang haruslah berada diantara kurva ideal dan kurva ECE tersebut.

2.6.3 Distribusi Regenerative Braking Depan dan Belakang

Untuk kendaraan penumpang secara umum, regenerative braking pada roda depan lebih baik jika dibanding pada roda belakang. Namun beberapa jenis kendaraan seperti truk atau bus, *regenerative braking* pada roda belakang dapat jauh lebih baik^[10]. Alokasi gaya regenerative braking roda depan dan belakang serta pengereman mekanik Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 2.18.





Pada saat pedal rem sedikit ditekan, hanya pengereman roda depan saja yang bekerja dari 0 hingga mencapai 0,05 (segmen A-B) dan pengereman roda belakang belum aktif. Pada saat pedal rem ditekan sedikit lebih dalam, maka pengereman roda belakang bekerja dari 0 hingga mencapai 0,065 (segmen B-C). Pada saat pedal rem ditekan lebih dalam lagi, maka pengereman yang bekerja adalah *mechanical braking* pada roda depan dan belakang secara simultan (segmen D-E). Apabila perlambatan kendaraan yang dihasilkan kurang dari 0,9g (segmen C-D), maka gaya pengereman maksimum pada perancangan 0,9 tidak akan pernah tercapai. Pengereman mekanik berada di sepanjang garis D-E.

2.6.4 Driving Cycle Bus Transjakarta

Disepanjang lintasan Bus Transjakarta dari Halte Pulogadung–Monas CB, terdapat 19 halte bus dan 4 simpangan. Halte dan simpangan tersebut memiliki jarak bervariasi dan mengharuskan bus untuk berhenti disetiap halte dan sim-pangan tersebut. Akibat prilaku ini, maka munculah suatu siklus mengemudi yang disebut sebagai *driving cycle* Bus Transjakarta. Untuk lebih jelasnya, *driving cycle* Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Driving Cycle Rute Pulogadung–Monas CB^[15]

Untuk waktu tempuh dan kecepatan tempuh pada saat Bus Transjakarta melewati setiap haltenya dapat dilihat pada tabel 2.3.

Halte/Simpan	Waktu Travel (det)	Time (det)	Kecepatan (Km/jam)
		0	0
Pulogadung		300	0
	390.24	313.89	12
		680.98	12
		690.24	0
Halte RS ediros	Tundaan simpang	706.24	0
	52.82	720.13	28.68
		749.8	28.68
		759.06	0
Halte Gading		775.06	0
	57.54	788.95	31.25
		823.34	31.25
		832.6	0
Simpang K Gading	Tundaan simpang	848.6	0
	34.24	862.49	11.68
		873.58	11.68
		882.84	0
Halte pulomas		898.84	0
	90.2	911.84	41.66
		979.78	41.66
** 1		989.04	0
Halte Asmi	Tundaan simpang	1005.04	0
	56.22	1018.93	30.57
		1052	30.57
		1061.26	0
Halte ps pendongkelan	Tundaan simpang	1077.26	0
	52.51	1091.15	28.49
		1120.51	28.49
		1129.77	0
Simpang coca-cola		1219.77	0
	118.45	1233.66	8.55
		1328.96	8.55
	T 1 .	1338.22	0
Halte Cempaka Mas	Tundaan simpang	1354.22	0
	54.16	1368.11	28.93
		1399.12	28.93
	Transform streams	1408.38	0
наце кодат	i undaan simpang	1424.38	0
	64.04	1438.27	34.10 24.16
		14/9.10	34.10
Halte lippo	Tundaan simpang	1400.42	0
nate uppo		1519.21	21.21
	38.13	1518.51	31.31 21.21
		1553.29	0
Holto De Comestre Dutit	Tundoon simeses	1502.55	0
nane Ps Cempaka Putih	i undaan simpang	15/8.55	0

 Tabel 2.3 Waktu Tempuh dan Kecepatan Bus dari Halte

 Pulogaung –Monas CB^[15]
	66.42	1592.44	34.92
		1635.71	34.92
		1644.97	0
Halte Rawa Selatan	Tundaan simpang	1660.97	0
	54.78	1674.86	29.31
		1706.49	29.31
		1715.75	0
Halte Galur	Tundaan simpang	1731.75	0
	52.78	1737.54	14.96
		1780.67	14.96
		1784.53	0
Simpang Galur	Tundaan simpang	1874.53	0
	255.95	1880.32	15.74
		2126.62	15.74
		2130.48	0
Halte Ps Senen	Tundaan simpang	2146.48	0
	36.07	2160.37	13.5
		2173.29	13.5
		2182.55	0
Simpang Kramat Raya	Tundaan simpang	2272.55	0
	111.19	2286.44	5.19
		2374.48	5.19
		2383.74	0
Halte Atrium	Tundaan simpang	2399.74	0
	159.51	2405.53	21.66
		2555.39	21.66
		2559.25	0
Halte Deplu		2575.25	0
	148.05	2581.04	21.48
		2719.44	21.48
		2723.3	0
Halte gambir 1	Tundaan simpang	2739.3	0
	102.97	2745.09	19.94
		2838.41	19.94
		2842.27	0
Halte Istiqlal	Tundaan simpang	2858.27	0
	121.53	2864.06	20.69
		2975.94	20.69
		2979.8	0
Halte Juanda	Tundaan simpang	2995.8	0
	54.48	3009.69	29.29
		3041.02	29.29
II-14- D-	Transform	3050.28	0
Halte Pecenongan	Tundaan simpang	3066.28	0
	121.61	3080.17	46.29
		51/8.63	46.29
		3187.89	0
Monas Central Busway	Tundaan simpang	3247.89	0

BAB III

PEMODELAN FLYWHEEL REGENERATIVE BRAKING

3.1 Diagam Alir Pemodelan



Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan

3.2 Analisa Pengereman

Untuk dapat menganalisa suatu sistem pengereman Bus Transjakarta, maka data awal yang dibutuhkan berupa data teknis kendaraan dan FBD kendaraan guna mendapatkan peta distribusi pengereman kendaraan tersebut. Dengan didapatkannya peta distribusi pengereman Bus Transjakarta maka selanjutnya dapat diketahui distribusi *regenerative braking* maksimum yang dapat diterapkan pada sistem pengereman Bus Transjakarta.

Untuk mengetahui besar gaya pengereman yang dihasilkan oleh Bus Transjakarta, maka digunakan gaya-gaya luar yang bekerja terhadap Bus Transjakarta saat mengikuti *driving cycle*. Gaya luar yang dimaksud meliputi gaya hambat angin (*drag force*), gaya hambat inersia, gaya pengereman itu sendiri, gaya hambat *rolling* dan gaya hambat terhadap gradien jalan. Gaya hambat ini selanjutnya dimodelkan mengikuti *driving cycle* Bus Transjakarta sehingga dapat diketahui besar gaya, torsi, daya maupun energi pengereman yang dilakukan kendaraan pada setiap perlambatannya. Dengan mengetatui besar energi yang dihasilkan pada setiap perlambatan mengikuti peta distribusi pengeremanya, maka selanjutnya dapat ditentukan spesifikasi flywheel untuk digunakan sebagai *energy storage system* pada Bus Transjakarta.

3.3 Data Kendaraan

Data operasional diperoleh melalui observasi lapangan saat Bus Transjakarta beroprasi pada setiap halte disepanjang rute dalam bentuk *driving cycle* yang konstan. Untuk dimensi Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 3.2 dan untuk data spesifikasi teknisnya pada table 3.1.



Gambar 3.2 Dimensi Bus Transjakarta

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknis Bus Transjakarta

Dimensi kendaraan	Simbol	Besaran	Satuan
Luas frontal kendaraan	А	5,4	m ²
Jarak sumbu roda	L	6,0	m
Jarak roda depan terhadap pusat berat	La	3,636	m
Jarak roda belakang terhadap pusat berat	Lb	2,363	m
Ketinggian pusat berat terhadap permukaan jalan	hG	0,925	m
Massa dan berat kendaraan			
Massa kendaraan	m	16500	Kg
Berat kendaraan	W	161865	N
Massa axel depan	mf	6500	Kg
Berat axel depan	W _f	63765	N
Massa axel belakang	m _r	10000	Kg
Berat axel belakang	Wr	98100	Ν
Konstanta			
Koefisien drag	CD	0,8	-
Koefisien rolling	Cr	0,006	-
Massa jenis udara	ρ	1,2	Kg/m ³
Percepatan gravitasi	g	9,81	m/s ²
Roda			
Diameter	D	1140	mm
Radius dinamik	r _{dyn}	0,546	М

3.4 Metode Perhitungan

3.4.1 Mendapatkan Peta Pengereman Bus Transjakarta

Peta distribusi pengereman merupakan daerah dimana *regenerative* atau *mechanical braking* diijinkan untuk beroperasi pada suatu sistem pengereman. Peta distribusi pengereman ini menjadi acuan operasi dari sistem pengereman. Nilai W_f dan W_r didapatkan dari *free body diagram* saat pengereman pada gambar 2.12, sedangkan rasio gaya berat roda depan terhadap roda belakang yang ditunjukkan pada persamaan 3.3.

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)\left(L_b + h_G, \frac{a}{g}\right)}{\left(\frac{W}{L}\right)\left(L_a - h_G, \frac{a}{g}\right)}.$$
(3.3)

Dengan mengalikan F_{bf} dan F_{br} masing-masing terhadap W, maka didapat persamaan 3.4 sebagai berikut :

 $\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_{a} - h_{G} \cdot \frac{a}{g}\right)}{\left(L_{b} + h_{G} \cdot \frac{a}{g}\right)} \cdot \frac{F_{bf}}{W} \dots (3.4)$ Dengan memberikan nilai a/g=konstan dan F_{bf}/W dari 0.1 sd 0.9, maka akan diperoleh distribusi pengereman mekanik. Jika nilai a/g konstan pada 0,9 dan Fbf/W dari 0,1 sd 0,9 maka dengan menggunakan persamaan 3.4 perhitungannya sebagai berikut:

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{(3,63636 - (0,925).(0,9))}{(2,36364 + (0,925).(0,9))}.0,9 = 0,789$$

Nilai *mechanical braking* pada setiap kondisi jalan dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Distribusi Gaya Pengereman Mekanik Pada

Perancangan	Fbf/W (konstan)	Fbr/W
	0	0
	0.1	0.087727
	0.2	0.175453
	0.3	0.26318
0.0	0.4	0.350907
0.9	0.5	0.438633
	0.6	0.52636
	0.7	0.614087
	0.8	0.701813
	0.9	0.78954

Perancangan 0,9

Jika kita plot (F_{bf} /W) kearah sumbu-x dan (Fbr/W) kearah sumbuy maka kita dapatkan grafik distribusi mechanical braking seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Distribusi Mechanical Braking Untuk Perancangan

0,9

Untuk mendapatkan grafik *ideal braking* pada perancangan 0,9 dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$F_{bf} = W_f. \quad ; \operatorname{dan} W_f = \frac{W.(L_b + (h_G.\frac{a}{g}))}{L}$$

Dimana : W = m.g = 161865 N, Maka :

Dengan mengganti nilai (a/g) dan (μ) bervariasi dari 0,1 sd 0,9 maka dapat kita buat tabel porsi pengereman ideal pada setiap kondisi jalan seperti pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Porsi Pengereman Ideal Roda Depan dan BelakangTiap Kondisi Jalan.

(a/g) atau (µ)	Fbf/W	Fbr/W
0	0	0
0.1	0.040936	0.059064
0.2	0.084955	0.115045
0.3	0.132057	0.167943
0.4	0.182242	0.217758
0.5	0.235511	0.264489
0.6	0.291864	0.308136
0.7	0.351299	0.348701
0.8	0.413818	0.386182
0.9	0.47942	0.42058

Jika kita plot nilai (Fbf/W) pada sumbu-x dan (Fbr/W) pada sumbu-y menjadi grafik, akan didapatkan grafik pengereman ideal seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Distribusi *Ideal Braking* Untuk Perancangan 0,1 sd 0,9

Kurva distribusi pengereman ideal seperti pada gambar 3.4 digunakan untuk membatasi pengereman maksimum pada saat mendesain *mechanical braking* maupun *regenerative braking* secara proporsional. Distribusi pengereman yang baik tidak boleh melewati batas maksimum dari kurva distribusi *ideal braking*, karena dapat mengakibatkan roda belakang terkunci terlebih dahulu dan juga mengurangi potensi *regenerative braking* yang bisa dibangkitkan. Dalam hal ini, maka digunakan beberapa pertimbangan seperti ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Distribusi Pengereman Pada Beberapa Kasus Terhadap *Ideal Braking*

Gambar 3.5 memperlihatkan beberapa kasus pengereman yang akan memberikan pengaruh berbeda disetiap keadaan antara lain :

- Pada kasus A, distribusi pengereman jatuh diatas distribusi pengereman ideal yang akan mengakibatkan roda bagian belakang terkunci terlebih dahulu dibandingkan roda bagian depan. Distribusi pada kasus A akan berdampak pada kehilangan kestabilan kendaraan karena roda belakang tidak mampu melawan gaya dorong dari samping.
- Pada kasus B, distribusi pengereman jatuh tepat pada distribusi pengereman ideal saat μ=0.6 yang akan mengakibatkan roda bagian depan dan belakang terkunci bersamaan pada perlambatan tersebut. Distribusi pada kasus B ini adalah yang paling baik pada μ=0.6.

- Pada kasus C, distribusi pengereman jatuh dibawah distribusi pengereman ideal yang akan mengakibatkan roda bagian depan terkunci lebih dahulu dibandingkan roda bagian belakang. Distribusi pada kasus C ini masih cukup baik.
- 4. Pada kasus D, distribusi pengereman jatuh tepat pada distribusi pengereman ideal saat μ=0.9 yang akan mengakibatkan roda bagian depan dan belakang terkunci bersamaan pada perlambatan maksimal. Distribusi pada kasus D ini adalah yang paling baik pada μ=0.9.
- Pada kasus E, distribusi pengereman jatuh diluar perlambatan maksimal dikarenakan perlambatan yang terjadi pada kendaraan jauh lebih besar dari daya dukung roda terhadap koefisien gesek lintasan.

3.4.2 Mendapatkan Peta Distribusi Pengereman Minimum Bus Transjakarta

Dalam suatu sistim pengereman, diterapkan suatu regulasi ECE yang menetapkan besar perlambatan minimum yang terjadi pada roda saat dilakukan pengereman. Ketika roda bagian depan terkunci, gaya pengereman pada roda bagian belakang pada suatu kendaraan harus memenuhi persamaan 3.6.

 $z > 0,1 + 0,7 (k - 0,2) \dots (3.6)$ Dimana : $z = \frac{a}{g} \dots (3.7)$ $\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L} [L_b + (h_G (0,1 + 0,7(\mu - 0,2))] \dots (3.8)$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0,1+0,7(0,9-0,2)) - \frac{F_{bf}}{W}....(3.9)$$

Regulasi ECE pada desain 0,9 untuk roda depan dan belakang adalah sebagai berikut :

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{0.9}{6m} \cdot [2,36364m + (0,925m.(0,1+0,7(0,9-0,2))] = 0,4364$$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0,1+0,7(0,9-0,2)) - 0,4364085 = 0,15359$$

Dengan mengganti nilai (a/g) menjadi [0,1+0,7(k-0,2)] dan nilai (μ) bervariasi dari 0,1 sd 0,9 maka dapat kita ketahui nilai minimum regulasi ECE seperti pada tabel 3.4.

Fbf/W	Fbr/W
0.039856	-0.00986
0.081871	0.018129
0.126044	0.043956
0.172376	0.067624
0.220866	0.089134
0.271514	0.108486
0.32432	0.12568
0.379285	0.140715
0.436408	0.153592

Tabel 3.4 Regulasi ECE Pada Setiap Kondisi Jalan

Jika kita plot nilai (Fbf/W) pada sumbu-x dan (Fbr/W) pada sumbu-y kedalam grafik maka akan didapatkan grafik ECE seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Grafik Regulasi ECE Sistim Pengereman Bus Transjakarta

Kurva distribusi ECE seperti pada gambar 3.6 digunakan sebagai batas pengereman minimum pada roda belakang saat mendesain *mechanical* maupun *regenerative braking*. Distribusi pengereman yang baik tidak boleh lebih keci dari batas minimum kurva regulasi ECE karena dapat mengakibatkan roda depan terkunci terlalu cepat daripada roda belakang sehingga distribusi pengereman menjadi tidak merata dan gaya pengereman roda belakang yang dihasilkan menjadi sangat kecil sehinga tidak mampu memperlambat laju kedaraan sesuai dengan gaya pengereman yang dibutuhkan terhadap lintasan yang dilalui. Dalam hal ini digunakan beberapa pertimbangan seperti ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Contoh Distribusi Pengereman Pada Beberapa Kasus Terhadap Regulasi ECE.

- Pada kasus A, distribusi pengereman awal masih berada dibelakang kurva ECE. Distribusi pada kasus A ini termasuk distribusi yang aman karena tidak melewati kurva ECE.
- 2. Pada kasus B, distribusi pengereman berada diatas kurva ECE yang akan mengakibatkan roda depan terkunci lebih dahulu dari roda belakang dan kendaraan tersebut memperoleh gaya pengereman yang dibutuhkan pada $\mu = 0.6$.
- 3. Pada kasus C, distribusi pengereman berada dibawah kurva ECE yang akan mengakibatkan roda depan terkunci lebih cepat dengan porsi yang jauh lebih besar dari roda belakang sehingga distribusi pengereman kendaraan menjadi tidak optimal. Selain itu kendaraan n tidak akan mendapatkan gaya pengereman yang cukup untuk melakukan perlambatan pada μ=0.6.

3.5 Prinsip Kerja Regenerative Braking–Mechanical Braking

Prinsip kerja sistem pengereman yang akan diaplikasikan pada penelitian ini adalah sistem pengereman yang terdiri dari *regenerative braking* dan mechanical braking. Sistem *regenerative braking* didesain untuk selalu beroperasi diawal proses pengereman hingga batas pengereman tertentu, setelah mencapai batas dari sistem *regenerative braking*, maka sistem mechanical braking mulai beroperasi hingga kendaraan dapat berhenti sempurna pada lintasanya.

Sistem pengereman *regenerative braking* untuk Bus Transjakarta sendiri akan diaplikasikan pada roda kendaraan bagian depan dan belakang dimana pertimbangan didasarkan pada energi *regenerative braking* maksimum yang bisa dibangkitkan dari sistem pengereman tersebut. Selain itu pemilihan aplikasi regenerative braking pada roda depan dan belakang ini juga mengikuti peta distribusi pengereman Bus Transjakarta tersebut dimana regenerative braking diawal pengereman jauh lebih efektif dibandingkan saat berada di akhir pengereman. Untuk ilustrasi sistem pengereman yang dimaksud, dapat dilihat pada ilustrasi pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Operasi Pengereman Pada Berbagai Posisi Pedal

Rem

- Saat pedal berada pada posisi 1, tidak ada gaya pengereman yang diaplikasikan ke roda depan maupun belakang. Pada keadaan ini tidak ada perlambatan yang terjadi pada kendaraan.
- 2. Saat pedal rem ditekan sejauh A dari posisi 1 hingga posisi 2, maka *regenerative braking* roda depan aktif mengikuti pergerakan pedal ini. Pada keadaan ini, perlambatan yang terjadi masih relatif kecil. Apabila perlambatan kendaraan yang terjadi mampu ditanggung oleh *regenerative braking* roda depan, maka tidak ada tambahan gaya pengereman yang diberikan ke roda depan ataupun belakang.
- 3. Saat pedal rem ditekan sejauh B dari posisi-2 hingga ke posisi-3, maka *regenerative braking* roda belakang aktif mengikuti pergerakan pedal ini. Keadaan ini terjadi jika gaya pengereman yang dibutuhkan untuk melakukan perlambatan nilainya lebih besar dari gaya pengereman saat pedal berada pada posisi 2.
- 4. Saat pedal rem ditekan sejauh C dari posisi 3 hingga posisi 4, maka *mechanical braking* roda depan dan belakang aktif untuk memenuhi kebutuhan gaya pengereman. Keadaan ini terjadi jika gaya pengereman saat perlambatan tidak mampu dipenuhi oleh *regenerative braking* roda depan dan roda belakang.

3.6 Porsi Pengereman Pada Perlambatan Maksimal

Pada *driving cycle*, perlambatan terbesar terjadi saat perlambatan ke-18,dimana :

$$V_{18} = 21,66 \ km/h = 6,016 \ m/s$$
$$V_2 = 0 \ m/s$$
$$t_1 = 2555,39 \ s$$
$$t_1 = 2559,25 \ s$$
$$\Delta t = 3,86 \ s$$
$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{6,016 \ m/s}{3,86 \ s} = 1,55855 \ m/s^2$$

Perbandingan dari perlambatan (a) yang dapat dicapai dalam unit gravitasi (g), mendefinisikan bahwa kondisi sistem pengereman akan terkunci pada koefisien adesi antara roda terhadap lintasan tertentu (μ). Dengan perlambatan maksimal 1,55855 m/s² pada gravitasi 9.81 m/s², maka :

$$\frac{a}{g} = \frac{1,55855 \, m/s^2}{9.81 \, m/s^2} = 0.15887$$

Nilai perlambatan minimum dan maksimum Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Perlambatan Aktual dan Maksimum Pada Sistim Pengereman Bus transjakarta.

Pada perlambatan sebesar a=0.15887, porsi *mechanical braking* yang terjadi pada roda depan adalah (Fb_f/W)=0,085 dan roda belakang (Fb_r/W)=0,07387. Besar gaya pengereman *mechanical braking* pada roda depan dan belakang tersebut adalah:

a. Gaya pengereman pada roda bagian depan

 $F_{bf}/W = 0.085$

$$F_{bf} = 0,085.W$$

- $F_{bf} = 13758,525 \text{ N}$
- b. Gaya pengereman pada roda bagian belakang

F _{br} /W	= 0,07387
F _{br}	= 0, 07387.W
F _{br}	= 11956,967 N

3.7 Proses Operasi Regenerative Braking Pada Driving Cycle

Selain merupakan representasi dari perubahan kecepatan pada setiap detiknya, *driving cycle* juga merepresentasikan bagaimana sistem *regenerative braking* akan beroprasi. Proses operasional regenerative braking pada *driving cycle* pada setiap perubahan kecepatan dalam waktu t ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Proses *Operasi Regenerative Braking* Pada Setiap Perubahan Nilai t pada driving cycle

Saat kendaraan pertama kali berangkat dari halte Pulogadung dari kecepatan 0-12 km/h, belum ada energi *regenerative braking* yang dihasilkan dikarenakan kendaraan sedang melakukan percepatan dari t_1 =300s hingga t_2 =313.89 dan kemudian konstan hingga mencapai t_3 =680.98s. Sesaat setelah mencapai t_3 kendaraan kemudian direm hingga berhenti dari 12-0 km/h. Saat pengereman ini *regenerative braking* dihasilkan dan disimpan pada energi storage sistem. Saat energi *storege sistem* berupa *flywheel* mencapai putaran maksimum saat perlambatan pada t_4 =690.24, dianggap energi *flywheel* tersebut langsung digunakan untuk akselerasi. Dalam hal ini, putaran *flywheel* dibatasi hingga mencapai batas minimum 1000 rpm. Akibat adanya pembatasan putaran minimum *flywheel* ini maka energi *flywheel* yang dikeluarkan tidak akan pernah mencapai 100% dari energi yang diserap saat akselerasi.

Putaran *flywheel* tersebut digunakan untuk akselerasi pada t_4 hingga mencapai t_5 =720.13. Dimana kebutuhan energi saat akselerasi pada t_4 ke t_5 pada *driving cycle* adalah lebih besar dari kemampuan *flywheel* dalam mencukupi kebutuhan energi akselerasi tersebut, maka *flywheel* hanya mampu memenuhi sebagian dari kebutuhan energi saat akselerasi dari t_4 ke t_{5a} . Sebaliknya jika energi yang dibutuhkan untuk akselerasi lebih kecil dari energi yang mampu disediakan oleh *flywheel*, maka kelebihan energi tersebut akan dilepas hingga *flywheel* mencapai putaran tertentu untuk di-*charging* ulang saat kendaraan melakukan pengereman kembali. Proses ini berlangsung selama satu siklus *driving cycle*.

3.8 Menentukan Porsi Regenerative Braking

Setelah mengetahui nilai perlambatan maksimumnya, maka selanjutnya adalah menentukan porsi *regenerative braking* yang sesuai pada Bus Transjakarta. Penentuan porsi *regenerative braking* ini dipengaruhi oleh kinerja pengereman, keamanan berkendara dan jumlah energi yang ingin dibangkitkan saat proses pengereman berlangsung. Penentuan porsi pengereman *regenerative braking* ini mengikuti batas hingga a/g=0.15887. Opsi perancangan *regenerative braking* yang bisa diterapkan pada Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Opsi Perancangan Regenerative Braking Bus Transjakarta

Pada gambar 3.11 pengereman Bus Transjakarta dibagi menjadi tiga keadaan yaitu *regenerative braking* roda depan, *regenerative braking* roda belakang dan *mechanical braking*. Pengereman *regenerative braking* roda depan terjadi hingga posisi sesaat sebelum menyentuh kurva ECE pada (Fbf/W=0,05) dan dilanjutkan oleh pengereman *regeneratif braking* roda belakang hingga posisi sesaat sebelum menyentuh kurva ideal yaitu pada (Fbr/W=0,065) manakala *regenerative braking* roda depan belum mampu memenuhi kebutuhan gaya saat perlambatan. *Mechanical braking* beroperasi jika *regenerative braking* roda depan dan belakang belum mampu untuk melakukan perlambatan yang dimaksud, hingga mencapai (a/g=0,15887).

Gaya pengereman pada roda bagian depan

$$\begin{split} F_{bf}/W &= 0,05.....(3.10) \\ F_{bf} &= 0,05.W \\ F_{bf} &= 8093,25 \text{ N} \\ Gaya \text{ pengereman pada roda bagian belakang} \\ F_{br}/W &= 0,065....(3.11) \\ F_{br} &= 0,065.W \\ F_{br} &= 10521,225 \text{ N} \end{split}$$

3.8.1 Pemodelan Dinamika Kendaraan

Pemodelan *regenerative braking* kendaraan diawali dengan melakukan analisa dinamika kendaraan saat perlambatan pada jalan datar seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Free Body Diagram Kendaraan Saat Melewati Jalan Datar

3.8.2 Pemodelan Regenerative Braking

3.8.2.1 Perlambatan dan Gaya Hambat Inersia

Besarnya nilai perlambatan yang terjadi didapat dari hasil diferensial nilai kecepatan pada *driving cycle* Bus Transjakarta, sedangkan gaya hambatan *inersia* terjadi karena adanya massa kendaraan yang mengalami perlambatan sesuai persamaan 2.4.

3.8.2.2 Hambatan Rolling dan Hambat Drag

Gaya hambat rolling dipengaruhi oleh besarnya gaya berat yang diterima roda serta koefisien rolling dari roda tersebut, sedangkan gaya hambat aerodinamik dipengaruhi oleh besarnya kecepatan relatif angin terhadap kendaraan serta luasan frontal kendaraan tersebut sesuai persamaan 2.1 dan 2.2.

3.8.2.3 Gaya Pengereman Bus Transjakarta

Gaya pengereman kendaraan merupakan total gaya gaya hambat yang bekerja terhadap kendaraan Bus Transjakarta pada saat kendaraan melakukan perlambatan, yang didapat dari FBD pengereman seperti pada persamaan 3.12.

 $F_b = m.a - F_d - F_r....(3.12)$

3.8.2.4 Torsi Pengereman Bus Transjakarta

Torsi pengereman yang terjadi pada kendaraan didapat dari perkalian antara gaya pengereman terhadap jari–jari roda kendaraan seperti pada persamaan 3.13

 $Tb = Fb \times r_{dyn}....(3.13)$

3.8.2.5 Daya Pengereman Bus Transjakarta

Daya pengereman yang terjadi pada kendaraan didapat dari perkalian antara torsi pengereman terhadap kecepatan sudut roda mengikuti driving cycle yang ada seperti pada persamaan 3.14.

 $Pb = Tb.\omega_{roda}....(3.14)$ $\omega_{roda} = V/R_{dyn}...(3.15)$

3.8.2.6 Energi Pengereman Bus Transjakarta

Energi bangkitan didapat dengan mengintegrasikan daya pengereman, dan didapatkan energi dengan satuan Watt.second. Untuk dapat dirubah menjadi KWh, maka dibagi dengan 3600000. Energi bangkitan pengereman Bus Transjakarta dicari dengan persamaan 3.16.

 $\mathbf{E} = \int \mathbf{P}\mathbf{b}.\,\mathbf{d}\mathbf{t}....(3.16)$

3.9.3 Pemodelan Peta Distribusi Pengereman Kendaraan

Distribusi pengereman kendaraan dibatasi oleh kurva pengereman maksimum (ideal) dan kurva pengereman minimum (ECE). Pada *driving cycle*, kita dapat melihat besar gaya pengereman aktual yang bekerja saat kendaraan melakukan perlambatan. Besarnya gaya pengereman pada driving cycle dapat lebih besar atau lebih kecil dari peta distribusi pengereman kendaraan yang ada. Untuk dapat melihat seperti apa distibusi pengereman yang terjadi antara pengereman driving cycle terhadap distribusi pengereman kendaraan maka dapat dibuat pemodelan mengikuti persamaan 3.10 dan 3.11.

Untuk mendapatkan daya regeneratif braking pada roda depan, maka porsi pengereman regeneratif roda depan dikalikan terhadap radius dinamik roda untuk mendapatkan torsi pengereman regenerative braking. Torsi pengereman selanjutnya dikalikan terhadap kecepatan sudut roda untuk mendapatkan daya pengereman regeneratif pada roda depan. Energi pengereman didapatkan dengan mengikuti persamaan 3.16.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Profil Pengereman Bus Transjakarta Pada Driving Cycle

Saat kendaraan melakukan perlambatan, besarnya gaya, torsi, daya dan energi yang dibutuhkan untuk melakukan pengereman dipengaruhi oleh besarnya perlambatan kendaraan yang dilakukan. Besarnya gaya, torsi dan daya pengereman Bus Transjakarta saat mengikuti *driving cycle* ditunjukkan oleh grafik pada gambar 4.1.



Driving Cycle

Sedangkan total energi bangkitan Bus Transjakarta pada setiap perlambatanya ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Energi Bangkitan Pengereman Bus Transjakarta Mengikuti Driving Cycle.

Gambar 4.2b memperlihatkan energi bangkitan total sistem pengereman Bus Transjakarta pada setiap perlambatan digambar 4.2a adalah sebesar 9476253,505 Joule atau 2,6323 kWh untuk satu siklus *driving cycle*.

4.2 Porsi Pengereman Terhadap Peta Distribusi Pengereman

Dari opsi strategi pengereman regenerative dan mechanical braking kendaraan pada gambar 3.11, hasil pemodelan distribusi pengereman regenerative dan mechanical braking Bus Transjakarta ditunjukkan oleh grafik pemodelan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Porsi Pengereman Bus Transjakarta Terhadap Peta Distribusi Pengereman.

Pada gambar 4.3a, garis merah dan biru berturut-turut merupakan garis batas dari *regeneratif braking* roda depan dan belakang pada peta distribusi pengereman Bus Transjakarta. Saat mengikuti *driving cycle* Pulogadung-Monas CB, terlihat bahwa sebagian besar distribusi gaya pengereman masih berada pada batas distribusi *regeneratif braking* yang ditentukan dan sebagian kecil melebihi batas tersebut.

Apabila gaya pengereman Fb≤8093,25N (garis merah), maka *regeneratif braking* roda depan aktif. Apabila gaya pengereman Fb≤10521,22N (garis biru), maka *regeneratif braking* roda belakang aktif untuk membantu roda depan. Apabila gaya pengereman Fb>10521,22N maka *mechanical braking* aktif untuk membantu memenuhi kebutuhan gaya pengereman saat perlambatan. Besarnya porsi pengereman yang terjadi dijabarkan sebagai *mechanical braking* (4.3b), *regenerative braking* belakang (4.3c) dan *regenerative braking* depan (4.3d).

4.3 Distribusi Energi Regeneratif Braking Pada Driving Cycle

Dengan membandingkan total energi regenerative braking Bus transjakarta antara roda depan dan belakang terhadap total energi pengereman yang dihasilkan, didapatkan hasil pemodelan seperti pada gambar 4.4.



Energi Driving Cycle

Gambar 4.4b diatas merupakan total energi pengereman yang terjadi mengikuti perlambatan digambar 4.4a. Besarnya total energi

regenerative braking terhadap total energi pengereman pada *driving cycle* dapat dilihat pada gambar 4.4b dimana grafik merah merupakan energi *regeneratif* roda depan dan grafik biru merupakan energi *regeneratif* roda belakang. Pada gambar 4.4c, porsi energi *regenerative braking* (garis merah) yang mampu diserap mencapai 92,18% dari total energi pengereman (garis hitam) pada *driving cycle*.

4.4 Energi Regeneratif Braking Pada Setiap Perlambatan

Untuk mengetahui energi *regeneratif braking* maksimum dan minimum, maka dilakukan integrasi daya terhadap waktu pada setiap perlambatan mengikuti *driving cycle*. Hasil simulasi energi *regenerative braking* pada roda depan untuk setiap perlambatan kendaraan ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Sebaran Energi *Regenerative Braking* Roda Depan Terhadap *Driving Cycle*

Gambar 4.5a memperlihatkan bahwa energi *regeneratif braking* maksimum berada pada perlambatan ke-23 dimana secara lebih jelas dapat dilihat pada gambar 4.5b dengan data sebagai berikut :

 $P_{bf-reg23} = 104063,01W$ $t_1 = 3178,63s$ $t_2 = 3187,89s$ $\Delta t_{23} = t_2 - t_1 = 9,26s$ Besar energi *regenerative braking*-nya: $E_{23} = \int P_{bf-reg23} \cdot dt = 963623,47 \text{ Nm}$

Hasil pemodelan energi *regenerative braking* pada roda belakang untuk setiap perlambatan kendaraan ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Sebaran E.*Regenerative Braking* Roda Belakang Terhadap *Driving Cycle*

Gambar 4.6a memperlihatkan bahwa energi *regenerative braking* maksimum berada pada perlambatan ke-23 dimana secara lebih jelas dapat dilihat pada gambar 4.6b dengan data sebagai berikut :

 $P_{br-reg23} = 135281,91W$

 $t_1 = 3178,63s$

 $t_2 = 3187,89s$

 $\Delta t_{23} = t_2 - t_1 = 9,26s$

Besar energi *regenerative braking*-nya dapat dicari menggunakan persamaan 3.16 sebagai berikut:

 $E_{23} = \int P_{bf-reg23} dt = 1252710,487 Nm$

Setelah mengetahui energi maksimum pada masing-masing regenerative braking roda depan dan belakang, maka selanjutnya dapat dirancang spesifikasi flywheel berdasarkan energi maksimum yang telah didapatkan sebelumnya.

4.5 Desain Flywheel

4.5.1 Perancangan Flywheel

Untuk mendapatkan spesifikasi *flywheel*, digunakan energi maksimum yang diperoleh melalui simulasi. Putaran maksimum *flywheel* dibatasi oleh material *flywheel* yang dipilih. Dari pemodelan pada gambar 4.5 dan 4.6 energi *regenerative braking* maksimum depan dan belakang yaitu sebesar (F_{bf-reg} =963623,5J) dan (F_{br-reg} =1252710,4J). Dimensi *flywheel* yang dirancang, dibatasi oleh ketersediaan ruang pada chasis kendaraan seperti

terlihat pada gambar 4.7 sehingga pertimbangan ruang untuk penempatan *flywheel* menjadi sangat penting.



Gambar 4.7 Ketersediaan Space Pada Chasis Bus Transjakarta

Energi yang disimpan *flywheel* adalah energi kinetik berupa putaran yang didapat dari energi saat pengereman sesuai dengan persamaan 2.8. Putaran maksimum *flywheel* dibatasi oleh kekuatan material yang dipilih dimana saat diputar, material tersebut akan mengalami tegangan tangensial dan radial. Material yang dipilih adalah AISI 1040, dengan properties sebagai berikut :

$$\label{eq:pm} \begin{split} \rho_m &= 7850 \ \text{kg/m}^3 \qquad \quad \sigma_y &= 350 \ \text{Mpa} \\ \sigma_u &= 520 \ \text{Mpa} \qquad \quad \upsilon &= 0.3 \ \text{-} \end{split}$$

4.5.2 Spesifikasi Flywheel Depan

Dengan mengikuti ketersediaan ruang untuk penempatan *flywheel* pada *chasis* Bus Transjakarta pada gambar 4.7 maka ditentukan jari-jari sebagai berikut :

 $r_{i_depan} = 0.04 \ m$

 $r_{o_depan} = 0.2$ m

Dimana *flywheel* merupakan silinder berlubang, kecepatan sudut maksimum *flywheel* roda belakang dihitung menggunakan persamaan 2.27 dan 2.28 sebagai berikut :

Tegangan tangensial

$$\begin{split} \sigma_t &= \frac{(3+v)\,\rho\omega_{fw}^2}{8} \Big[r_i^{\ 2} + r_o^{\ 2} + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1+3v}{3+v} r^2 \Big] \\ \omega_{fw} &= \sqrt{\frac{8.\sigma_y}{(3+v).\,\rho.\left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1+3v}{3+v} r^2\right]} \\ &= \sqrt{\frac{8.350.\,10^6.\,kg.\,m.m^3}{(3+0.3).7850\left[0,04^2 + 0,2^2 + \frac{0,04^2.\,0,2^2}{0,04^2} - \frac{1+3(0,3)}{3+(0,3)}\,0,04^2\right].\,kg.\,s^2.\,m^2} \\ &= 1157,46\,rad/s \end{split}$$

$$n_{fw} = \frac{60.\,\omega_{fw}}{2\pi} = \frac{60.1143,13\,rad/s}{2\pi} = 11058,57\,rpm$$

Tegangan radial

$$\begin{split} \sigma_r &= \frac{(3+v)\,\rho\omega_{fw}^2}{8} \bigg[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - r^2 \bigg] \\ \omega_{fw} &= \sqrt{\frac{8.\sigma_y}{(3+v).\,\rho.\left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - r^2\right]}} \\ &= \sqrt{\frac{8.350.\,10^6.\,kg.\,m.m^3}{(3+0.3).7850 \left[0,04^2 + 0,2^2 + \frac{0,04^2.\,0,2^2}{0,04^2} - 0,04^2\right].\,kg.\,s^2.\,m^2}} \\ &= 1162,36\,rad/s \end{split}$$

$$n_{fw} = \frac{60.\,\omega_{fw}}{2\pi} = \frac{60.1162,36\,rad/s}{2\pi} = 11105,39\,rpm$$

Putaran maksimum *flywheel* depan : $n_{fw-front} = 11105,39$ rpm

Pada *driving cycle*, energi pengereman maksimum berada pada perlambatan ke-23, dengan paremeter *flywheel* yang digunakan sebagai berikut :

n _{max}	11105,39	rpm
n_{min}	0	rpm
ω_{max}	1162,36	rad/s
ω_{min}	0	rad/s
r_{o_depan}	0,2	m
r _{i_depan}	0,04	m
E_{max}	963623,47	Nm

Mencari momen inersia massa flywheel :

$$E_{max} = \frac{1}{2} I_m \cdot \left(\omega_{fw2}^2 - \omega_{fw1}^2\right)$$
$$I_m = \frac{2 E_{max}}{\left(\omega_{fw2}^2 - \omega_{fw1}^2\right)} = \frac{(2) \cdot (963623,47)}{(1162,36^2 - 0^2)} \left| Nm \cdot \frac{s^2}{rad^2} \right| = 1,43 \ kg \cdot m^2$$

Dimana :

$$I_m = \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot (d_0^4 - d_i^4) \cdot h_{fw}$$

$$1,43 \ kg.m^2 = \frac{\pi}{32} \cdot 7850 \frac{kg}{m^3} \cdot [(2.0,2)^4 - (2.0,04)^4] m^4 \cdot h_{fw}$$

$$h_{fw} = \frac{(2,241) \cdot (32)}{3,14 \cdot (7850) \cdot [(2.0,2)^4 - (2.0,04)^4]} \left| \frac{kg.m^2 \cdot m^3}{kg.m^4} \right|$$

$$= 0,072 \ m = 7,2 \ cm$$

Massa total flywheel :

$$\begin{split} m_{fw} &= V \ \rho = (\pi. \ h_{fw}. (r_0^2 - r_i^2)) \ \rho = (\pi. \ 0.072. \ (0.2^2 - 0.04^2)).7850 \ \left| m^3. \frac{kg}{m^3} \right| \\ m_{fw} &= 68,58 \ Kg \end{split}$$

4.5.3 Spesifikasi Flywheel Belakang

Dengan mengikuti ketersediaan ruang untuk penempatan *flywheel* pada *chasis* Bus Transjakarta pada gambar 4.7, maka ditentukan jari-jari sebagai berikut :

 $r_{i_belakang} = 0.04$ m

 $r_{o_belakang} = 0.17$ m

Dimana *flywheel* merupakan silinder berlubang, kecepatan sudut maksimum *flywheel* roda belakang dihitung menggunakan persamaan 2.27 dan 2.28 sebagai berikut :

Tegangan tangensial

$$\sigma_{t} = \frac{(3+v)\rho\omega_{fw}^{2}}{8} \left[r_{i}^{2} + r_{o}^{2} + \frac{r_{i}^{2}r_{o}^{2}}{r^{2}} - \frac{1+3v}{3+v}r^{2} \right]....(4.2)$$

$$\omega_{fw} = \sqrt{\frac{8.\sigma_{y}}{(3+v).\rho.\left[r_{i}^{2} + r_{o}^{2} + \frac{r_{i}^{2}r_{o}^{2}}{r^{2}} - \frac{1+3v}{3+v}r^{2}\right]}$$

$$= \sqrt{\frac{8.350.10^{6}.kg.m.m^{3}}{(3+0.3).7850\left[0,04^{2} + 0,17^{2} + \frac{0,04^{2}.0,17^{2}}{0,04^{2}} - \frac{1+3(0,3)}{3+(0,3)}0,04^{2}\right].kg.s^{2}.m^{2}}s$$

$$= 1359,53 \ rad/$$

$$n_{fw} = \frac{60.\,\omega}{2\pi} = \frac{60.1143,13\,rad/s}{2\pi} = 12989,12\,rpm$$

Tegangan radial

$$\sigma_{r} = \frac{(3+v)\rho\omega_{fw}^{2}}{8} \Big[r_{i}^{2} + r_{o}^{2} + \frac{r_{i}^{2}r_{o}^{2}}{r^{2}} - r^{2} \Big].....(4.3)$$

$$\omega_{fw} = \sqrt{\frac{8.\sigma_{y}}{(3+v).\rho.\left[r_{i}^{2} + r_{o}^{2} + \frac{r_{i}^{2}r_{o}^{2}}{r^{2}} - r^{2}\right]}$$

$$= \sqrt{\frac{8.350.10^{6}.kg.m.m^{3}}{(3+0.3).7850\left[0,04^{2} + 0,17^{2} + \frac{0,04^{2}.0,17^{2}}{0,04^{2}} - 0,04^{2}\right].kg.s^{2}.m^{2}}$$

$$= 1367,49 \ rad/s$$

$$n_{fw} = \frac{60.\omega}{2\pi} = \frac{60.1162,36 \ rad/s}{2\pi} = 13065,165 \ rpm$$

Putaran maksimum *flywheel* belakang : $n_{fw-rear} = 13065,165$ rpm
Pada *driving cycle*, energi pengereman maksimum berada pada perlambatan ke-23, dengan paremeter *flywheel* yang digunakan sebagai berikut :

13065,165	rpm
0	rpm
1367,49	rad/s
0	rad/s
0,17	m
0,04	m
1252710,487	Nm
	$13065,165 \\ 0 \\ 1367,49 \\ 0 \\ 0,17 \\ 0,04 \\ 1252710,487$

Mencari momen inersia massa flywheel :

$$E_{max} = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot \left(\omega_{fw2}^2 - \omega_{fw1}^2\right)$$

$$I_m = \frac{2 \cdot E_{max}}{\left(\omega_{fw2}^2 - \omega_{fw1}^2\right)} = \frac{(2) \cdot (1252710,487)}{(1367,49^2 - 0^2)} \left| Nm \cdot \frac{s^2}{rad^2} \right|$$

$$= 1,34 \ kg \cdot m^2$$

Dengan :

$$I_m = \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot (d_0^4 - d_i^4) \cdot h_{fw}$$

1,34 kg.m² = $\frac{\pi}{32} \cdot 7850 \frac{kg}{m^3} \cdot [(2.0,17)^4 - (2.0,04)^4] m^4 \cdot h_{fw}$
 $h_{fw} = \frac{(2,241) \cdot (32)}{3,14 \cdot (7850) \cdot [(2.0,17)^4 - (2.0,04)^4]} \left| \frac{kg.m^2 \cdot m^3}{kg.m^4} \right| = 0,131 m$
= 13,1 cm

Massa total *flywheel* :

$$\begin{split} m_{fw} &= V \; \rho = (\pi. \, h_{fw}. \, (r_0^2 - r_i^2)) \; \rho = (\pi. \, 0.131. \, (0.17^2 - 0.04^2)).7850 \; \left| m^3. \frac{kg}{m^3} \right| \\ m_{fw} &= 87.85 \; Kg \end{split}$$

Dengan demikian, didapatkan spesifikasi *flywheel* untuk roda depan dan belakang masing-masing yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Doromotor	Flywheel	depan	Flywheel belakang	
Farameter	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
$\rho_{\rm m}$	7850	Kg/m ³	7850	Kg/m ³
$\sigma_{\rm y}$	350	Мра	350	Мра
$\sigma_{\rm u}$	520	Mpa	520	Mpa
υ	0,3	-	0,3	-
r _i	0,04	m	0,04	m
r _o	0,2	m	0,17	m
h_{fw}	0,072	m	0,131	m
rpm _{max}	11105,39	rpm	13065,165	rpm
rpm _{min}	0	rpm	0	rpm
ω_{max}	1162,36	rad/s	1367,49	rad/s
ω_{min}	0	rad/s	0	rad/s
\mathbf{I}_{m}	1,43	kg.m ²	1,34	kg.m ²
$m_{\rm fw}$	68,58	Kg	87,85	Kg

Tabel 4.1 Tabel Spesifikasi Flywheel Roda Depan dan Belakang

Dari tabel diatas, untuk dapat menyerap energi pengereman maksimum pada *driving cycle* maka setiap *flywheel* roda depan maupun belakang harus dibuat dengan dimensi yang berbeda. *Flywheel* roda belakang dibuat lebih tebal dan lebih berat, dengan putaran yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *flywheel* roda depan. Selain dikarenakan jari-jari flywheel roda belakang lebih kecil, juga dikarenakan energi pengereman yang dihasilkan pada roda belakang jauh lebih besar jika diban-dingkan dengan energi pengereman roda depan pada *driving cycle* yang sama. Perbandingan dimensi antara flywheel depan dengan flywheel belakang dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Ilustrasi Dimensi *Flywheel* Roda Depan dan Belakang Skala 1 :13

4.6 Regenerative Braking Vs Akselerasi

Untuk dapat mengetahui seberapa besar energi yang mampu disuplai oleh *regenerative braking*, maka energi regenerative braking akan dibandingkan terhadap kebutuhan energi saat melakukan percepatan. Dimana kebutuhan energi saat percepatan didapatkan dari gaya hambat yang bekerja pada kendaraan tersebut pada persamaan 2.5. Energi *regenerative braking* selanjutnya digunakan untuk membantu akselerasi kendaraan dari putaran *flywheel* maksimum hingga batas putaran yang ditentukan. Disini diberikan batas putaran minimum flywheel sebesar 1000rpm sehingga energi flywheel tersebut disalurkan ke roda penggerak hingga putarannya drop sampai 1000rpm dari putaran maksimumnya saat itu, dengan maksud mencegah flywheel dari berhenti dan memungkinkan daya dari engine untuk segera menggantikan *flywheel*. Jika gaya pengereman yang di roda sangat kecil sehingga mengakibatkan flywheel berputar hingga n_{fw}<1000rpm, maka tidak ada energi yang disimpan untuk diteruskan ke roda.

Hasil pemodelan kebutuhan energi saat akselerasi terhadap ketersediaan energi *regenerative braking* dapat dilihat pada gambar 4.9 sebagai berikut.



Gambar 4.9 Variasi Kebutuhan Energi Saat Percepatan Terhadap Energi Regenerative Braking Yang Tersedia.

Apabila kebutuhan energi saat akselerasi dan ketersediaan energi regenerative braking dalam satu siklus masing-masing dijumlahkan lalu kita bandingkan keduanya, maka dapat dilihat energi total yang mampu disuplai oleh regenerative braking terhadap total kebutuhan energi akselerasi dalam satu siklus *driving cycle* tersebut. Hasil simulasi total kebutuhan energi saat percepatan terhadap total energi yang tersedia pada regenerative braking ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Total Kebutuhan Energi Saat Akselerasi Terhadap Total Energi Regenerative Braking Yang Tersedia.

Dimana :

$$\eta_{reg} = \frac{E_{regenerative}}{E_{acceleration}} \cdot 100\% = \frac{4329433,3 \text{ Joule}}{10466351,95 \text{ Joule}} \cdot 100\% = 41,37\%$$

Dari 4.10, terlihat bahwa energi *regenerative braking* secara teoritis mampu memenuhi 41,37% dari total kebutuhan energi saat kendaraan melakukan akselerasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pemodelan dinamika Bus Transjakarta kearah *longitudinal* dan analisa peta distribusi pengereman untuk *regenerative braking* dapat disimpulkan bahwa:

1. Gaya, Daya dan Energi

Gaya pengereman yang mampu dilakukan oleh Bus Transjakarta pada *braking region*:

5 1	0 0
Fb _{mech.max}	145678,500 N
Fb _{mech.design}	127064,025 N
Fb _{mech.act}	5134,650 N
Fb _{reg.depan}	8093,250 N
Fb _{reg.belakang}	10521,225 N

Daya pengereman maksimum aktual *driving cycle* pada a₂₃, mengikuti *braking region*

Pb _{mech.act}	30467 W
Pb _{reg.depan}	104063 W
Pb _{reg.belakang}	135281,91 W

Energi regenerative braking maksimum pada driving cycle :

Eb _{reg.depan}	963623 Nm
Eb _{reg.belakang}	1252710,5 Nm

2. Spesifikasi Flywheel

Spesifikasi *flywheel* dengan menggunakan energi *regenerative braking* maksimum dan pertimbangan *space* pada *chasis* untuk masing-masing roda depan dan belakang :

Doromotor	Flywheel	depan	Flywheel belakang	
Faranieter	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
r _i	0,04	m	0,04	m
r _o	0,2	m	0,17	m
$h_{\rm fw}$	0,072	m	0,131	m
rpm _{max}	11105,39	rpm	13065,165	rpm
rpm _{min}	0	rpm	0	rpm
ω _{max}	1162,36	rad/s	1367,49	rad/s
ω_{min}	0	rad/s	0	rad/s
Im	1,43	kg.m ²	1,34	kg.m ²
m _{fw}	68,58	Kg	87,85	Kg

 Energi Regenerative Braking Vs Energi Akselerasi Kebutuhan energi yang mampu dipenuhi oleh regenerative braking adalah sebesar 41,37%, dari kebutuhan total energi saat Bus Transjakarta melakukan akselerasi.

5.2 Saran

Dari analisa yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

- 1. Sebaiknya *friction losses* tidak diabaikan guna mengetahui jumlah energi yang hilang.
- 2. Penelitian berikutnya agar dapat mencoba mengkombinasikan antara *regenerative braking menggunakan flywheel* dengan *electrical system* agar pengereman lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cross, D. and J.Hilton. 2010. "High speed flywheel based hybrid systems for low carbon vehicles". Silverstone.
- [2] Volvo confirms fuel savings of 25 percent with flywheel KERS. Available:http://www.gizmag.com/volvo-flywheel
 -kers-testing/27273/ (05 Agustus 2014)
- [3] Naunhimer, Harald, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz, Wolf gang Novak.1994." Automotive Transmissions Fundamen tals, Selection, Design and Application". Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- [4] Bender, Donald A.2000."Flywheels for Renewable Energy and Power Quality Applications". Trinity Flywheel Power. San Francisco.
- [5] Gyrobus : A great idea takes a spin. Available : http://photo. proaktiva.eu/digest/2008_gyrobus.html (02 Agust 2014)
- [6] How CVTs Work-Pulley Based CVT. Available: http://auto. howstuffworks.com/cvt2.htm (02 Agust 2014)
- [7] Hamrock, Bernard J., Jacobson, Bo., Schmid, Steven R. 1999."Fundamentals of Machine Elements". Singapore: Mc Graw Hill.
- [8] Marques, Maria Inês Lopes.2008."Design and Control of an Electrical Machine for Flywheel Energy-Storage System".
- [9] Cimuca, Gabriel–Octavian; "Systeme Inertiel de Stockage d'Energie Associe a des Generateurs Eoliens", Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Lille, France, 2005.

- [10] Ehsani, Mehrdad., Gao, Yimin., Emadi, Ali. 2010. "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamen tals, Theory, and Design Second Edititon". USA : CRC Press LLC.
- [11] Applus IDIADA, 2012. "European Homologation of Braking Systems Motor Vehicles, M1, Regulation No. 13H ECE". Europe.
- [12] Vehicle Standard Section. 2009. "Consulation on Proposed Amendments to Braking Regulation for Vehicle Categories". Ballina : The Road Safety Authority (RSA).
- [13] Reg No.13-H-Rev.2 Braking of passenger cars.
 Available:http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs1-20.html (22 Nop 2013)
- [14] http://www.transjakarta.co.id/peta_full.php (21 Nop 2013)
- [15] Tedji, Hadit .B,. 2014. "Perancangan Flywheel Untuk Sistem Hybrid Pada ATC Bus Transjakarta Berdasarkan Model Dinamika Kendaraan Yang Menyertakan Interaksi Pengemudi Kendaraan Driving Cycle Pulogadung-Monas CB. Surabaya : ITS.
- [16] Tanpa nama. Tanpa tahun. Slide Presentasi Operasional Bus Transjakarta.



Penulis dilahirkan di Balikpapan pada 25 Oktober 1989 dan merupakan anak pertama dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN 021 Balikpapan (1995-2001), SMPN 3 Balikpapan (2001-2004), SMKN 1 Balikpapan (2004-2007) dan Politeknik

Negeri Balikpapan (2007-2010). Setelah lulus studi di Politeknik Negeri Balikpapan, penulis sempat bekerja selama satu tahun sebelum melanjutkan studi ketahap sarjana malalui program Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2011 dan menyelesaikan studi S1 pada bulan Februari 2015. Penulis memiliki hobi olahraga dan traveling. Keinginan untuk belajar dan kebutuhan di dunia industri mendorong penulis untuk mengambil topik Tugas Akhir "Analisa Energi Pengereman Bus Transjakarta Dengan Sistem Flywheel Regenerative Braking Untuk Menentukan Kapasitas Daya Tampung Energi Flywheel". Penulis berharapan agar ilmu yag telah didapatkan dapat berguna untuk agama bangsa dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dengan alamat "*darmaputr@gmail.com*".